

В.К. Старков

**ШЛИФОВАНИЕ
ВЫСОКОПОРИСТЫМИ
КРУГАМИ**

«Машиностроение»

V.K. Starkov

**GRINDING
OF HIGH-POROUS
WHEELS**



**Moscow
«Mashinostroenie»
2007**

В.К. Старков

**ШЛИФОВАНИЕ
ВЫСОКОПОРИСТЫМИ
КРУТАМИ**



**Москва
«Машиностроение»
2007**

УДК 621.922
ББК 34.637.3
С77

Старков В.К.

С77 Шлифование высокопористыми кругами. – М.: Машиностроение, 2007. – 688 с., ил.
ISBN 978-5-217-03386-7

Приведены рецептурные составы, технология изготовления и их влияние на эксплуатационные свойства высокопористого абразивного инструмента, достижения в создании и применении высокопористых кругов на основе эльбора, алмаза, монокристаллического корунда и традиционных абразивных материалов. Даны рекомендации по назначению характеристик кругов и режимов маятникового и глубинного шлифования. Изложены способы предотвращения шлифовочных прижогов и трещин, а также результаты исследований и примеры практической реализации шлифования зубчатых колес, фасонного инструмента, замков лопаток, обработки со скоростями до 100 м/с, в том числе без охлаждения и др.

Для инженерно-технических и научных работников, специалистов промышленности, преподавателей и студентам вузов.

УДК 621.922
ББК 34.637.3

Производственно-техническое издание

Старков Виктор Константинович

ШЛИФОВАНИЕ ВЫСОКОПОРИСТЫМИ КРУГАМИ

Редактор *Е.Д. Макаренко*

Художественный редактор *Т.Н. Позорелова*

Корректор *М.Я. Барская*

Инженер по компьютерному макетированию *Г.Ю. Корабельникова*

Сдано в набор 08.12.2006 г. Подписано в печать 27.03.2007 г.

Формат 70×100 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Гарнитура Times New Roman.

Печать офсетная. Усл. печ. л. 55,9. Уч.-изд. л. 55,0.

Тираж 1000 экз. Заказ

Ордена Трудового Красного Знамени ОАО "Издательство "Машиностроение",
107076, Москва, Стромынский пер., 4
www.mashin.ru

Оригинал-макет подготовлен в ООО "Издательство Машиностроение-1"

Отпечатано в ГУП ППП "Типография "Наука" РАН,
121099, Москва, Шубинский пер., 6

ISBN 978-5-217-03386-7

© Старков В.К., 2007

© Издательство «Машиностроение», 2007

ОТ РЕДАКЦИИ

Автор книги – доктор технических наук, профессор Виктор Константинович Старков является заслуженным деятелем науки и техники РФ, лауреатом премии Совета Министров СССР.

В.К. Старков широко известен в России и за рубежом своими фундаментальными исследованиями по дислокационной физике, статистической оптимизации и надежности резания, теории абразивного инструмента и процессов шлифования. В числе первых исследовал строение алмазных шлифовальных кругов и процессы обработки с их применением, в том числе шлифование тугоплавких сплавов на основе вольфрама и молибдена, жаропрочных никелевых и титановых сплавов и других труднообрабатываемых материалов.



В.К. Старков опубликовал 8 монографий, более 300 печатных работ, получил большое количество патентов РФ, ФРГ и Чешской Республики, подготовил 34 кандидата и 9 докторов технических наук. Имеет Правительственные награды, памятные знаки и медали общественных организаций, зарубежных университетов и институтов.

Виктор Константинович разработал оригинальное направление в производстве абразивного инструмента – шлифовальные круги на основе композиций с регулируемой пористостью из традиционных абразивных и сверхтвердых материалов с выгорающими и невыгорающими порообразователями в виде тонкостенных микросфер различного состава. Изго-

товление нового инструмента освоено в промышленных масштабах, а сам инструмент успешно применяется более чем на 30 предприятиях авиационной, автомобильной, инструментальной, подшипниковой и других отраслях машиностроения.

С использованием высокопористых кругов разработаны и освоены новые технологии профильного глубинного и чистового шлифования зубчатых колес, шлицевых соединений, фасонного режущего инструмента, высокоскоростного сухого шлифования и другие высокопроизводительные процессы обработки.

По результатам рейтингового отбора научных работ 175 университетов из 29 стран мира В.К. Старков включен единственным представителем от России в справочное издание Международного союза инженеров-механиков (CIRP): Current Global Research Projects in Fixed Abrasive Grinding. Prepared by Dr. John A. Webster. Cool-Grind Technologies, USA, 2005, 508 p.

В монографии обобщены результаты многолетних исследований, выполненных автором в МГТУ «Станкин», по разработке и промышленному освоению технологий изготовления и применения высокопористых шлифовальных кругов.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	11	Глава 3. НОВЫЕ ПРИНЦИПЫ	
Глава 1. ВЫСОКОПОРИСТЫЕ		ИЗГОТОВЛЕНИЯ ВЫ-	
ШЛИФОВАЛЬНЫЕ		СОКОПОРИСТОГО АБ-	
КРУГИ КАК АБРАЗИВ-		РАЗИВНОГО ИНСТ-	
НЫЙ ИНСТРУМЕНТ	14	РУМЕНТА	117
1.1. Общие сведения об		3.1. Невыгорающие поро-	
абразивном инструменте	14	образователи для изготов-	
1.2. Высокопористые шли-		ления высокопористого	117
фовальные круги	39	абразивного инструмента	
1.3. Конкурентоспособность		3.2. Влияние корундовых	
абразивного инструмента ...	57	микросфер на прочностные	
		свойства высокопористых	
		шлифовальных кругов	127
Глава 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ		3.3. Особенности молотых	
ПРЕДПОСЫЛКИ ПРИ-		фруктовых косточек как	
МЕНЕНИЯ ВЫСОКО-		порообразователя	141
ПОРИСТЫХ ШЛИФО-		3.4. Оптимальные компо-	
ВАЛЬНЫХ КРУГОВ	60	зиции из невыгорающих и	
2.1. Структурная модель		выгорающих порообразо-	
строения абразивного ин-	60	вателей	147
струмента		3.5. Особенности строения	
2.2. Физический механизм		шлифовальных кругов с	
съема материала при шли-		выгорающими и невыго-	
фовании	78	рающими порообразова-	
2.3. Механизм взаимодей-		телями	152
ствия шлифовального кру-		3.6. Геометрические пара-	
га с обрабатываемой дета-		метры рельефа режущей	
лью	88	поверхности высокопо-	
2.4. Сравнительный ана-		ристых шлифовальных	
лиз работоспособности		кругов	158
шлифовальных кругов раз-			
личных структур	93	Глава 4. ТЕХНОЛОГИЧНОСТЬ	
2.5. Исходные предпосыл-		ИЗГОТОВЛЕНИЯ ВЫ-	
ки для выбора абразивно-		СОКОПОРИСТЫХ	
го инструмента	97	ШЛИФОВАЛЬНЫХ	
2.6. Предотвращение де-		КРУГОВ	167
фектов шлифовочного ха-		4.1. Технология изготов-	
рактера	105	ления высокопористых аб-	
		разивных кругов	167
		4.2. Технологические свой-	
		ства шлифовальных кругов	
		и критерии их оценки	188

4.3. Методика и условия проведения исследований состава и свойств высокопористых кругов	190	6.1. Сравнительный анализ применения высокопористых кругов при шлифовании	292
4.4. Усилие прессования высокопористых абразивных кругов различного состава	198	6.2. Повышение эффективности шлифования подшипников	299
4.5. Деформация высокопористых шлифовальных кругов при их изготовлении	199	6.3. Шлифование сложнофасонного инструмента ...	309
4.6. Экологичность изготовления высокопористых шлифовальных кругов	210	6.4. Шлифование резьбы	315
Глава 5. ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ВЫСОКОПОРИСТЫХ ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ	216	6.5. Опыт шлифования деталей из закаленных легированных сталей без охлаждения	318
5.1. Твердость и ее стабильность в объеме инструмента	216	Глава 7. ГИБКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС И ШЛИЦЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ	330
5.2. Роль масштабного фактора в формировании твердости и ее стабильности в объеме инструмента	224	7.1. Зубчатые колеса ответственного назначения и технология их изготовления	330
5.3. Акустический контроль структурного состояния высокопористых шлифовальных кругов	235	7.2. Теоретические предпосылки профильного глубинного шлифования зубчатых элементов	335
5.4. Неуравновешенность масс высокопористых шлифовальных кругов	246	7.3. Формообразование зубчатых колес и шлицевых соединений методом профильного глубинного шлифования	345
5.5. Разрывная прочность высокопористых шлифовальных кругов	271	7.4. Выбор оптимальных условий чистового шлифования зубчатых колес высокопористыми кругами ...	362
5.6. Технологические и эксплуатационные свойства высокопористых кругов из различных абразивных материалов	285	7.5. Правка шлифовальных кругов при обработке зубчатых колес	379
Глава 6. ШЛИФОВАНИЕ ДЕТАЛЕЙ И ИНСТРУМЕНТА ИЗ КОНСТРУКЦИОННЫХ И БЫСТРОРЕЖУЩИХ СТАЛЕЙ	292	7.6. Точность и качество обработки профильным глубинным шлифованием зубчатых колес	389
		7.7. Промышленное освоение новой технологии изготовления зубчатых колес и соединений	399

7.8. Экономическая оценка новой технологии профилирования зубчатых колес	409	9.2. Требования к высокопористым кругам для глубинного шлифования хвостовиков турбинных лопаток	493
Глава 8. ВЫСОКОСКОРОСТНОЕ ШЛИФОВАНИЕ БЕЗ ПРИМЕНЕНИЯ СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СРЕД	414	9.3. Эксплуатационные свойства инструмента для глубинного шлифования хвостовиков лопаток ГТД	497
8.1. Актуальность проблемы и постановка задач исследования	414	9.4. Исследование процесса глубинного шлифования	501
8.2. Теоретические предпосылки реализации сухого шлифования	418	9.5. Примеры глубинного шлифования хвостовиков турбинных лопаток	510
8.3. Абразивный инструмент для высокоскоростного сухого шлифования	442	9.6. Профильное глубинное шлифование хвостовиков лопаток больших габаритов	523
8.4. Экспериментальная установка и методика проведения исследований	443	9.7. Методы повышения эффективности глубинного шлифования жаропрочных никелевых сплавов	525
8.5. Влияние характеристики шлифовального круга и режима обработки на процесс сухого шлифования	441	Глава 10. ПРОФИЛЬНОЕ ГЛУБИННОЕ ШЛИФОВАНИЕ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ	539
8.6. Влияние режима сухого шлифования на выходные характеристики процесса и их стабильность	465	10.1. Высокопористый абразивный инструмент для глубинного шлифования титановых сплавов	540
8.7. Термодинамика высокоскоростного шлифования без применения смазочно-охлаждающих технологических сред	478	10.2. Исследование глубинного шлифования титановых сплавов	541
Глава 9. ПРОФИЛЬНОЕ ГЛУБИННОЕ ШЛИФОВАНИЕ ХВОСТОВИКОВ ТУРБИННЫХ ЛОПАТОК	490	10.3. Опыт глубинного шлифования деталей из титановых сплавов	552
9.1. Технологические схемы глубинного шлифования хвостовиков турбинных лопаток	491	Глава 11. ШЛИФОВАНИЕ МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ	562
		11.1. Применение магнитных материалов и особенности их обработки	562
		11.2. Сравнительный анализ схем маятникового и глубинного шлифования	564

11.3. Влияние параметров строения шлифовального круга на его режущую способность	570	12.5. Профильное шлифование зубчатых колес высокопористыми эльборовыми кругами	624
11.4. Влияние параметров режима глубинного шлифования на его выходные характеристики	577	12.6. Сравнительный анализ работоспособности высокопористых эльборовых и корундовых кругов при профильном зубошлифовании	643
11.5. Результаты производственных испытаний и их технико-экономический анализ	584	Глава 13. НАЗНАЧЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЫСОКОПОРИСТЫХ ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ	653
Глава 12. ВЫСОКОПОРИСТЫЕ ШЛИФОВАЛЬНЫЕ КРУГИ ИЗ СВЕРХТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ	589	13.1. Рекомендации по назначению характеристики высокопористого инструмента	653
12.1. Алмазные высокопористые круги	589	13.2. Идентификация высокопористого абразивного инструмента	663
12.2. Высокопористые шлифовальные круги из кубического нитрида бора	597	13.3. Оптимизация характеристик и рецептурного состава высокопористых кругов	667
12.3. Сравнительный анализ шлифовальных кругов из кубического нитрида бора с нормальной и высокопористой структурами	607	13.4. Эксплуатационные возможности высокопористых шлифовальных кругов нового поколения	676
12.4. Шлифование высокопористыми эльборовыми кругами деталей из труднообрабатываемых материалов	613	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	682

ПРЕДИСЛОВИЕ

Шлифование – самый распространенный и наиболее эффективный технологический процесс среди всех известных методов абразивной обработки. За последние годы его применение существенно расширилось: по скорости обработки до 250 м/с, глубине резания от долей микрона до 10 мм и более, по шероховатости обработанной поверхности детали до $Ra\ 0,04\dots0,02$ и по точности формообразования – менее 1 мкм.

Новые технологии профильного глубинного шлифования, совмещая в одной операции предварительное формообразование и финишную обработку, позволяют получать сложные по форме фасонные поверхности зубчатых колес, шлицевых соединений, режущего и прессового инструмента, хвостовиков лопаток, подшипников и т.д. с высокой точностью и производительностью. Глубинным шлифованием, которое более экономично, чем методы лезвийной обработки, формируется наиболее "благоприятное" для эксплуатации упрочнение поверхностного слоя детали, не достигаемое даже на мягких режимах маятникового шлифования.

Все чаще обработка шлифованием, в том числе при высоких скоростях резания, ведется без использования смазочно-охлаждающих жидкостей, что увеличивает экологическую безопасность производства. В отдельных случаях шлифование становится безальтернативным процессом высокоточной обработки деталей из конструкционных материалов, которые не могут быть обработаны другим методом.

Очевидный прогресс в технологии шлифования обусловлен в определенной степени достижениями в производстве абразивного инструмента. К ним можно отнести создание и применение шлифо-

вальных кругов на различных связках из новых модификаций корунда, кубического нитрида бора и алмаза, но в основном за счет абразивного инструмента с повышенными показателями пористости, твердости и разрывной прочности.

Мониторинг продукции ведущих зарубежных фирм – производителей абразивного инструмента – свидетельствует, что за последние годы в ее составе заметно увеличилась доля высокопористых шлифовальных кругов. Инструментом этого класса, например, сейчас оснащаются все профилишлифовальные и зубошлифовальные станки известных станкостроительных фирм. Высокопористый абразивный инструмент активно вытесняет традиционные шлифовальные круги на всех операциях маятникового шлифования и способствует внедрению высокопроизводительных схем глубинной обработки.

Освоение высокопористых шлифовальных кругов, как правило, сопровождается повышением производительности процесса и устранением дефектов шлифовочного характера. Внедряются, например, процессы профильного глубинного шлифования мягкими кругами с твердостью $BM1\dots BM2$ при скорости 70...80 м/с или бесприжогового резбошлифования кругами зернистостью 8...10 и повышенной твердостью $C1\dots CT2$.

Вместе с тем, технологические возможности современных станков по скорости резания, производительности, мощности, автоматизации управления процессом и применяемым системам правки не реализуются в полной мере из-за отсутствия адекватного по своим эксплуатационным свойствам абразивного инструмента. Шлифовальный круг остается самым слабым

элементом в технологической системе резания станок–инструмент–деталь, ограничивающим уровень производительности бездефектного удаления материала с обрабатываемой поверхности. По этой причине повышение работоспособности шлифовальных кругов постоянно сохраняет свою актуальность как побудительный мотив совершенствования технологии шлифования и станочного оборудования.

На основе теоретического анализа внутреннего строения высокопористых кругов предложены новые технологические подходы к формированию их объемной структуры в зависимости от требуемой характеристики и условий эксплуатации. Парадоксально, но работоспособность инструмента можно улучшить, уменьшая объемное содержание абразивных зерен, – основных режущих элементов. В этом доминантность объемно-структурного строения высокопористых шлифовальных кругов и в этом их преимущество как абразивного инструмента.

В книге показано, что управлять работоспособностью шлифовальных кругов можно изменением статистических характеристик распределения абразивных зерен, введением различных по физико-механическим, химическим и морфологическим свойствам порообразователей, оптимизацией их состава и объемного содержания. На этой основе достигнуты показатели технологичности изготовления и режущей способности абразивного инструмента с высокими номерами структур, существенно превосходящие известные аналоги высокопористых шлифовальных кругов и инструмента нормальных структур.

Достоинство книги, по мнению автора, заключается в раскрытии причинно-следственной связи между объемно-структурным строением шлифовального круга и результатами процесса обработки. Выявление закономерностей этих связей и разработка на их основе феноменологических моделей стало удобным инструментарием для прогнозирования требуемых

свойств шлифовальных кругов и оптимизации условий их работы.

Многолетний опыт работы автора в промышленности свидетельствует, что даже при рекомендуемой характеристике шлифовального круга (по материалу абразива, его зернистости, твердости и структуре) не всегда можно добиться желаемого результата. Целый ряд факторов, которые не учитываются стандартной характеристикой абразивного инструмента, оказывает большое влияние на его работоспособность и соответствие условиям конкретной операции шлифования. К главным из них относятся рецептурный состав инструмента и условия его изготовления: регламент смешивания абразивной массы, режим прессования, сушки и обжига, технология механической обработки. Они определяют эксплуатационные свойства шлифовального круга – его фактическую пористость, объемно-структурное строение, эластичность связи абразивных зерен, твердость и ее стабильность в объеме инструмента, неуравновешенность масс, возможную рабочую скорость и др.

Только с учетом всех основных факторов производства абразивного инструмента можно обеспечить его адресное изготовление для ответственных операций шлифования. Это положение становится доминирующим в технологии машиностроения.

Книга содержит оригинальные сведения о рецептурных составах, технологических и эксплуатационных свойствах высокопористых шлифовальных кругов из традиционных и сверхтвердых абразивных материалов на основе выгорающих и невыгорающих порообразователей. Приведены результаты их испытаний и внедрения при маятниковом и глубинном шлифовании деталей различного класса из легированных сталей, титановых и никелевых сплавов, магнитных материалов и др. Описаны оригинальные технологии профильного глубинного шлифования зубчатых колес и шлицевых соединений,

высокоскоростного шлифования, в том числе без принудительного охлаждения, примеры эффективного применения кругов из сверхтвердых материалов.

Изготовление высокопористых шлифовальных кругов и исследование их режущей способности выполнялось по проектам европейской программы научно-технического сотрудничества ЭВРИКА совместно с техническими университетами Ганновера, Магдебурга и Хемница, фирмами Dr. Kaiser Diamantwerkzeuge (Германия), Carborundum Electrite a.s., Best-Business a.s. (Чехия) и др.

Совместная работа с зарубежными партнерами позволила дать сравнительную оценку уровня достижений в технологии производства абразивного инстру-

мента и его применения в различных процессах шлифования.

Книга написана по материалам исследований, выполненных в основном в МГТУ "Станкин", а также по результатам опробирования и внедрения их результатов на большом числе промышленных предприятий.

Автор, пользуясь возможностью, выражает свою большую благодарность всем, кто в той или иной степени оказывал помощь или содействие в выполнении этой работы.

Книга одинаково полезна специалистам по производству абразивного инструмента и технологам, связанным с освоением процессов шлифования в машиностроении.

Глава 1

ВЫСОКОПОРИСТЫЕ ШЛИФОВАЛЬНЫЕ КРУГИ КАК АБРАЗИВНЫЙ ИНСТРУМЕНТ

1.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ АБРАЗИВНОМ ИНСТРУМЕНТЕ

По своим свойствам, форме и строению абразивный инструмент существенно отличается от других видов режущего инструмента способностью работать при скоростях резания, значительно превосходящих скорости резания лезвийным инструментом, обрабатывать различные по свойствам конструкционные материалы – от кожи, резины, дерева до труднообрабатываемых и высокотвердых материалов, которые не поддаются лезвийной обработке. При этом в процессе обработки удаляется слой материала глубиной от нескольких миллиметров до долей микрометра, обеспечивая высокую производительность, точность и качество обработки.

Отечественная промышленность в настоящее время все более широко использует импортный абразивный инструмент, который в ряде случаев превосходит отечественный по ассортименту и качеству продукции, по разнообразию марок применяемых абразивов и связок. Поэтому излагаемая ниже информация об абразивном инструменте основана не только на отечественных стандартах, но и включает в себя зарубежный опыт в этой области.

Также приведены важные сведения из нового европейского стандарта ISO/FDIS 6103 по характеристикам абразивного инструмента и требованиям безопасности его применения на производстве. Следует ожидать, что абразивный инструмент, выпускаемый европейскими фирмами-производителями, так же, как и

отечественными заводами, соответствует требованиям этого стандарта.

Классификация абразивных инструментов. Современный абразивный инструмент обладает широким спектром технологических возможностей по видам, типам, размерам, характеристикам и соответственно своим режущим свойствам. Его многообразие адекватно отображает необходимость выполнения технологических требований различных процессов абразивной обработки по скорости резания, производительности по съему материала, термодинамическим нагрузкам, точности и качеству обработанных деталей.

Весь абразивный инструмент подразделяют на три основных вида:

- **инструмент на жесткой основе**, в котором зерна шлифовальных материалов жестко закреплены той или иной связкой – керамической, органической, металлической или специальной;
- **шлифовальная шкурка** и изделия из нее (бесконечные шлифовальные ленты, ленты, бобины, конусы, диски, лепестковые круги), фибровые диски, инструмент, изготовленный на гибкой основе (фибра, бумага, ткань или их комбинация, нетканый материал) с нанесенным слоем шлифовального материала, закрепленного связкой, и другой гибкий или эластичный абразивный инструмент;
- **пасты твердой и жидкой консистенции**, представляющие собой композицию из шлифовальных материалов и органических связующих, закрепляющих абразивные зерна так, что при работе они имеют значительную свободу перемещения в зоне обработки с включением в сос-

тав также смазывающих и поверхностно-активных веществ.

Наибольшее распространение получил абразивный инструмент на жесткой основе, который в свою очередь дополнительно классифицируют на:

- **шлифовальные круги** – абразивные инструменты в виде тела вращения цилиндрической или специальной формы;
- **шлифовальные головки** – шлифовальные круги различных форм и размеров с глухими отверстиями для крепления на оправках, в большинстве случаев закрепленные на металлических хвостовиках;
- **шлифовальные сегменты**, являющиеся составной частью сборного или составного шлифовального круга;
- **шлифовальные бруски** – абразивный инструмент призматической или цилиндрической формы, используемый для изготовления хонов или суперфинишных головок;
- **шлифовальные шевера** – абразивные инструменты, имеющие форму зубчатого колеса, используемые для финишной обработки зубчатых колес;
- **абразивные галтовочные тела**, представляющие собой призмы, звездочки и другие произвольные геометрические формы, используемые для виброабразивной обработки в галтовочных барабанах.

Шлифовальные круги – самый представительный класс абразивного инструмента, как по объемам потребления, так и по сложности технических требований к качеству их изготовления. Поэтому их эксплуатационные свойства, включая возможные формы, размеры, характеристики и нормы точности, жестко регламентированы стандартами.

По своим формам или профилю шлифовальные круги подразделяются на 13 типов: прямого (цилиндрического) или конического профилей, в виде колец, чашек, тарелок, со специальными выточками и т.д. Кроме того, правкой может быть

обеспечен любой другой специальный профиль, необходимый для конкретной операции шлифования.

Помимо типа и размеров характеристика шлифовального круга включает в себя материал и марку абразива, его зернистость, твердость и номер структуры круга, тип и марку связки. В состав характеристики входят также рабочая скорость инструмента, его степень точности и класс неуравновешенности масс.

Производительность шлифования, качество и точность обработки детали в значительной степени зависят от характеристики абразивного инструмента. При его выборе должны учитываться свойства обрабатываемого материала, размер детали, форма и вид шлифуемой поверхности, величина удаляемого припуска, необходимая точность обработки, шероховатость поверхности; требуемое физико-механическое состояние поверхностного слоя детали; тип станка и его характеристика, в том числе жесткость системы, мощность электродвигателя; режим обработки (скорость круга и изделия, величина подачи, тип подачи, охлаждение и др.)

Чтобы грамотно назначить характеристику шлифовального круга с учетом указанных исходных требований, необходимо хорошо знать современные возможности абразивного инструмента как в целом, так и по отдельным его производителям.

Абразивные материалы и их назначение. В качестве основных абразивных материалов для изготовления шлифовальных кругов используются электрокорунд или корунд и его модификации, карбид кремния или карборунд и его модификации и группа сверхтвердых материалов – кубический нитрид бора и алмаз.

В табл. 1.1 приведены обобщенные данные по физико-механическим свойствам основных материалов, используемых для изготовления абразивного инструмента. Разброс данных по многим позициям обусловлен не столько использованием различных источников, сколько степенью

1.1. Физико-механические свойства абразивного материала

Свойства	Алмаз	Кубический нитрид бора	Электрокорунд	Карбид кремния
Плотность, г/см ³	3,48...3,56	3,45...3,49	3,85...4,15	3,12...3,25
Микротвердость, ГПа	84,4...98,4	78,5...98,1	18,9...23,5	32,4...35,3
Модуль упругости, ГПа	900	720	358...390	365
Предел прочности, ГПа: при сжатии при изгибе	0,4...5,0 0,9...1,0	2,0...6,5 0,4...1,5	3,0 0,09	1,5 0,05...0,15
Механическая прочность при зернистости 25, Н	14,7...55,9	7,6...10,5	8,8...13,7	11,0...14,7
Относительная абразивная способность, %	100	19,0...25,4	10,2...13,5	16,7...21,1
Теплопроводность, Вт/(м·К)	143,5	41,9	19,7	15,5
Коэффициент термического расширения, 10 ⁻⁶ , К	0,9...1,45	2,1...4,7	7,5	6,5
Удельная теплоемкость, Дж/(кг·К)	0,502	0,669	0,752	0,585
Теплоустойчивость, °С	700...800	1300...1500	1250...2000	1300...1400

влияния зернистости исследованных порошков и отличиями в кристаллическом строении и химических составах модификаций или марок в каждой группе абразивов.

Алмазы, например, применяются как природного, так и искусственного происхождения, которые, в свою очередь, подразделяются по прочностным характеристикам на несколько марок, так же, как и кубический нитрид бора (КНБ). У карбида кремния как абразивного материала имеется 2 разновидности: черный и зеленый, и, соответственно 5 разных марок, а у электрокорунда известно более 10 модификаций и более 20 марок в зависимости от состава и свойств.

В табл. 1.1 помимо общепринятых свойств приведены характеристики, кото-

рые используются для абразивных зерен. Механическая прочность определяется при одноосном сжатии абразивного зерна по силе, при которой оно разрушится. Показателем прочности служит усредненная сила, получаемая по итогам разрушения 50 отдельных зерен (неразрушенная часть зерна должна составлять менее половины его первоначального размера).

Абразивная или режущая способность измеряется как результат изнашивания абразивных зерен, помещенных между двумя вращающимися и прижимаемыми с определенным усилием друг к другу дисками. Абразивная способность алмазных зерен принимается за 100 %, относительно нее определяются значения других абразивных материалов. Подробнее о методах и результатах измерения

механической прочности и режущей способности абразивных материалов можно узнать в работе [32].

В случае необходимости абразивные материалы легко идентифицировать по их плотности, так как по этой характеристике они заметно отличаются друг от друга. Исключение составляют только два абразива: плотность КНБ близка к нижней границе значений плотности алмаза.

По упругим и прочностным характеристикам сверхтвердые материалы, алмаз и КНБ, превосходят другие абразивные материалы искусственного происхождения, а по механической прочности КНБ уступает электрокорунду и карбидам кремния и бора.

Относительная абразивная способность коррелирована с микротвердостью, остротой режущих кромок и прочностью зерен. По этой причине абразивная способность алмаза в 4–5 раз превосходит аналогичный показатель кубического нитрида бора, до 6 раз – карбида кремния и до 10 раз – электрокорунда.

Большое значение для процесса шлифования имеют теплофизические свойства абразивных материалов. При шлифовании высокие температуры локализуются на режущих кромках абразивных зерен, которые находятся в контакте с обрабатываемым материалом детали. Хорошая теплопроводность в сочетании с повышенной удельной теплоемкостью способствуют лучшему отводу тепла от режущих поверхностей зерен в их объем, способствуя снижению общего уровня теплонапряженности в зоне резания. Наиболее оптимальное сочетание этих свойств имеет алмаз, затем КНБ, электрокорунд и карбид кремния.

Коэффициент термического расширения важен при точной обработке лезвийным инструментом. Для абразивного инструмента его величина обуславливает прочность удержания зерен связкой при эксплуатации. Периодически повторяющийся цикл нагрев–охлаждение абразив-

ных зерен при шлифовании с сопутствующими явлениями их расширения и сжатия способствует разрушению связей, удерживающих зерна в объеме шлифовального круга, и приводит к его интенсивному изнашиванию.

При выборе абразивного материала для конкретных условий обработки необходим комплексный анализ совокупности всех физико-механических свойств, представленных в табл. 1.1. Это тем более важно, что многие из них находятся во взаимосвязи с другими характеристиками, например трещиностойкостью и линейно-геометрическими параметрами зерен. При увеличении твердости абразива закономерно уменьшается его трещиностойкость, а при его размалывании формируются зерна с более острыми режущими кромками. Такое сочетание способствует обработке с удалением очень тонких стружек, а также создает предпосылки для самовосстановления режущей способности инструмента за счет скалывания затупившихся кромок абразивных зерен при правке и шлифовании.

Определяющими свойствами абразивного материала при его выборе являются теплоустойчивость и химическая инертность к обрабатываемому материалу. Теплоустойчивость или температура, при которой абразив теряет свои режущие свойства, так же, как и степень химического взаимодействия, связаны с устойчивостью электронных конфигураций. Если твердость материала при комнатной температуре определяется его наиболее прочными химическими связями, то при повышении температуры уменьшается прочность всех связей и происходит перераспределение стабильных электронных конфигураций.

В табл. 1.2 приведена степень химического взаимодействия абразивных материалов применительно к условиям шлифования наиболее распространенных конструкционных материалов на основе железа, титана, никеля и металлокерамики.

1.2. Степень химического взаимодействия абразивных материалов с некоторыми конструкционными материалами

Абразивный материал	Конструкционные материалы				
	Сталь	Чугун	Титановые сплавы	Металло-керамика	Никелевые сплавы
Алмаз	Высокая	Низкая	Низкая	Низкая	Низкая
Кубический нитрид бора	Низкая	—	Низкая	—	—
Электрокорунд	—	—	Высокая	—	Низкая
Карбид кремния	Высокая	Низкая	Средняя	Низкая	Высокая
Оксид циркония	—	—	Низкая	—	Низкая

Алмаз, например, при нагреве постепенно графитизируется. На воздухе такой переход начинается при температуре 800...820 °С и соответственно он полностью теряет свою режущую способность при обработке, если температура шлифования превысит этот критический уровень.

Из-за низкой теплостойкости и высокой химической активности к железу область практического применения алмаза как абразивного материала при шлифовании ограничена. Но при обработке твердых и химически инертных неметаллических и металлокерамических материалов он находится вне конкуренции. Применение алмаза может быть технико-экономически оправдано в отдельных случаях шлифования чугунов, титановых сплавов и др.

Из ограничений по другим абразивным материалам можно отметить, что не рекомендуется шлифовать титановые сплавы кругами из электрокорунда, никелевые сплавы и стали (за исключением очень твердых) — кругами из карбида кремния. Эффективность обработки в этих случаях снижена за счет формирования адгезионных связей между абразивом и обрабатываемым металлом с сопут-

ствующими "схватыванием", налипанием стружек, "засаливанием" рабочей поверхности шлифовального круга и быстрой потери им режущей способности.

Карбид бора вследствие переменного химического состава и низкой температуры разложения не используется для изготовления абразивного инструмента на жесткой основе, а только в виде порошка или паст.

По совокупности свойств, определяющих режущую способность, наиболее предпочтителен среди всех известных абразивов кубический нитрид бора. В России он имеет название "эльбор", в европейских странах — CBN (латинская аббревиатура КНБ), в США — "боразон", на Украине его выпускают под названием "кубонит", а в Белоруссии — "белбор".

Основным препятствием для широкого распространения кубического нитрида бора в качестве абразива является его высокая стоимость, значительно превышающая стоимость карбида кремния и электрокорунда. Поэтому карбид кремния и электрокорунд являются основными абразивными материалами для изготовления инструмента на жесткой основе и, в частности, шлифовальных кругов.

1.3. Физико-механические свойства модификаций электрокорунда

Абразивный материал	Плотность, г/см ³	Микротвердость, ГПа	Механическая прочность, Н	Теплоустойчивость, °С	Абразивная способность относительно алмаза, %
Электрокорунд:					
нормальный	3,85...3,95	18,9...19,6	8,8...10,7	1250...1300	10,2...11,1
белый	3,90...3,95	19,6...20,9	8,8...10,4	1700...1800	10,4...11,4
хромтитанистый	3,95...4,00	19,6...22,6	10,3...10,8	1750...1850	11,0...12,7
циркониевый	4,05...4,15	22,6...23,5	—	1900...2000	—
Монокорунд	3,94...4,00	22,6...23,5	11,7...13,7	1700...1800	11,4...13,5
Сферокорунд	3,90...3,95	19,6...20,9	1,0...4,0	1700...1800	—
Формокорунд	3,95...4,05	18,9...19,6	—	1250...1300	—

В России известен электрокорунд 8 модификаций: нормальный, белый, хромтитанистый, циркониевый, а также монокорунд, сферокорунд и формокорунд. Карбид кремния изготавливается в двух модификациях: черный и зеленый, каждая модификация имеет от 2 до 4 марок.

В табл. 1.3 приведена сравнительная оценка различных модификаций электрокорунда, свойства которых обусловлены химическим составом и формой зерен.

Две модификации электрокорунда – сферокорунд и формокорунд – выделяются среди других не только химическим составом, но своей формой зерна.

Сферокорунд – это пустотелые сферы неправильной формы с толстой стенкой, для разрушения которых требуется приложить достаточно большое усилие,

чтобы сформировать режущие кромки для съема материала. Он находит применение для шлифования мягких, вязких и специфических материалов – кожи, резины, древесины, пластмасс, цветных металлов. Иногда его используют как порообразователь.

Формокорунд состоит из 80...87 % Al_2O_3 , до 1,5 % Fe_2O_3 и примесей. Изготавливается в виде зерен цилиндрической или призматической формы с размерами 1,2...2,8 мм и длиной 3,8...8,0 мм; применяют его в основном для тяжелых и обдирочных работ.

В табл. 1.4 приведены характеристики абразивных материалов, применяемых фирмой Krebs&Riedel (Германия) и их отечественные аналоги. В ней, в частности, показана новая модификация электрокорунда, которая представляет собой

**1.4. Абразивные материалы, используемые фирмой Krebs&Riedel,
и их отечественные аналоги**

Фирма Krebs&Riedel			Аналоги отечественных абразивов		
Название	Марка	Состав, свойства	Название	Марка	Состав
Нормальный корунд	10A	$Al_2O_3 \sim 95...96 \%$, высокие вязкость и твердость	Нормальный электрокорунд	13A, 14A, 15A, 18A	$Al_2O_3 \sim 93...95 \%$
Корунд повышенной чистоты	15A	$Al_2O_3 \sim 95...96 \%$, меньшая вязкость, высокая режущая способность	—		
Монокорунд	31A	$Al_2O_3 \sim 99 \%$, высокие твердость и вязкость, зерна – в виде монокристаллов	Монокорунд	43A, 44A, 45A	$Al_2O_3 \sim 98,5...99,1 \%$
Сферокорунд	33A	$Al_2O_3 \sim 99 \%$, высокая твердость, в виде полых сфер неправильной формы	Сферокорунд	—	$Al_2O_3 \sim 99\%$
Белый корунд	35A	$Al_2O_3 \sim 99,8 \%$, высокие твердость и хрупкость	Белый электрокорунд	23A, 24A, 25A	$Al_2O_3 \sim 98...99 \%$
Розовый корунд	40A	$Al_2O_3 \sim 99,5\%$, $Cr_2O_3 \sim 0,25\%$, высокие твердость и хрупкость	Хромистый электрокорунд	33A, 34A	$Al_2O_3 \sim 97...98 \%$ $Cr_2O_3 \sim 0,5...2 \%$
Рубиновый корунд	47A	$Al_2O_3 \sim 97,5 \%$, $Cr_2O_3 \sim 2,5 \%$, высокие твердость и вязкость	Хромтитанистый электрокорунд	91A, 92A, 93A, 94A	$Al_2O_3 \sim 97...98 \%$ $Cr_2O_3 \sim 0,5...2 \%$ $TiO_2 \sim 0,75...3 \%$
Микрокристаллический спеченный корунд	70A	$Al_2O_3 \sim 97 \%$, высокая твердость, конгломерат из кристаллов размером 1 мкм	—		
Циркониевый корунд	80A	Чрезвычайно вязкий, острые кромки у зерен, не термостабилен	Циркониевый электрокорунд	38A-3, 38A-4, 38A-5	$Al_2O_3 \sim 67...70 \%$ $ZrO_2 \sim 18...25 \%$
Карбид кремния черный	50C	Высокая твердость и хрупкость	Карбид кремния черный	53C, 54C, 55C	$SiC \sim 97,5...99 \%$
Карбид кремния зеленый	57C	Высокая твердость и хрупкость	Карбид кремния зеленый	63C, 64C	$SiC \sim 98,5...99 \%$

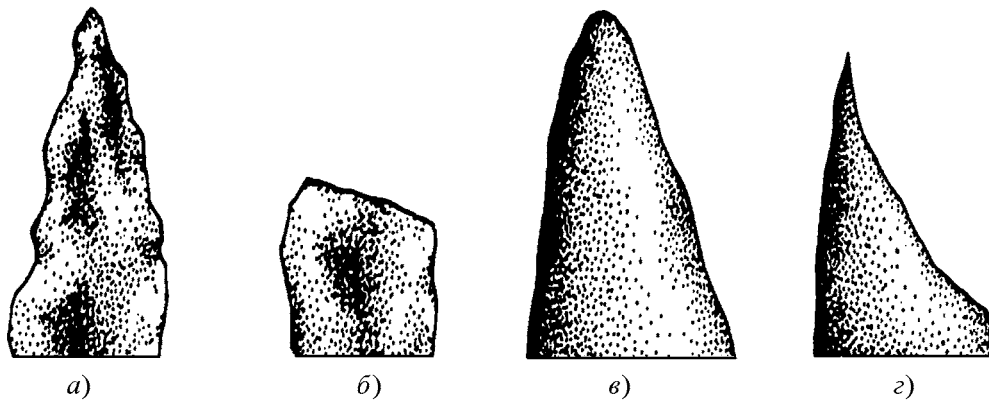


Рис. 1.1. Примеры формы абразивных зерен:

*а и б – зерно электрокорунда соответственно до начала работы и после шлифования;
в и з – зерно SG соответственно до начала работы и после шлифования*

химически модифицированный электрокорунд с микрокристаллическим строением, получаемый по так называемой зольгелиевой (SG) технологии. Всего указанная фирма применяет 43 марки электрокорунда и 10 марок карбида кремния.

По своим физико-механическим свойствам зерно SG (другие названия: микрокристаллический корунд, кубитрон) находится между электрокорундом белым и кубическим нитридом бора. По сравнению с зернами электрокорунда и КНБ, которые имеют размер кристалла свыше 10...50 мкм, размер кристалла SG не превышает 1 мкм, что позволяет зерну работать в режиме самозатачивания путем постоянного обновления новых острых режущих кромок (рис. 1.1). Микрокристаллическое строение зерна SG обеспечивает ему большую прочность – до 3-х раз больше, чем у электрокорунда. Эти положительные свойства позволяют использовать инструмент, изготовленный на основе нового абразивного зерна, на операциях шлифования фасонных поверхностей деталей из закаленных легированных сталей с повышенной твердостью, алю-

миниевых и титановых сплавов и т.д., где необходимо обеспечение высокой размерной стойкости.

Применение микрокристаллического электрокорунда потребовало разработки специальной низкотемпературной керамической связки, спекаемой при температуре 900...950 °С. Кроме того, зерна SG в чистом виде для изготовления шлифовальных кругов не используются, а только в смеси, обычно с зернами электрокорунда белого, с объемным содержанием 30 или 50 % от общего содержания абразива в инструменте. Соответственно, некоторые фирмы дают свое обозначение каждой комбинации абразивной смеси.

При назначении абразивных материалов необходимо учитывать следующее обстоятельство. Производством абразивов в качестве исходного материала для изготовления абразивного инструмента занимается ограниченное число фирм, в отличие от большого числа фирм – производителей инструмента, поэтому зачастую один и тот же абразив в составе инструмента поступает на рынок под разными марками.

В этой связи полезно знать, что нормальный электрокорунд имеет коричневый цвет, корунд повышенной чистоты и микрокристаллический – голубой, белый электрокорунд и монокорунд белого цвета, карбид кремния в соответствии с классификацией – зеленого или черного. Возможны, однако, заметные отклонения не только по цвету, но и по качеству изготовления.

При сравнении, например зерен карбида кремния зеленого размером 500...800 мкм различных производителей, были установлены заметные различия в их морфологических свойствах и термической устойчивости при обжиге, в частности, устойчивости к окислению [38].

В ряде случаев фирмы при изготовлении шлифовальных кругов используют красители для придания продукции фирменного товарного цвета или по технологическим соображениям. Тогда установить визуально марку абразивного материала практически невозможно.

Классификация алмаза как абразивного материала учитывает его происхождение: А – природные, АС – синтетические и АР – синтетические поликристаллические алмазы. К этим обозначениям добавляется для природных алмазов цифровой индекс, соответствующий 0,1 процентного содержания зерен изометрической формы, для синтетических алмазов – цифровой индекс прочности на сжатие, для поликристаллических – дополнительная буква: В – баллас, К – карбонадо, С – спеки.

Эльбор подразделяется на марки в зависимости от вида сырья, способа получения, наличия покрытия на зернах и их прочности: ЛО – обычной механической прочности; ЛП, ЛКВ – повышенной прочности; ЛД – поликристаллический; ЛОМ, ЛОС – с покрытиями. Покрытия на зерна наносятся для повышения их механической прочности (залечивание поверхностных дефектов) и прочности сцепления со связкой инструмента.

Зернистость абразива. Абразивные материалы в соответствии с ГОСТ 3647–80 (в ред. 1994 г.) "Материалы шлифовальные. Классификация. Зернистость и зерновой состав. Методы контроля" рекомендуются называть шлифовальными материалами. Этим же стандартом регламентируется зернистость и зерновой состав выпускаемых в России шлифовальных материалов.

Материалы шлифовальные, кроме алмазных и эльборовых, по размеру зерен разделяются на шлифзерна (2000...160 мкм); шлифпорошки (125...40 мкм); микрошлифпорошки (63...14 мкм); тонкие микрошлифпорошки (10...3 мкм) и особотонкие микропорошки (менее 3 мкм).

Зернистость шлифзерна и шлифпорошка обозначают цифровым индексом, равным 0,1 размера стороны ячейки сита в микрометрах, на котором задерживаются зерна основной фракции. Зернистость микрошлифпорошков обозначают буквенным индексом М и цифровым индексом, равным верхнему пределу размеров зерен основной фракции в микрометрах.

В зависимости от содержания основной фракции – высокое, повышенное, нормальное или допустимое – обозначение зернистости должно дополняться соответственно буквенным индексом В, П, Н или Д.

Европейским стандартом ISO/FDIS 6103 регламентировано применение зернистостей от 4 (самое крупное зерно) до 1200 (самое мелкое зерно).

В Европе рассев шлифовальных материалов производится по разработанным Федерацией Европейских Производителей Абразивов (FEPA) стандарту FEPA 43-D-1984 R 1993 на шлифовальные материалы зернистостей ряда Р для производства шлифовальной шкурки, и стандарту FEPA 42-D-1984 R 1993 на шлифовальные материалы зернистостей ряда F для производства шлифовальных кругов. Вместе с тем, действует международный стандарт ISO 8486-1.2 "Абразивные изделия на связках. Определение и обозначение распределе-

ния частиц по размерам", обозначение зернистостей согласно которому практически соответствует стандарту FEPA 42-D-1984 R 1993.

В работе [8] выполнен анализ соответствия зернистостей абразивных материалов по различным стандартам. При анализе зерновых составов сравнивались размеры абразивных зерен в фракциях и процентное содержание фракций. Установлено, что соответствия зернистостей не могут быть абсолютно точными. Приближенное соответствие зернистостей приведено в табл. 1.5.

Алмаз как абразивный материал выпускается в виде порошков. В зависимости от размера зерен и способа получения алмазные порошки разделяются на шлифпорошки с размерами 3000...40 мкм, микропорошки с размерами 80...1 мкм и субмикропорошки с размерами зерен 1,0...0,1 мкм и менее.

Эльбор как абразивный материал тоже подразделяется в зависимости от размера зерен на шлифзерна с размерами 160...500 мкм, шлифпорошки с размерами зерен 40...120 мкм и микрошлифпорошки с размерами 1...63 мкм.

1.5. Соответствие зернистостей шлифовальных материалов по стандартам ГОСТ, FEPA и ISO

Обозначение зернистостей по стандарту				Размер, мм
ГОСТ 3647-80	FEPA 43-D-1984 R 1993	FEPA 42-D-1984 R 1993	ISO 8486-1.2	
160H	P 12	F 12	F 12	2,0...1,41
—	—	F 14	F 14	1,68...1,19
125H	P 16 (1200)	F 16	F 16	1,41...1,0
100H	P 20 (900)	F 20	F 20	1,19...0,84
—	—	F 22	F 22	—
80H	P 24 (690)	F 24	F 24	0,84...0,60
63H	P 30 (580)	F 30	F 30	0,71...0,50
50H	P 36 (490)	F 36	F 36	0,60...0,42
—	—	F 40	F 40	0,425...0,355
40H	P 40 (380)	F 46	F 46	0,42...0,30
32H	P 50 (310)	F 54	F 54	0,35...0,25
25H	P 60 (240)	F 60	F 60	0,30...0,21
20H	P 80 (180)	F 70	F 70	0,25...0,18
—	—	F 80	—	—
16H	P 100 (145)	F 90	F 80	0,21...0,15
—	—	—	F 90	0,18...0,13
12H	P 120 (110)	F 100	F 100	0,15...0,11
10H	P 150 (90)	F 120	F 120	0,13...0,09
8H	P 180 (73)	F 150	F 150	0,11...0,06
—	—	F 180	—	—
6H	P 220 (60)	F 220	F 180	0,09...0,05

Зернистость алмаза и эльбора обозначается дробью, в числителе которой указано число, равное размеру ячейки сита в мкм, через которую проходят зерна основной преобладающей по массе фракции, а в знаменателе – число, равное размеру ячейки сита, на котором зерна задерживаются. Например, для широкого диапазона зернистостей алмазных шлифпорошков зернистость составляет 63/40...2500/1600, а для узкого диапазона она равно 50/40...2500/2000.

За рубежом зернистость алмаза и кубического нитрида бора обозначают одним числом, равным размеру зерна в мкм, соответствующего размеру отверстия контрольного сита. Перед размером зерна вводится буквенное обозначение: D для алмаза и B для кубического нитрида бора. Обычный диапазон размеров для алмаза составляет D1181–D46, применяются однако и более мелкие зернистости.

Твердость абразивного инструмента. Термин "твердость" применительно к абразивному инструменту является синонимом прочности удержания абразивного зерна связкой. Он не имеет никакой связи ни с твердостью самого абразива, ни с твердостью связки, которая

скрепляет абразивные зерна в объеме инструмента.

В России принята шкала твердостей абразивного инструмента, состоящая в настоящее время из 29 основных степеней твердости: ЧМ1, ЧМ2 – чрезвычайно мягкий; ВМ1, ВМ2 – весьма мягкий; М1, М2 и М3 – мягкий; СМ1, СМ2 – среднемягкий; С1, С2 – средний; СТ1, СТ2 и СТ3 – среднетвердый; Т1, Т2 – твердый; ВТ1, ВТ2 – весьма твердый; ЧТ – чрезвычайно твердый. В этой шкале цифры 1, 2 и 3 характеризуют возрастание твердости абразивного инструмента внутри данной степени.

Для некоторых видов инструмента, например шарошлифовальных кругов, твердость ЧТ подразделяется на девять дополнительных степеней (ЧТ1...ЧТ9), соответствующих определенной объемной массе (2,8...2,96 г/см³), а для инструмента на вулканитовой связке применяются укрупненные степени твердости СМ, С, СТ, Т.

В табл. 1.6 приведено соответствие твердости абразивного инструмента по отечественному и европейскому стандартам. Данные этой таблицы могут быть ориентиром при установлении степени твердости инструмента зарубежных фирм.

1.6. Соответствие твердости абразивного инструмента

Степень твердости	Обозначение	Европейский стандарт ISO/FDIS 6103
Чрезвычайно мягкая	ЧМ1, ЧМ2	A, B, C, D
Весьма мягкая	ВМ1, ВМ2	E, F, G
Мягкая	М1, М2, М3	H, I, J, K
Средняя	СМ1, СМ2, С1, С2, СТ1, СТ2, СТ3	L, M, N, O
Твердая	Т1, Т2	P, Q, R, S
Весьма твердая	ВТ1, ВТ2	T, U, V, W
Чрезвычайно твердая	ЧТ1...ЧТ9	X, Y, Z

**1.7. Твердость абразивного инструмента нормальных структур
и высокопористого инструмента фирмы Carborundum Electrite**

Степень твердости	Глубина лунки, мм, для инструмента нормальных структур с зернистостью		Глубина лунки, мм, для высокопорис- того абразивного инструмента из	
	24...40	46...230	электрокорунда	карбида крем- ния
G	4,8...5,2	5,0...5,4	6,4...7,2	6,9...7,7
H	4,4...4,8	4,6...5,0	5,7...6,39	6,2...6,89
I	4,0...4,4	4,1...4,6	5,1...5,69	5,6...6,19
J	3,7...4,0	3,7...4,1	4,6...5,09	5,2...5,59
K	3,3...3,7	3,3...3,7	4,2...4,59	4,8...5,19
L	2,9...3,3	2,9...3,3	3,8...4,19	4,4...4,79
M	2,5...2,9	2,6...2,9	3,4...3,79	4,0...4,39
N	2,2...2,5	2,2...2,6	3,1...3,39	3,6...3,99
O	1,9...2,2	1,9...2,2	2,8...3,09	3,3...3,59

Для идентификации твердости абразивного инструмента разных производителей важно знать, не к какой степени твердости относится буквенное ее обозначение, а какой метод измерения и его результат соответствует принятой букве твердости.

Измерение твердости абразивного инструмента по ГОСТ 18118–79 (в ред. 1981 г.) для инструмента на керамической, бакелитовой и глифталевой связках из электрокорунда и карбида кремния зернистостью 50 и менее производится пескоструйным методом (по М. Маккензену и К. Цейсу) – разрушением поверхности изделия струей кварцевого песка. Степень твердости определяется по глубине лунки h_d в зависимости от давления струи и зернистости абразива инструмента (рис. 1.2).

Необходимо обратить внимание на то, что в отечественном стандарте твердость инструмента при одной и той же глубине лунки будет зависеть только от зернистости инструмента. Например, при глубине лунки $h_d = 5,6$ мм, полученной

при давлении 0,05 МПа, степень твердости инструмента зернистостью 8...12 будет составлять M1, для зернистости 16...25 равна M2, а для зернистостей 32...40 составляет BM1, т.е. диапазон твердости изменяется от BM1 до M2 или на 3 степени. Только для зернистости круга 12 и мельче степень твердости зависит и от глубины лунки, и от материала абразива – электрокорунда или карбида кремния.

За рубежом для оценки степени твердости абразивного инструмента на жесткой основе используются иные подходы. На фирме Carborundum Electrite (Чехия) для измерения твердости, например, используется аналогичный метод, но обработка ведется струей абразивных зерен. Полученная глубина лунки при давлении 0,05 МПа и соответственно степень твердости обуславливается для абразивного инструмента нормальных структур (до № 10) только зернистостью абразива, а для высокопористого инструмента (структуры 11...13) – только материалом абразивного зерна (табл. 1.7).

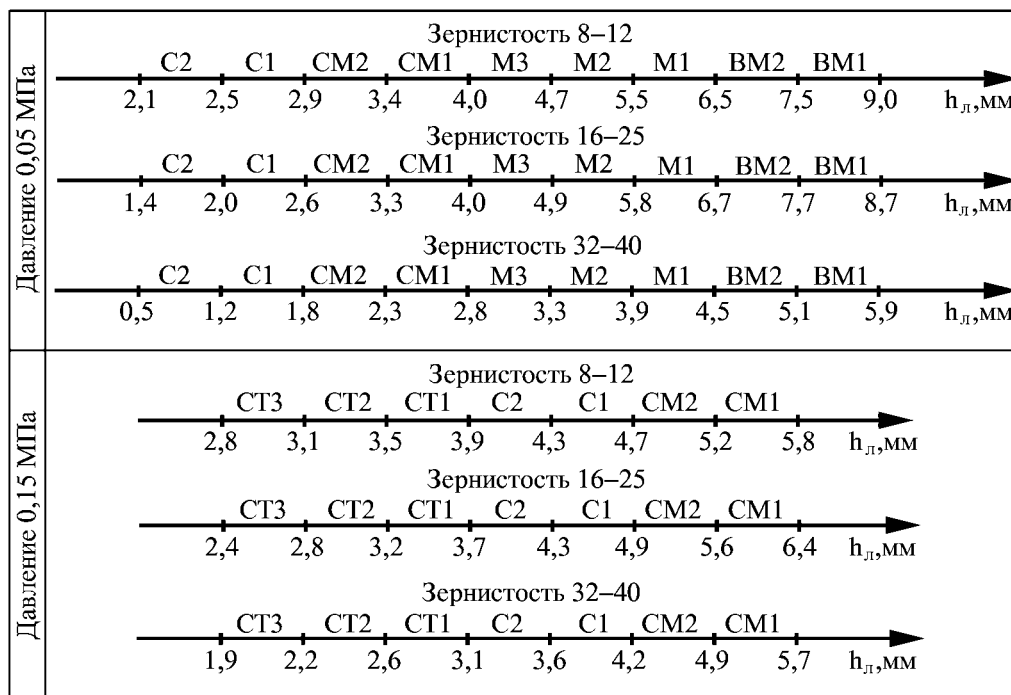


Рис. 1.2. Твердость абразивных кругов из электрокорунд

Анализируя табл. 1.6, 1.7 и рис. 1.2, можно прийти к выводу, что точно установить соответствие между степенями твердости по их буквенной индексации для абразивного инструмента различных производителей практически невозможно. Так соответствие может быть только весьма приближенным и при сравнительной оценке реальной твердости ошибка может составить 1–2 степени.

Известны и используются на практике несколько методов измерения твердости абразивного инструмента. Помимо наиболее распространенного метода контроля песчаной или абразивной струей, это методы накатывания стальным диском (по Линднеру) или диском с подвижными ударными бойками, царапанием резцом (по Опицу–Пекленику) или сверлением с постоянным усилием. В методе контроля ударом резца (по Фупсу–Пошу) вращаю-

щийся резец многократными ударами выбивает на поверхности шлифовального круга лунку, глубина которой становится мерой его твердости.

Описанные методы имеют общий недостаток: они разрушают поверхность инструмента, утоняют его и иногда весьма заметно. Например, для шлифовальных кругов твердостью BM1 или BM2 глубина лунки может достигать 9 мм, а для более мягких – глубже. Наличие глубоких лунок сказывается на товарном виде инструмента, но главное – увеличивает неуравновешенность массы и снижает его разрывную прочность.

В качестве косвенного неразрушающего метода контроля твердости круга может быть использована компьютерная томография, основанная на рентгеновском методе количественной оценки плотности в локальных зонах объема инструмента по

1.8. Соотношения между звуковым индексом, скоростью распространения звука и твердостью абразивного инструмента

Степень твердости	Звуковой индекс ЗИ	Интервал значений C_l , м/с
BM1	27; 29	2600...2800; 2800...3000
BM2	31; 33	3000...3200; 3200...3400
M1	35; 37	3400...3600; 3600...3800
M2	39; 41	3800...4000; 4000...4200
M3	41; 43	4000...4200; 4200...4400
CM1	45; 47	4400...4600; 4600...4800
CM2	49	4800...5000
C1	51	5000...5200
C2	53	5200...5400

рассеянию рентгеновского излучения [140]. Ее достоинством является возможность оценки объемного распределения плотности абразивной массы и, соответственно, твердости.

Универсальным, простым в употреблении и неразрушающим методом контроля твердости является измерение модуля упругости шлифовального круга. При этом методе в испытываемом круге ударом возбуждают акустические волны, по частоте собственных колебаний которого специальным расчетом вычисляют модуль упругости или скорость распространения акустических волн в инструменте. В основе метода лежит связь между структурным состоянием абразивного инструмента и условиями его изготовления с модулем упругости E и плотностью γ_a через параметр

$$C_l = \sqrt{\frac{E}{\gamma_a}}, \quad (1.1)$$

который представляет собой скорость распространения упругих продольных колебаний (акустических волн) в инструменте.

Нормирование параметра C_l по (1.1) осуществляется через так называемые звуковые индексы (ЗИ), которые представляют собой условную величину в ви-

де целого числа, равную среднему арифметическому значению начала и конца определенных интервалов C_l , уменьшенному в 100 раз. Установленная шкала значений звуковых индексов от 19 до 75 позволяет характеризовать все основные виды абразивных инструментов на всех типах связок на всем диапазоне твердостей.

В соответствии с ГОСТ 25961-83 (в ред. 1990 г.) "Инструмент абразивный. Акустический метод контроля физико-механических свойств" приборами типа "Звук" и расчетом определяется скорость распространения акустических волн C_l в шлифовальном круге, которая через частоту собственных колебаний изделия и коэффициент его формы приводится к величине ЗИ (табл. 1.8).

В табл. 1.8 показана связь между ЗИ и скоростью распространения акустических волн C_l , а также со степенью твердости абразивного инструмента из нормального и белого электрокорундов на керамической связке.

Особенностью акустического метода является измерение только интегральной твердости в объеме инструмента, по которой нельзя судить о стабильности физико-механических свойств в различных точках его объема. Такая нестабильность присуща для абразивного инструмента, она оп-

ределяет качество его изготовления и очень сильно влияет на процесс шлифования, особенно при прецизионной обработке. Поэтому для ее оценки дополнительно применяются методы локального измерения твердости.

Твердость является наиболее чувствительным параметром характеристики абразивного инструмента, особенно шлифовальных кругов, который определяет его режущую способность. На ответственных операциях обработки, например, при профильном глубинном шлифовании замков турбинных лопаток из жаропрочных никелевых сплавов высокопористыми кругами требования по твердости ужесточаются вплоть до конкретной величины звукового индекса (например, назначается ЗИ 31 или ЗИ 35 вместо ВМ2).

При столь жестком ограничении возможного интервала твердости при назначении характеристики шлифовального круга необходимо знать и учитывать особенности технологии его изготовления. В силу различных причин, в основном случайного характера, изготовление абразивного инструмента заданной степени твердости в серийном производстве является достаточно сложной проблемой и не всегда этого удается достигнуть. Если же ставится задача обеспечить $\frac{1}{2}$ или $\frac{1}{4}$ интервала степени твердости, то ее выполнение для всей партии шлифовальных кругов неосуществимо. Например, если для круга зернистостью 12 твердость ВМ2 соответствует глубине лунки от 6,5 до 7,5 мм (см. рис. 1.2), то для звукового индекса ЗИ 31 этот диапазон h_d изменения глубины лунки составляет лишь 6,5...6,75 мм. Только часть инструмента, как показывает практика, заформованных на заданную характеристику, от общей партии шлифовальных кругов будет соответствовать этому требованию, что естественно скажется на их стоимости.

Поэтому при назначении твердости шлифовальных кругов необходимо учитывать не только требования операции шлифования, но и специфику абразивного

производства. Обычно жесткая регламентация твердости по звуковому индексу используется при назначении характеристики высокопористых крупногабаритных шлифовальных кругов, зернистостью 10...25 с твердостью в диапазоне от ВМ1 до М2, при изготовлении которых велика вероятность брака.

Структура абразивного инструмента. Термин "структура абразивного инструмента" имеет специфическое значение. В отличие от общепринятого понятия, он не означает собственно внутреннего строения изделия. По ГОСТ 21445–84 "Материалы и инструменты абразивные. Термины и определения" структура – это соотношение объемов шлифовального материала, связки и пор в абразивном инструменте.

В абразивном инструменте на любой связке имеются поры, причем в инструменте на керамической и бакелитовой связках поры занимают объем больший, чем в инструменте на вулканитовой и металлической связках. Регулируемая пористость необходима абразивному инструменту, так как чем больше суммарный объем пор и чем крупнее сами поры, тем эффективнее удаляется стружка при резании, лучше охлаждение места контакта инструмента и детали, быстрее идет самозатачивание инструмента и легче шлифование, особенно труднообрабатываемых материалов. В то же время инструмент с высоким содержанием пор менее прочен и подвергается большему изнашиванию, чем инструмент более плотный, монолитный. Следовательно, абразивный инструмент для каждой конкретной операции шлифования должен иметь строго заданную структуру.

Еще в 1920 г. фирмой Norton было предложено понятие "структурные круги", а шлифовальные круги по объемному содержанию абразива были классифицированы по 13 номерам структуры: с плотной структурой (0...4), средней (5...8) и открытой структурой (9...12). До настоящего времени эта классификация содер-

жится в стандартах и используется при анализе объемного строения абразивного инструмента.

В России абразивный инструмент по структуре разделяют на 12 групп от 1 до 12. Чем выше номер, тем меньше в объеме инструмента абразивных зерен, больше связки и пор при одинаковой твердости. Структуры 1...4 относят к закрытым (плотным), структуры 5...8 к средним или нормальным, структуры 9...12 – к открытым или высокопористым. Для структуры 1 объемное содержание абразива в инструменте составляет 62 %, для каждого последующего номера структуры объем зерна уменьшается на 2 %. Для структуры 12 объемное содержание абразивного зерна в инструменте равно 38 %. Номер структуры принято обозначать буквой N . Между номером структуры N и объемной концентрацией зерна V_z в инструменте существует связь:

$$N = 0,5(62 - V_z). \quad (1.2)$$

По европейскому стандарту ISO/FDIS 6103 приняты номера структуры для абразивного инструмента от 0 до 14, т.е. всего 15 групп. Номер структуры также рассчитывается по (1.2).

Более подробно структура шлифовальных кругов и ее связь с пористостью рассмотрена ниже.

Связка абразивных инструментов.

Обычно считается, что роль связки в абразивном инструменте заключается в скреплении зерен в объемную структуру, обеспечивая их удержание до момента достижения критической степени изнашивания. При этом обеспечивается эффект самозатачивания рабочей поверхности инструмента с равномерным и постоянным ее обновлением в процессе абразивной обработки за счет непрерывного появления новых режущих кромок.

Однако это только часть функционального назначения связки. По своему значению она является наиболее важной структурной составляющей не только объемного строения, но и технологиче-

ских, и эксплуатационных свойств инструмента. Именно связка обеспечивает целостность конструктивного оформления отдельных абразивных зерен в инструменте с заданными физико-механическими и режущими свойствами, определяя его конкурентоспособность на мировом рынке.

Несмотря на относительно небольшое содержание связки в шлифовальных кругах, в среднем от 4 до 20 % объема, она влияет, например, на:

- технологичность изготовления абразивного инструмента на всех стадиях от смешивания до формообразования механической обработкой;
- распределение зерен в объеме инструмента;
- прочность удержания зерен и режущие свойства;
- прочность инструмента в целом и соответственно его рабочую скорость;
- теплофизические свойства инструмента: теплопроводность, теплостойкость, тепловое расширение, сопротивление термическому удару и др.;
- сопротивление воздействию активных химических веществ, содержащихся в смазочно-охлаждающих жидкостях;
- демпфирующие свойства рабочей поверхности и инструмента в целом;
- форму, размеры и характер распределения пор;
- экологичность изготовления абразивного инструмента;
- экономичность изготовления инструмента в зависимости от температурного режима его спекания и обрабатываемости резанием при формообразовании.

Чтобы выполнять указанные требования, связка должна обладать комплексом разнообразных свойств, которые одним составом достигнуть невозможно. По этой причине в производстве абразивного инструмента используется большой набор типов и марок связок, предназначенных для конкретных условий применения.

1.9. Химический состав, потери при прокаливании и огнеупорность керамических связок

Марка связки	Химический состав, %							Потери при про- калива- нии, не более, %	Огнеупор- ность, °С
	SiO ₂ , в преде- лах	Al ₂ O ₃ , в пре- делах	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	R ₂ O, в пре- делах	K ₂ O/ Na ₂ O, не ме- нее		
			не более						
K1	61...66	14...20	5,0	1,0	3,0	8...10	1,0	5,0	1160...1200
K2	52...56	35...38	1,0	1,5	1,0	—	—	—	780...800
K3	60...55	19...24	1,0	1,0	1,5	7...8	1,0	7,0	1400...1450
K4	58...64	17...21	1,5	1,0	2,0	5...6	1,0	7,0	1200...1250
K5	60...66	14...17	1,5	1,0	4,0	5...6	1,0	7,0	1120...1160
K6	60...65	16...20	1,0	1,0	2,0	12...15	1,0	6,5	1200...1230
K8	55...60	20...25	1,0	1,0	5,0	4...5	1,0	7,0	1250...1280

Примечание. В связках K4 и K5 дополнительно содержится В₂O₃ в количествах 4...6 % и 5...6 % соответственно, а в связке K6 – 3 % BaO.

Основными связующими материалами для шлифовальных кругов являются связки керамические, магнезиальные (магнезитовые), силикатные, бакелитовые, металлические, вулканитовые и пластиковые (пластические).

Почти в 80 % всех шлифовальных кругов используется керамическая связка. В отечественной промышленности применяют несколько видов керамических связок: для инструмента из электрокорундовых материалов – K1, K2, K4, K5, K6, K8, K43, для инструментов из карбидокремниевых материалов – K3, K10; для изготовления абразивного инструмента зернистостью 50...16 используют керамические связки с размерами частиц не более 80 мкм; для мелкозернистого абразивного инструмента (зернистостью 12 и менее) – связки с размерами частиц не более 50 мкм. В табл. 1.9 приведены химический состав и огнеупорность некоторых наиболее распространенных керамических связок.

Связки можно классифицировать на *высокотемпературные спекающиеся* (K3,

K8); *низкотемпературные полуспекающиеся* (K1, K2), применяемые для некоторых видов инструмента из белого электрокорунда; *плавящиеся на основе борного стекла* (K4 и K5), обеспечивающие наиболее эффективное связывание белого и нормального электрокорундов; *на основе бариевого стекла* (K6) для инструмента, изготовленного из легированного электрокорунда. Известна также плавящаяся связка *на основе литийсодержащего борного стекла* с добавкой фтористых соединений (K43), обеспечивающих высокую прочность кругов, предназначенных для работы со скоростью 80 м/с и более.

Шлифовальные круги *на керамической связке* влажно- и температуроустойчивы, но отличаются хрупкостью и не допускают работу с ударными нагрузками. Благодаря хрупкости керамической связки абразивные зерна, достигшие некоторого критического значения износа, при очередном рабочем цикле выламываются из инструмента, обнажая лежащие ниже абразивные зерна и, тем самым, обеспечивая самозатачивание в процессе шлифования.

Шлифование кругами на *керамической связке* ведется, как правило, с применением охлаждающих жидкостей.

Обычно у каждой зарубежной фирмы есть свой набор оригинальных связок, предназначенных для конкретных технологических условий шлифования. Фирма Bay State Abrasives (Бельгия), например, имеет 17 специализированных керамических связок со своими обозначениями: для кругов из оксида алюминия и карбида кремния, для заточки режущего инструмента, для профильного шлифования, для инструмента из кубического нитрида бора, для высокоскоростных кругов, а также керамические связки для изготовления сегментов, инструмента из микрокристаллического корунда, шлифования коленчатых валов, хонингования и т.д.

В ограниченных объемах используют связки магнезиальные и силикатные. Инструмент на этих связках применяется в основном для чистовой обработки труднообрабатываемой вязкой стали в тех случаях, когда требуется высокая самозатачиваемость инструмента и низкая шероховатость обрабатываемой поверхности. *Магнезиальная связка* – это цемент, твердеющий на воздухе за счет взаимодействия каустического магнезита и хлористого магния с водой.

Силикатная связка в своей основе содержит растворимое стекло (силикат натрия), которое, будучи смешанным с активными наполнителями, в качестве которых применяются карбонаты, глина, полевои шпат и сами абразивные материалы, образует прочные камневидные массы.

Металлические связки – это порошки химически чистых легкоплавких металлов ($t_{пл} < 900\text{ }^{\circ}\text{C}$) либо смесей металлов и сплавов. В основном они используются в производстве инструмента из сверхтвердых материалов (СТМ), так как высокая механическая прочность этих связок и незначительная пористость не позволяют применять их с другими, менее твердыми, абразивными материалами вследствие

того, что в этом случае инструмент не самозатачивается.

Различают два основных вида металлических связок – *порошковые* и *гальванические*. Порошковые металлические связки получают спеканием порошков из медных и алюминиевых сплавов. Связки на основе бронз имеют обозначение М1. Связки на основе алюминий-цинковых сплавов имеют общее обозначение М5 и подразделяются на связки ТМ2, МО13 и МВ1. Гальванические связки выполняются на никелевой основе методом гальванического закрепления зерен на металлическом корпусе.

Характерной особенностью металлических связок являются их высокая механическая прочность и незначительная пористость. Связка охватывает зерна практически со всех сторон и надежно удерживает их в монолите, что, несмотря на значительный износ, препятствует самозатачиванию круга.

Алмазные и эльборовые круги на металлической связке применяются для предварительного и чистового шлифования твердых и хрупких материалов, а также для заточки поверхностей лезвий режущих инструментов. Удельный расход алмазных зерен и износ режущей поверхности алмазных кругов на металлической связке меньше, чем кругов на бакелитовой связке. Металлические связки теплопроводны и быстро нагреваются по всему объему круга до высоких температур. Поэтому шлифование алмазными кругами на металлических связках ведется с обязательным применением охлаждающих жидкостей.

Абразивный инструмент на бакелитовой связке предназначен для операций обдирочного шлифования, т.е. таких видов абразивной обработки, при которых снимается много металла в единицу времени. В качестве основы связки, как это видно из названия, применяется бакелит в виде порошков (смеси новолачной смолы с уротропином) или жидкости (жидкая резольная смола).

Бакелитовые связки придают шлифовальным кругам прочность и эластичность. При нагреве до температуры выше 200 °С бакелитовые связки становятся хрупкими и шлифовальные круги быстро изнашиваются. При продолжительном воздействии температур порядка 250...300 °С бакелитовая связка выгорает. Кроме того, разрушающее действие на нее оказывают щелочные растворы, и поэтому вода, применяемая для охлаждения, не должна содержать более 1,5 % соды.

Шлифовальные круги, в том числе и, алмазные, изготовленные на бакелитовой связке, обладают хорошими режущими свойствами и способны обрабатывать материалы с малыми силами резания. Используя это свойство, а также малую длительность рабочих циклов, алмазными и эльборовыми кругами на бакелитовой связке можно затачивать лезвия режущих инструментов без применения охлаждающих жидкостей.

Мелкозернистые шлифовальные круги, содержащие зерна из электрокорундов и карбида кремния и изготовленные на бакелитовой связке, применяют для чистового и доводочного шлифования чугунов, сталей и цветных металлов. Шлифовальные круги на бакелитовой связке БЗ применяют для шлифования резьб и резки прутков.

Шлифовальные круги на бакелитовой связке устойчивы к влаге и маслам, имеют значительно большую ударную вязкость и прочность на сжатие, чем круги на керамической связке.

Вулканитовая связка – это вид резины, т.е. провулканизированная смесь каучука с серой, с ускорителями вулканизации и наполнителями, вводимыми для повышения прочности и жесткости изделий. Для регулирования формовочных свойств смеси в нее вводятся мягчители.

Вулканитовая связка, прочно удерживая зерна, но, будучи в то же время эластичной, в процессе шлифования деформируется, и самозатачивание идет не

столь интенсивно, как это требуется для эффективной обработки. Отсюда повышенный полирующий эффект этого вида инструмента, но производительность шлифования при этом снижается. В отличие от инструмента на других связках, инструмент на вулканитовой связке содержит на 10...20 % шлифовального материала больше, а пористость его соответственно ниже.

Вулканитовые связки в зависимости от содержания компонентов выпускаются нескольких марок – В1, В2 и В3. Теплоустойчивость каучука низкая (150...180 °С), и это ограничивает режимы шлифования и требует применения жидкостей для охлаждения. Вместе с тем, вулканитовая связка придает шлифовальным кругам большую эластичность и способность, изгибаясь, выдерживать без разрушения боковые нагрузки. Эти качества вулканитовой связки позволяют изготавливать тонкостенные шлифовальные круги, в частности, дисковой формы, применяемые для шлифования узких криволинейных пазов в деталях и инструментах. Шлифовальные круги на связке В2 позволяют шлифовать резьбы с малым шагом. В процессе шлифования часть каучука выгорает, распространяя запах горелой резины.

Глифталевою связку получают на основе синтетической смолы из глицерина и фталевого ангидрида. Шлифовальные круги с мелким зерном на глифталевою связке применяют при отделочном шлифовании закаленных сталей.

Преимуществом *пластиковых связок* является нечувствительность к ударам. Их диапазон применения специфичен: снятие заусенцев, зачистка, разрезание, с одной стороны, и шлифование до высокой степени чистоты поверхности, с другой стороны.

В табл. 1.10 приведены некоторые физико-механические свойства основных связок абразивного инструмента.

Анализируя данные табл. 1.10, можно легко установить преимущества каж-

1.10. Физико-механические свойства связок

Физико-механические свойства	Связка		
	Керамическая	Вулканитовая	Бакелитовая
Предел прочности, МПа:			
на растяжение	30...50	46	30...35
на сжатие	70...90	70...85	150
на изгиб	45...60	80...100	60
Ударная вязкость, МДж/м ²	0,12...0,5	1...1,5	0,5...0,6
Модуль упругости, ГПа	50...85	1...4	4...10
Температура размягчения, °С	500...700	80...100	100...120
Плотность, г/см ³	2,2...2,8	1,0...1,4	1,2...1,4

дого вида связки для конкретных условий абразивной обработки. Отметим только, что высокопористые шлифовальные круги изготавливают в основном на керамических связках.

Европейским стандартом ISO/FDIS 6103 предусмотрены следующие типы связок и их обозначения: V – керамическая, R – вулканитовая, RF – вулканитовая с сеткой, B – твердотельная органическая (бакелитовая), BF – бакелитовая с сеткой, E – силиконовая (силикатная), MG – магнезитовая и PL – пластическая (пластиковая).

В маркировках шлифовальных кругов зарубежные фирмы, как правило, придерживаются приведенных обозначений типов связки с указанием собственных обозначений их модификаций.

При выборе связки следует принимать во внимание характер связки (хрупкий, стабилизирующий, вязкотвердый), структуру круга, определяемую требованиями обработки, геометрическую форму круга, а также нагрузку на круг центробежной силой и силой резания. Хрупкие керамические связки обеспечивают тон-

кий срез, эффект самозатачивания и небольшие силы резания. Этому, однако, противостоит повышенный износ и слабая способность сохранять необходимую форму рабочей поверхности инструмента. Вязкотвердая керамическая связка дольше удерживает зерно, способствуя режиму изнашивания инструмента в виде затупления зерен с развитием больших сил резания и более высоких термических нагрузок на деталь. Режим затупления можно нейтрализовать повышением производительности резания, а также целенаправленным выбором абразива, зернистости и структуры круга.

Неуравновешенность массы шлифовальных кругов. Шлифовальные круги как тела вращения обладают неуравновешенностью. ГОСТ 3060–86 "Круги шлифовальные. Допустимые неуравновешенные массы и метод их измерения" в зависимости от значения допустимых неуравновешенных масс устанавливает четыре класса неуравновешенности шлифовальных кругов. 1-му классу соответствует минимальная неуравновешенность масс, для 4-го – максимально возможное ее зна-

чение. Значение неуравновешенности масс тем больше, чем больше габаритные размеры инструмента. Для шлифовальных кругов 9-й структуры и выше ее регламентируемое значение меньше, чем для кругов нормальной структуры (№ 8 и меньше).

По мнению автора, такой подход неудачен, так как он не учитывает многообразие возможных свойств инструмента одного и того же типоразмера. Например, при увеличении степени твердости от BM2 до C1 инструмента на керамической связке его масса возрастает до 22 %, а при возрастании номера структуры от 9 до 20 масса уменьшается до 60 %.

В зарубежных фирмах по значению неуравновешенности масс обычно идет отбраковка шлифовальных кругов в соответствии с их массой. Значение неуравновешенности не должно превышать 2...4 % массы круга.

Неуравновешенность масс или дисбаланс по определению – это произведение массы на расстояние от ее центра до центра, относительно которого она вращается. Применительно к вращающимся дискам дисбаланс определяется как произведение массы диска (шлифовального круга) на расстояние между центром массы и осью отверстия круга. Измеряемый на практике дисбаланс представляет собой трансформированную величину, которая привязана к размерам шлифовального круга.

По стандарту ISO/FDIS 6103 "Абразивная продукция на связках. Допустимый дисбаланс шлифовальных кругов. Испытания" измеренный дисбаланс – это произведение некоторой условной массы m_a , расположенной на периферии шлифовального круга, на его радиус.

Допустимая неуравновешенность масс рассчитывается через массу шлифовального круга m :

$$m_a = k\sqrt{m},$$

где k – коэффициент, учитывающий условия шлифования.

По европейскому стандарту ISO/FDIS 6103 неуравновешенность масс шлифовальных кругов регламентирована в зависимости от массы инструмента, а также учитывает способ шлифования, тип станка и инструмента, его размеры и рабочую скорость.

В зависимости от требований к эксплуатации шлифовального круга, его допустимый дисбаланс может назначаться в достаточно широком диапазоне – до 5 раз для одного и того же типоразмера инструмента. Для условий прецизионного шлифования и для скоростей резания 63...100 м/с допустимый дисбаланс по ISO/FDIS 6103 соответствует 1 классу неуравновешенности масс по ГОСТ 3060–86.

Рабочая скорость круга. Эта характеристика в настоящее время является основным критерием технического уровня того или иного абразивного производства. В большинстве своем скорости шлифования в производственных условиях составляют 20...50 м/с. Современные технологии изготовления обеспечивают уровень рабочих скоростей до 100...120 м/с абразивными кругами на керамических связках и до 200...250 м/с инструментом на металлических связках.

С увеличением скорости шлифования пропорционально возрастает производительность процесса съема материала, снижается термодинамическая напряженность и улучшается качество обработки. Поэтому повышение скоростей резания является ведущей тенденцией прогресса технологии машиностроения.

Чтобы полностью использовать потенциал шлифовальных кругов как режущего инструмента на больших скоростях обработки, полезно знать не только особенности их эксплуатации, но и изготовления. Рабочая скорость шлифовального круга, функционально связанная с его разрывной скоростью, определяется как его характеристикой, так и конструктивным использованием.

В работе [93] приведена формула критической разрывной скорости для

шлифовальных кругов на керамических связках

$$v_p = \sqrt{\frac{3g\sigma_p}{2\gamma(1+k+k^2)}}, \quad (1.3)$$

которая зависит от предела прочности круга на разрыв σ_p , его плотности γ и соотношения k диаметров отверстия d и наружного диаметра D ($k = \frac{d}{D}$); g – ускорение свободного падения.

В соответствии с формулой (1.3) влияние физико-механических свойств шлифовального круга на его разрывную скорость проявляется через прочность σ_p и плотность γ инструмента.

Прочность круга определяется прочностью материалов зерен и связки, прочностью их соединения, структурой, а также внутренними дефектами и напряжениями, которые возникают в процессе изготовления инструмента при его формовании, сушке и обжиге.

С уменьшением зернистости и номера структуры, а также с увеличением степени твердости разрывная скорость круга повышается. При изменении зернистости от 50 до 10, твердости от BM2 до CT1 разрывная скорость шлифовальных кругов на керамических связках может изменяться до 2 раз, причем самыми чувствительными к таким изменениям являются круги с более крупным зерном и наиболее мягкие.

Поскольку абразивные зерна и связка разнородные материалы, обладающие различными коэффициентами объемного расширения, то при высокотемпературном обжиге они расширяются и сжимаются по-разному. Это приводит к возникновению внутренних остаточных напряжений в абразивном инструменте. Их уровень зависит не только от материала зерна, но и их формы, объемной концентрации, характера физико-химического взаимодействия со связкой и др.

Установлено, что разрушение шлифовальных кругов начинается от отвер-

стия, и причиной этого является центробежная сила, а не сила резания при шлифовании. В результате действия центробежной силы у отверстия круга максимальное тангенциальное напряжение становится больше, чем максимальное радиальное напряжение, что приводит к зарождению и распространению трещины.

Из (1.3) следует, что чем меньше диаметр отверстия d и соответственно значение коэффициента k , тем больше разрывная скорость круга. На практике, однако, варьировать диаметром отверстия не всегда удается, да и эффект от этого обычно не превышает 10...20 %.

Если использовать стандартную конфигурацию шлифовального круга, то максимальную рабочую его скорость можно обеспечить характеристикой с минимальной зернистостью, изометричной формой зерен и их однородным гранулометрическим составом, повышенной степенью твердости и с минимальным номером структуры. В противном случае необходимы конструктивные изменения, наиболее распространенными из которых для кругов с рабочей скоростью 70...80 м/с и выше являются следующие:

- применение высокопрочных связок (керамических – на основе литийборфторсодержащих стекол или с добавлением специального связующего – фритты; бакелитовых – на основе связующих терморезистивных смол) дает повышение v_p до 20 %;

- упрочнение центральной части кругов различными методами – до 10...25 %;

- изготовление шлифовальных кругов без посадочного отверстия – до 40 %.

Упрочнение центральной части кругов или посадочного отверстия практикуется путем:

- изготовления составных кругов с высокоплотной и мелкозернистой структурой вокруг отверстия;

- импрегнирования зоны вокруг отверстия прочными термопластичными составами, эпоксидной смолой, клеями и т.д.;

- запрессовывания упрочняющих втулок;
- создания кругов переменной высоты с утолщением у посадочного отверстия.

В соответствии с ГОСТ 2424–83 (ред. 2005 г.) "Круги шлифовальные. Технические условия" для кругов прямого профиля утвержден следующий ряд рабочих скоростей, м/с:

30 – 35 – 40 – 50 – 60 – 80.

Для других типов кругов предельная скорость шлифовальных кругов меньше.

По ГОСТ 12.3.028–82 (в ред. 2001 г.) "Процессы обработки абразивным и электроабразивным инструментом. Требования безопасности" испытательная скорость шлифовальных кругов на керамической связке должна быть в 1,5 раза больше, чем рабочая скорость инструмента (при v_r до 80 м/с) и в 1,4 раза больше при рабочей скорости в диапазоне свыше 80 до 120 м/с.

Стандартом ISO/FDIS 6103 утвержден следующий ряд максимальных рабочих скоростей для абразивного инструмента (по маркировке), м/с:

<16 – 16 – 20 – 25 – 32 – 35 – 40 – 50 –
– 63 – 80 – 100 – 125 – 140 – 160.

Этим же стандартом приняты конкретные требования для производителей инструмента возможной разрывной скорости шлифовальных кругов с точки зрения безопасности их работы за счет увеличения фактора безопасности до 3–3,5 в зависимости от условий шлифования (табл. 1.11).

Фактор или коэффициент безопасности S определяется как квадрат отношения минимальной скорости круга перед разрушением v_{br} к его максимальной рабочей скорости $v_{кр}$:

$$S = \left(\frac{v_{br}}{v_{кр}} \right)^2. \quad (1.4)$$

При тестировании шлифовальных кругов перед их эксплуатацией стандарт

ISO/FDIS 6103 рекомендует для потребителя скоростной тестовый фактор f_{pr} в зависимости от коэффициента безопасности S (табл. 1.12).

В формуле (1.4) и табл. 1.11 и 1.12 приведены данные и обозначения в соответствии с европейским стандартом ISO/FDIS 6103.

Точность формы и размеров. Предельные отклонения размеров шлифовальных кругов характеризуют его геометрическую точность. По ГОСТ 2424–83 (в ред. 2005 г.) регламентируются предельные отклонения следующих параметров кругов: наружного диаметра D , высоты H , диаметра посадочного отверстия d , отклонение от параллельности, выпуклость, вогнутость торцовых поверхностей, овальность и конусообразность наружной поверхности, смещение оси отверстия от геометрической. Качество абразивного инструмента определяют также наличие различных дефектов: трещин, раковин, повреждение и скругление кромок, инородные включения.

Круги изготавливают трех классов точности: АА, А и Б. Круги класса АА изготавливают из зерна с высоким содержанием основной фракции (с индексом В и П), они не имеют дефектов, кроме инородных включений, которые допускаются размером не более 0,5 мм в количестве не более четырех на участке круга в 100 см², и имеют жесткие предельные отклонения размеров.

В зависимости от класса точности кругов класс неуравновешенности по ГОСТ 3060–86 должен быть I для кругов класса АА, I и II – для класса А, I–III – для класса Б. Для кругов класса АА не допускается отклонение твердости от номинальной, в то же время, например, для кругов класса Б допускается отклонение твердости ± 1 степень.

Технические требования к фасонным, угловым кругам и комплектам кругов предусматривают их изготовление в прецизионном исполнении. При этом разность наружных диаметров инструментов,

1.11. Максимальная рабочая скорость, коэффициент безопасности и минимальная скорость перед разрушением для шлифовальных кругов при различных условиях обработки

Условия шлифования	Максимальная рабочая скорость $v_{кр}$, м/с	Коэффициент безопасности S	Минимальная скорость перед разрушением $v_{бр}$, м/с
Механическая обработка с полукоткрытой зоной шлифования	< 16	3	—
	16	3	28
	20	3	35
	25	3	43
	32	3	55
	35	3	61
	40	3	69
	50	3	87
	63	3	109
	80	3	139
Механическая обработка с закрытой зоной шлифования	40	1,75	53
	50	1,75	66
	63	1,75	83
	80	1,75	106
	100	1,75	132
	125	1,75	165
	140	1,75	185
	160	1,75	212
Шлифование с большими давлениями на круг, полукоткрытая зона обработки	63	3,5	118
	80	3,5	150
Шлифование с большими давлениями на круг, закрытая зона обработки	63	3	109
	80	3	139
	100	3	173

1.12. Скорости испытания шлифовальных кругов на безопасность

Коэффициент безопасности 1,75–2			Коэффициент безопасности 3–3,5		
Максимальная рабочая скорость $v_{кр}$, м/с	Фактор тестовой скорости f_{pr}	Скорость испытания $v_{пр}$, м/с	Максимальная рабочая скорость $v_{кр}$, м/с	Фактор тестовой скорости f_{pr}	Скорость испытания $v_{пр}$, м/с
35	1,1	39	< 16	–	–
40	1,1	44	16	1,3	21
50	1,1	55	20	1,3	26
63	1,1	70	25	1,3	33
80	1,1	88	32	1,3	42
100	1,1	110	35	1,3	46
125	1,1	138	40	1,3	52
140	1,1	154	50	1,3	65
160	1,1	176	63	1,2	76
			80	1,1	88
			100	1,1	110
			125	1,1	138

входящих в один комплект, не должна отличаться от разности их номинальных диаметров более чем на 1,0 мм, а допуск на отклонение высоты круга не должен превышать более $\pm 0,1$ мм. Комплексное отклонение элементов рабочего профиля фасонных и многовершинных угловых кругов от их теоретического профиля не должно быть более 1,0 мм в любой точке профиля.

Предельные отклонения линейных размеров профиля одновершинных угловых кругов в зависимости от их диаметра должны находиться в пределах $\pm 0,1 \dots 0,3$ мм. Предельные отклонения угловых размеров для рабочей части кругов, имеющих одну вершину, должны быть не более $+1^\circ$, для многовершинных кругов – оговариваются чертежами.

Прецизионный абразивный инструмент выпускается не ниже класса I не-

уравновешенности, он должен иметь высокую степень равномерности твердости и полное соответствие номинальной замаркированной характеристике.

Основными эксплуатационными характеристиками инструмента, которые выявляются в процессе шлифования, являются: режущая способность абразивного инструмента – отношение массы или объема снятого обрабатываемого материала к длительности обработки при заданных условиях; расход абразивного инструмента – отношение массы или объема израсходованного рабочего слоя абразивного инструмента к длительности обработки; коэффициент шлифования или удельная производительность – отношение массы снятого обрабатываемого материала к массе израсходованного рабочего слоя абразивного инструмента; стойкость абразивного инструмента – машин-

ное время работы абразивного инструмента с момента установки на станок нового или прошедшего правку инструмента, в течение которого он сохраняет заданные свойства. Указанные эксплуатационные показатели позволяют иметь сопоставимые данные по эксплуатационным свойствам различных видов инструмента, применяемых на различных операциях обработки.

Эксплуатационные показатели оцениваются по стойкости круга до полного изнашивания рабочей части в штуках обработанных деталей или в килограммах снятого материала, производительности по съему металла при обработке (кг/ч), стойкости круга между правками во времени или в количестве обработанных деталей, шероховатости обработанной поверхности и гарантируются для данной конкретной операции при соблюдении рекомендованных режимов технологии обработки.

1.2. ВЫСОКОПОРИСТЫЕ ШЛИФОВАЛЬНЫЕ КРУГИ

Высокопористые шлифовальные круги можно рассматривать как особый класс абразивного инструмента, главным отличием которого является структурное строение с уменьшенным содержанием абразивного зерна в объеме инструмента. Такое структурное строение обуславливает увеличение объема порового пространства, изменение статистических характеристик распределения абразивных зерен в объеме и на рабочей поверхности шлифовального круга, условий их закрепления связкой и необходимость применения специальной технологии для их изготовления. Высокопористый абразивный инструмент изготавливается в основном на керамических связках.

Особенности объемного строения.

Объемное строение абразивного инструмента на стадии его изготовления складывается из объемного содержания зерна V_z , связки $V_{св}$, различных добавок V_d в виде

воды, красителей, клеящих добавок, порообразователей, наполнителей и т.д. и порового пространства V_p :

$$V = V_z + V_{св} + V_d + V_p. \quad (1.5)$$

Суммарное содержание всех компонентов по (1.5) равно 100 %, поэтому изменение хотя бы одного из них в сторону увеличения или уменьшения требует безусловного перераспределения удельного вклада остальных.

Принято называть абразивный инструмент с номерами структур 5...8 инструментом *нормальной структуры*, и такой инструмент наиболее распространен в технологии абразивной обработки. Его пористость формируется в процессе изготовления без специальных технологических приемов и поэтому называется естественной пористостью, объем которой обычно не превышает 40...45% объема инструмента.

Абразивный инструмент с пористостью 50 % и более относится к классу высокопористого инструмента. Для его производства применяются специальные технологии с использованием порообразователей, которые дополнительно к естественной формируют искусственную пористость. Суммарный объем порового пространства у высокопористых кругов может достигать 60...75 % и более объема инструмента.

По принятой классификации и в соответствии с опытом изготовления и применения к *высокопористому абразивному инструменту* можно отнести инструмент на *керамических связках со структурой 10 и твердостью от ЧМ до СМ1, со структурой 12 и твердостью от ЧМ до СТ1. Начиная с 14-й структуры и выше, абразивный инструмент, как правило, с любой твердостью имеет пористость более 50 %.*

В литературных источниках часто встречается классификация, разработанная еще фирмой Norton и опубликованная П.Е. Дьяченко [20]. В ней приведены со-

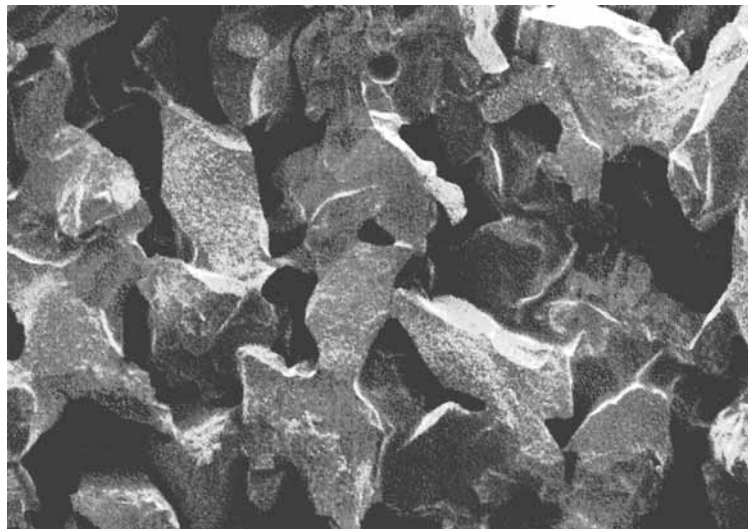


Рис. 1.3. Пористая структура абразивного инструмента

отношения по относительным объемам абразивного зерна и керамической связки в зависимости от номера структуры от 0 до 12 и твердости в диапазоне от ЧМ до ЧТ при изменении порового пространства от 49,5 до 24 % объема инструмента. В этих соотношениях до 3 раз завышено содержание связки, необходимое в настоящее время для изготовления инструмента заданной характеристики и вследствие этого – занижен объем порового пространства. Поэтому опубликованные аналитические оценки некоторых авторов, например, средних размеров пор или формализация объемных соотношений зерна, связки и пор, которые базируются на устаревших объемных соотношениях, являются ошибочными.

При однородном распределении пор их средний размер зависит от характеристики абразивного инструмента: с увеличением зернистости абразивного зерна и номера структуры, а также с уменьшением твердости размер пор возрастает, а их число в объеме инструмента снижается. Наибольшее влияние на размер пор оказывает зернистость, в меньшей степени – структуры и твердость. При необходимо-

сти сохранить зернистость и твердость шлифовального круга для заданных технологических условий обработки единственной возможностью повысить его пористость становится только увеличение номера структуры. Характер указанной закономерности изменения размера пор обусловлен его зависимостью от среднего расстояния между абразивными зернами в объеме инструмента.

Пора как объемный физический объект в абразивном инструменте может образовываться и существовать либо в связке, либо в композитной конструкции зерно–связка–порообразователь. При затвердевании керамической связки после высокотемпературного обжига в ней формируются поры даже без участия абразивных зерен и специальных порообразователей. При наличии зерен и порообразователей в объемной структуре абразивного инструмента картина получается еще более пестрой. По-видимому, четко определить форму и размеры пор невозможно, так как при соединении множества пор между собой в единое поровое пространство конфигурация, размеры и ориентация каждого отдельного его элемента стано-

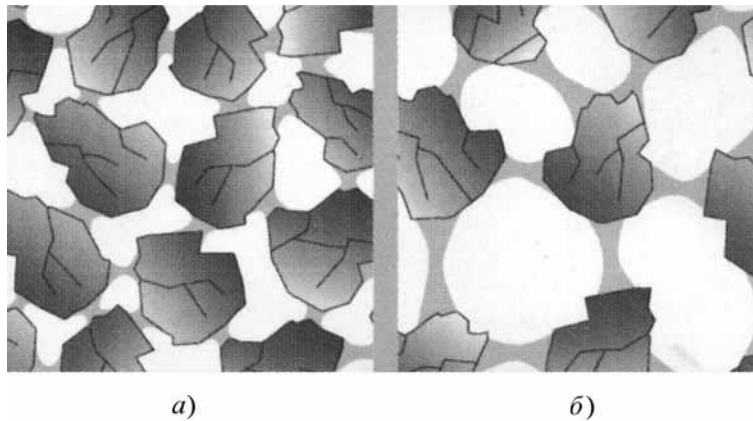


Рис. 1.4. Модель строения высокопористого абразивного инструмента:
а – пористая структура; б – крупнопористая структура

ваться случайными. На рис. 1.3 показана пористая структура абразивного инструмента, а на рис. 1.4 идеализированная модель его строения.

Безусловно, что случайный характер формирования пористости в шлифовальном круге негативно сказывается на его прочности.

В работе [56] с помощью поляризационно-оптического метода было смоделировано напряженное состояние шлифовальных кругов со структурами 3, 7 и 11, у которых объемное содержание зерна зернистостью 40 изометричной формы составляло соответственно 56, 48 и 40 %. Получена функциональная зависимость:

$$\sigma = 2,188 \exp(0,039V_3), \quad (1.6)$$

из которой следует, что относительное максимальное напряжение σ , возникающее в связке со слабой адгезией к абразивному зерну, возрастает в кругах с большим содержанием зерен V_3 . Слабая адгезионная связь характерна для керамических связок с зернами карбида кремния.

Зависимость между максимальными напряжениями в связке круга со значительной адгезией его компонентов (характерно для зерен электрокорунда) математически аппроксимируется уравнением

$$\sigma = 2,217 \exp(0,0174V_3). \quad (1.7)$$

Таким образом, для граничных условий слабой и прочной адгезии связки с абразивным зерном из карбида кремния (1.6) и электрокорунда (1.7) при моделировании шлифовального круга без пор, установлено, что чем больше зерен в объеме инструмента, тем более высокий уровень напряжений наводится в нем и тем меньше его прочность.

При моделировании напряженного состояния шлифовального круга в зависимости от наличия пор в виде сквозных просверленных отверстий взаимосвязь описывается показательной функцией:

$$\sigma = 0,0024 \exp(0,1919p), \quad (1.8)$$

где p – процентное содержание пор в объеме инструмента.

Увеличение объема пор приводит, следовательно, к разупрочнению шлифовального круга. С другой стороны, в соответствии с (1.6) и (1.7) уменьшение содержания зерна способствует его упрочнению. В идеализированном варианте строения абразивного инструмента с геометрически правильной формой зерен и пор их количество полярным образом влияет на его прочность. Из сравнитель-

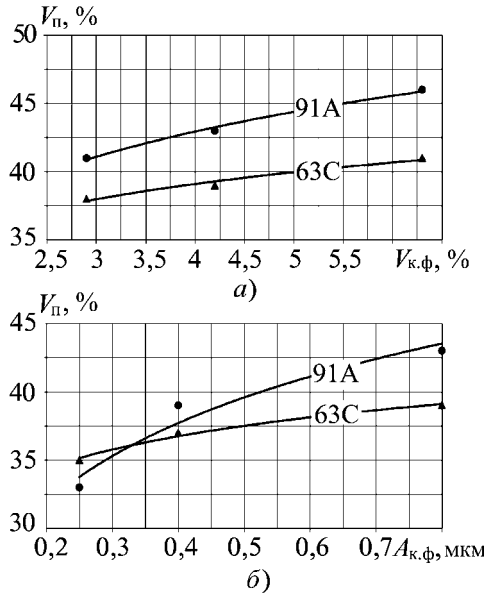


Рис. 1.5. Влияние содержания фруктовых косточек $V_{к.ф}$ в объеме круга (а) и их размеров $A_{к.ф}$ (б) на пористость шлифовального круга

ного анализа трех моделей, однако, следует, что при одинаковом относительном изменении концентрации зерен и пор в объеме инструмента негативное влияние пористости по (1.8) на его напряженное состояние до 6 раз превышает положительное влияние увеличения номера структуры по (1.6) и (1.7) и соответственно именно пористость шлифовального круга будет определять его прочностные свойства.

На рис. 1.5 и 1.6 приведена графическая интерпретация табличных данных [91] измерения открытой пористости кругов зернистостью 25, твердостью CM2, со структурой 6...12 из электрокорунда хромтитанистого марки 91А и карбида кремния зеленого марки 63С на керамических связках и их прочности при сжатии на универсальной испытательной машине модели УММ-5. Открытая пористость определялась методом насыщения водой и гидростатического взвешивания образцов по объему жидкости, поглощенной пора-ми при кипячении.

Повышение открытой пористости кругов на 10 % при увеличении номера структуры от 6 до 12 происходит за счет одновременного снижения объемного содержания зерна с 50 до 38 %, увеличения содержания выгорающего порообразователя в виде молотых фруктовых косточек с 2,9 до 6,3 % и размеров их частиц с 0,25 до 0,8 мм. Если линейная зависимость между количеством выгоревших косточек и пористостью круга (рис. 1.5, а) вполне ожидаема, то заметное повышение пористости с увеличением размеров частиц выгорающего порообразователя при сохранении постоянным его содержания в 4,2 % (рис. 1.5, б) требует пояснения.

По-видимому, отмеченный эффект повышения пористости при увеличении размеров выгорающих косточек связан с их взаимодействием с керамической связкой. Чем больше размеры выгорающих частиц, тем больше площадь их свободной поверхности и тем больший объем частиц выгорает с образованием пор. При небольших размерах порообразователя взаимодействие с жидкой связкой ограничивает степень его выгорания.

При увеличении пористости только на 10 % прочность на сжатие уменьшается заметно: почти в 1,5 и 2,1 раза соответственно для кругов из электрокорунда и карбида кремния со структурой 12 (см. рис. 1.6). Корреляционный анализ экспериментальных данных также подтвердил значительное влияние наличия зерен в шлифовальном круге, открытой пористости и размеров порообразователя на прочность инструмента.

Строение порового пространства абразивного инструмента наиболее полно можно характеризовать следующими параметрами [59]:

1. Общая пористость (полная или истинная) P_n — отношение объема всех пор в инструменте к его объему.
2. Открытая пористость P_o — отношение суммарного объема всех пор и соединяющих их каналов (капилляров) между собой и с периферией инструмента.

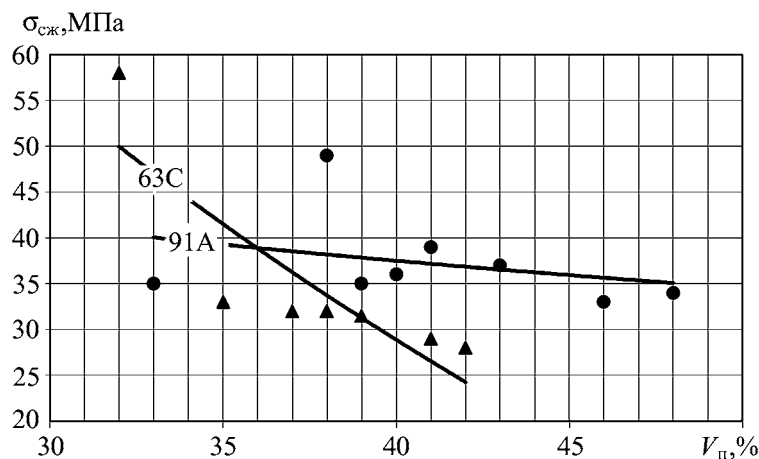


Рис. 1.6. Влияние открытой пористости круга на его прочность при сжатии

3. Закрытая пористость P_3 – отношение суммарного объема пор, изолированных друг от друга и от периферии инструмента и недоступных для проникновения в них жидкости.

4. Удельная поверхность порового пространства, $\text{м}^2/\text{г}$.

5. Распределение объема пор в объеме инструмента по их эффективным радиусам.

6. Средние эффективные и гидравлические радиусы пор и капилляров.

7. Геометрические характеристики порового пространства.

Несмотря на столь подробную аттестацию пористости, ее формирование при изготовлении высокопористого абразивного инструмента носит стохастический и непредсказуемый характер. Пористость рассчитывается теоретически на стадии определения рецептурного состава и обеспечивается введением в состав, обычно, выгорающих порообразователей размером $100 \dots 800 \text{ мкм}$. При обжиге инструмента частично или полностью они выгорают, образуя взаимосвязанную объемную структуру из пор более крупных размеров, чем размеры порообразователя.

Австрийская фирма Rappold Winterthur, которая имеет большой опыт изготовления этого класса абразивного инструмента, учитывает особенности строения порового пространства высокопористых шлифовальных кругов. Диапазон применяемых ею номеров структур начинается от 1 и заканчивается 20. Инструмент с номерами структур $1 \dots 10$ называется инструментом нормальной структуры с естественной пористостью, а с номерами $11 \dots 20$ – высокопористыми кругами с искусственной пористостью. Для различной степени пористости абразивного инструмента введены дополнительные обозначения: Р – пористая структура, для пористости в зависимости от ее объема – L (низкая), М (средняя), Н (высокая) и НН (очень высокая), а также по размерам пор GG (большие поры), F (мелкие), FF (очень мелкие) и SR (специальная форма).

Одним из методов контроля пористости является метод воздухопроницаемости. Метод основан на измерении давления, вызванного изменением расхода воздуха при пропускании его через пористую структуру шлифовального круга. Прибор, реализованный на этом принципе

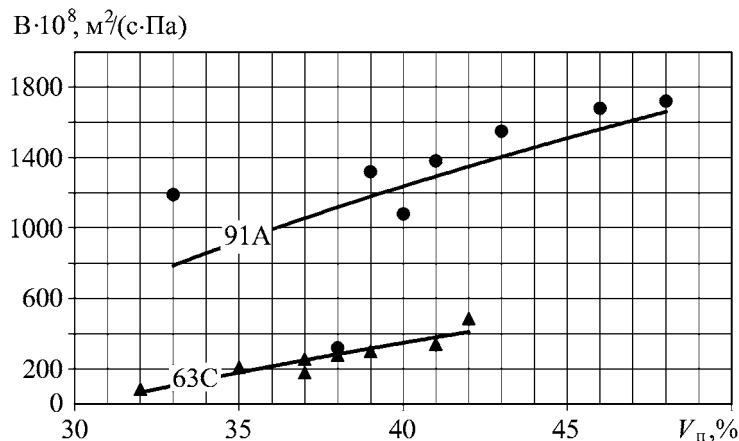


Рис. 1.7. Влияние открытой пористости круга на его воздухопроницаемость

действия, позволяет фиксировать открытую пористость абразивного инструмента.

На рис. 1.7 показана зависимость изменения воздухопроницаемости B кругов со структурами 6...12 от их открытой пористости, построенная по табличным данным работы [91]. Для инструмента из карбида кремния зеленого марки 63С равной зернистости, твердости и номера структуры общий уровень воздухопроницаемости почти в 4 раза ниже, чем у инструмента из электрокорунда хромтитанистого марки 91А. Причина этого заключается в том, что керамические связки для карбида кремния отличаются слабыми адгезионными свойствами, поэтому ее вводят в 2 раза больше по объему, чем в инструменте из электрокорундового зерна аналогичной характеристики.

Воздухопроницаемость является не только характеристикой открытой пористости абразивного инструмента, но и критерием его соответствия конкретной операции шлифования.

Исследования [53] открытой пористости почти трех тысяч шлифовальных кругов с одной характеристикой 24А 10П ВМ1 12 К5 П40-20, изготовленных на основе перлита в качестве порообразовате-

ля, показали, что она связана с их твердостью. При колебании твердости по глубине лунки от 6,8 до 8,0 мм или 17,6 % (диапазон ВМ1...ВМ2) пористость кругов составляет от 54,4 до 57,3 % с рассеянием в пределах 5,3%. Корреляционным анализом результатов исследований было установлено, что на количество бракованных деталей наибольшее влияние оказывает именно пористость круга, а не изменение его твердости, т.е. при назначении характеристики круга предпочтение необходимо отдавать его фактической пористости, а затем уже – твердости.

Испытания проводились при профильном глубинном шлифовании замка турбинной лопатки из жаропрочного сплава ЖС6У-ВИ, а брак деталей выявлялся по наличию микротрещин и в результате износа круга.

Разновидностью высокопористого абразивного инструмента является крупнопористый инструмент, у которого искусственно созданные поры размером 2...3 мм и более превосходят по размерам абразивные зерна. При формировании объемной структуры крупнопористого инструмента происходит перераспределение зерен и связки вокруг пор. Их разме-

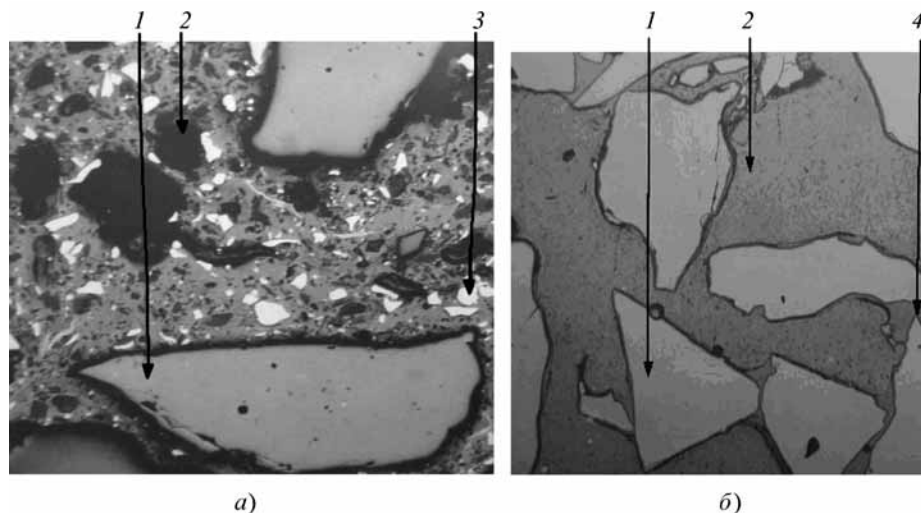


Рис. 1.8. Структура абразивного инструмента на бакелитовой (а) и керамической связках (б):

1 – абразивное зерно; 2 – поры; 3 – связка с наполнителем; 4 – мостик связки

ры и распределение по объему инструмента приобретают ярко выраженный случайный характер.

На рис. 1.8 показаны фотографии микрошлифов абразивного инструмента на бакелитовой связке с небольшой пористостью и крупнопористого инструмента с небольшим объемным содержанием керамической связки (фирма Krebs&Riedel).

Увеличение общей объемной пористости и особенно размеров отдельных пор негативно сказываются на прочности шлифовального круга, наличие крупных пор неправильной формы в этом случае приводит к еще большей концентрации напряжений вокруг них с формированием неоднородного напряженного состояния в объеме абразивного инструмента. Прямые измерения, например, показали, что у крупнопористого круга 24А 25 СМ1 10 К5 и с размерами пор 400...630 мкм прочность на разрыв в 3 раза, а прочность на сжатие в 1,6 раз меньше, чем у шлифовального круга аналогичной характеристики с нормальной пористостью и структурой 6 [101].

Для высокопористых кругов так же, как и для инструмента с нормальной структурой, повышение степени твердости сопровождается увеличением их предела прочности: по экспериментальным данным изменение степени твердости от СМ1 до СТ1 повышает предел прочности на разрыв более чем в два раза [59]. Их важной особенностью является влияние на разрывную прочность высокопористых кругов объемной пористости и объемной доли крупных пор, увеличение которых снижает прочность инструмента.

Следует также отметить, что благодаря особенностям своего строения высокопористые круги открытой структуры обладают лучшей самозатачиваемостью и меньшей засаливаемостью. Это повышает стойкость круга и позволяет работать на повышенных режимах шлифования. Крупные поры обеспечивают хорошее размещение срезаемых зернами стружек, а также способствуют дополнительному охлаждению обрабатываемой заготовки за счет лучшего проникновения СОТС в зону резания и пропитывания ею самого круга. В то же время, несмотря на отме-

ченное положительное влияние пористости, прочность удержания зерен на поверхности круга должна обеспечиваться достаточно высокой для достижения максимально возможного эффекта использования режущих свойств зерен и соответственно наивысшей производительности за счет съема металла одним зерном.

Высокопористый шлифовальный круг работает наподобие воздушного насоса, подавая воздух через свои поры в зону резания. Эффект происходит из-за того, что при вращении круга воздух, отбрасываемый центробежной силой от центра к периферии круга, через сквозное поровое пространство создает вакуум в середине круга. Это приводит к интенсивному всасыванию воздуха через торцы круга и непрерывной подаче его в зону обработки. Описанный эффект улучшает условия охлаждения обрабатываемой детали и шлифовального круга и обеспечивает теплоотвод из зоны их контакта.

Исследованиями, например, А.И. Ящерицина, показано, что вентилируемость высокопористого круга по сравнению с обычной структурой увеличивается по скорости на 0,8 м/с, по количеству воздуха на 2 м³/ч, а по напору на 6 Па.

Работая при высоких окружных скоростях, высокопористый круг, за счет большой поверхностной шероховатости, создает вокруг себя вихревые воздушные потоки. Причем, чем выше шероховатость (пористость) круга, тем сильнее образуются вихревые потоки, которые более интенсивно охлаждают обрабатываемую поверхность. Установлено, что скорость воздуха в зоне резания при вращении высокопористого круга на 25...30 % больше, чем при вращении обычного [33]. В связи с тем, что при шлифовании выделяется очень большое количество тепла, указанные процессы благоприятно сказываются на управлении температурным режимом обработки.

К этому можно добавить, что высокопористая конструкция инструмента с развитой системой порового пространства

становится эффективным средством принудительной подачи СОТС через поры в зону шлифования, а также импрегнирования рабочей поверхности кругов различными добавками.

Еще одной особенностью строения высокопористого инструмента является формирование микрорельефа его рабочей поверхности, наиболее благоприятного с точки зрения съема материала при шлифовании.

Изучение геометрии рельефа режущей поверхности шлифовальных кругов с различными номерами структур позволило сделать следующие выводы [59]:

- геометрия рельефа режущей поверхности тесно связана с характеристикой инструмента и, прежде всего, с его пористостью: с увеличением пористости и номера структуры от 6 до 15 уменьшается относительная опорная длина профиля и увеличивается средний шаг между выступающими над связкой зернами почти в 4 раза;

- при использовании порообразующего выгорающего наполнителя с размерами, изменяющимися в диапазоне 1,5...3,2 размера абразивного зерна, геометрия рельефа рабочей поверхности инструмента сохраняется одинаковой; при увеличении соотношения указанных размеров статистические характеристики рельефа возрастают.

Это очень важное преимущество высокопористых кругов. Как показали С.А. Попов и Р.В. Ананьян, отмеченное изменение рельефа режущей поверхности при переходе от структуры 6 к 15 способствует снижению температуры и мощности шлифования в 1,5–2 раза.

На рис. 1.9 показаны корреляционные связи температуры и мощности шлифования быстрорежущей стали Р6М5 с показателями геометрии рельефа рабочей поверхности шлифовального круга. На рис. 1.9, а, в представлены графики изменения температуры и мощности шлифования в зависимости от относительной опорной длины профиля на глубине

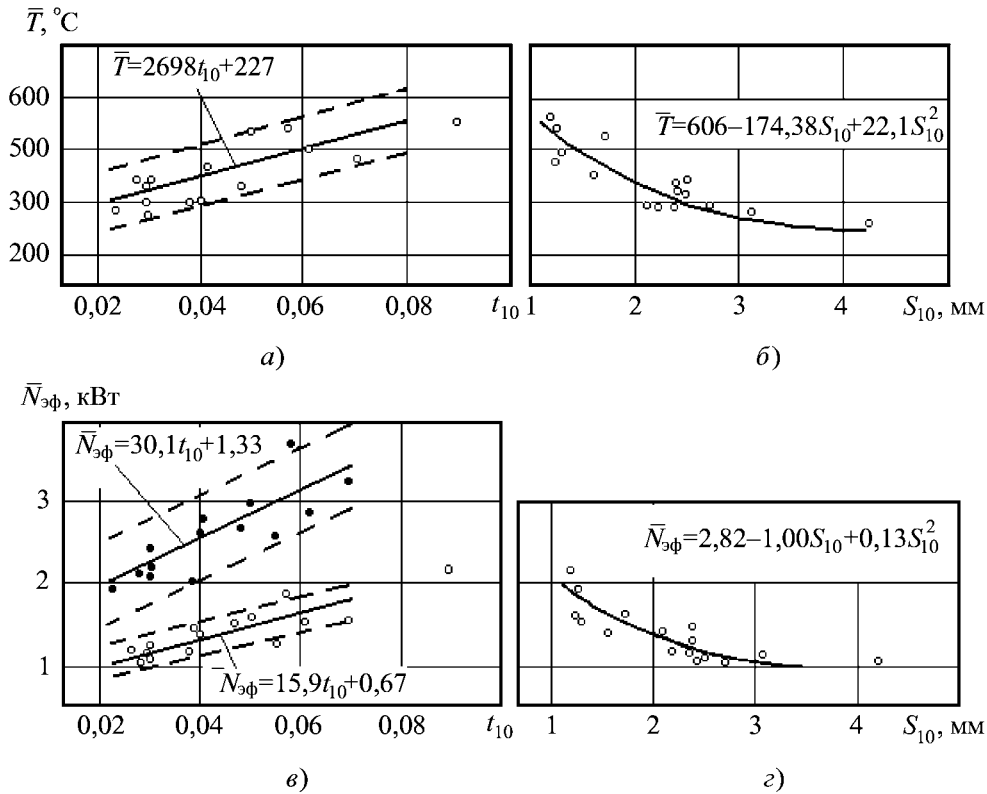


Рис. 1.9. Корреляционные связи температуры (а, б) и мощности (в, г) шлифования с параметрами t_{10} и S_{10} рельефа режущей поверхности шлифовального круга

10 мкм от вершины наиболее выступающего зерна t_{10} , а на рис. 1.9, б, г аналогичные зависимости от среднего шага между измеренными выступами S_{10} на поверхности круга.

Из приведенных графиков следует, что между исследованными параметрами существует прямая пропорциональная зависимость: с уменьшением относительной опорной длины профиля t_{10} и увеличением среднего шага S_{10} наблюдается снижение температуры и мощности шлифования.

В результате, сохраняя постоянной температуру, можно повысить производительность обработки в 2...2,5 раза за счет форсирования режимов шлифования, либо при постоянной производительности процесса значительно (до 2 раз) снизить

температуру шлифования. Более низкая температура в сочетании с уменьшенной мощностью процесса создает предпосылки бездефектного шлифования.

В качестве альтернативы высокопористому абразивному инструменту для бездефектного шлифования предложены шлифовальные круги с прерывистой рабочей поверхностью. По мнению А.В. Якимова, который обстоятельно исследовал процесс шлифования прерывистыми кругами, они снижают температуру в зоне контакта на 30...40 % при одновременном увеличении стойкости до 2...3 раз. Такая конструкция абразивного инструмента позволяет прерывать процесс шлифования, уменьшая тепловые нагрузки на деталь и способствуя самозатачиванию круга. Но указанные досто-

инства нивелируются их существенным недостатком: ударным характером работы кругов с прерывистой поверхностью, вследствие чего возникают вибрации технологической системы резания с появлением огранки и волнистости на обрабатываемой поверхности детали и снижении долговечности оборудования. Попытки оптимизировать конструкцию прерывистой рабочей поверхности для снижения ударного воздействия приводят к другому недостатку – усложнению самой конструкции круга и удорожанию его изготовления.

Обобщая изложенное, можно утверждать, что главным признаком высокопористого абразивного инструмента, который определяет его строение и соответствующие преимущества для шлифования, является уменьшенное объемное содержание зерна от 42 % и менее в зависимости от номера структуры.

Традиционные представления о высокопористом инструменте основаны на том, что он обладает сквозной, так называемой открытой пористостью. Такой характер пористости в объеме инструмента формируется технологически; к порам, которые всегда имеются в композитной конструкции зерно–связка, добавляются искусственно созданные поры за счет, например, выгорания специальных добавок.

Новые технологии их изготовления, которые описаны в последующих главах книги, в сравнении с традиционными позволяют обеспечивать структуры с номерами 20...26 и даже выше, если есть в этом необходимость. Соответственно объем зерен при таких структурах уменьшается до 22...10 % и менее.

Высокие номера структур технологически не могут быть обеспечены введением только выгорающих порообразователей. Они создаются за счет формирования так называемой закрытой пористости, когда почти отсутствует сквозная воздухопроницаемость инструмента, или комбинации порообразователей, одновремен-

но формирующих открытую и закрытую пористости.

Такой высокопористый инструмент, сохраняя преимущества открытой структуры, приобретает дополнительно более однородное строение и распределение физико-механических свойств по объему, включая твердость и равнопрочность, повышенные значения износостойкости и рабочей скорости [76].

Изготовление высокопористого абразивного инструмента. Технология производства высокопористого абразивного инструмента с открытой пористостью основана на применении выгорающих добавок (порообразователей), химического газообразования, пенообразования, литья, образования волокнистого каркаса и др. Например, при изготовлении высокопористых кругов литьем в абразивную массу вводят перекись водорода, при разложении которой на воду и кислород образуется суспензия с равномерно распределенными в объеме инструмента пузырьками. Пенный способ производства сложен, требует специального оборудования, к тому же процессы изготовления сырца и сушки весьма трудоемки.

Применение для изготовления высокопористой формовочной массы методом полусухого формования добавок, выгорающих или выплавляющихся при высокотемпературном обжиге, является легко осуществимым и потому наиболее распространенным.

В качестве порообразующих наполнителей в отечественной и зарубежной абразивной промышленности использовали большое количество различных материалов: пробковую крошку, древесные опилки, крошку мрамора, бурый уголь, торф, солому, гипс ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), синтетический кокс, сланец, древесный уголь, отходы производства пластмассовых изделий и т.д. [55, 59, 90]. Кроме перечисленных, известен также опыт использования в производстве высокопористого абразивного инструмента других порообразователей: нафталина, вспученных перли-

тов, порошков синтетических смол, а также полистиролов марок ПСС, ПСВ, бисерсополимера МСН и других искусственных или природных материалов, от которых зависят особенности технологических процессов изготовления высокопористых абразивных инструментов.

В процессе изготовления инструмента все вышеописанные порообразователи выявили те или иные недостатки. Например, древесный уголь, опилки, пробковая крошка, скорлупа грецких орехов, косточки фруктовых орехов, торф и т.п., придают высокопористой абразивной массе значительную хрупкость, что ведет к растрескиванию сырца. При обжиге поры приобретают неправильную форму, а внутренние стенки пор почти всегда шероховатые, поэтому после обжига вблизи пор наблюдается значительная концентрация напряжений, что ведет к снижению прочности круга, а в ряде случаев – к разрушению круга. Литейный кокс обладает повышенной зольностью, нефтяной кокс и сланец плохо выгорают при обжиге.

Применение в качестве наполнителей мрамора и гипса также не оправдано, в связи с тем, что при обжиге эти вещества разлагаются с выделением газов и оксида кальция: в абразивной массе образуется большое количество CaO , что может привести к браку, так как возникает опасность реакции оксида кальция со связкой.

Введение выгорающих наполнителей определенной крупности приводит к образованию в процессе термообработки инструмента большой общей объемной пористости и к увеличению размеров отдельных пор в строении круга; скопление крупных пор резко снижает прочностные свойства шлифовального круга.

Механизм образования объемной пористости предположительно таков: при сгорании наполнителя в круге образуются газы и другие продукты горения, а так как связка при температуре обжига остается химически относительно нейтральной, то

она не может поглотить газовую составляющую внутри круга. Происходит увеличение давления в объеме каждой поры, так как объем газа значительно больше объема сгоревшей частички наполнителя. В этот момент материал связки находится в размягченном состоянии и газы, образовавшиеся при сгорании наполнителя, прорывают пленку связки и соединяются с объемом соседней поры. Разрыв перегородок между порами происходит из-за того, что наполнитель сгорает неравномерно и в разных порах давление неодинаково. Но все газы стремятся выйти наружу. Такая модель подтверждает то, что почти все поры соединены не только между собой, но и с внешней средой – наружной поверхностью инструмента.

Схематично строение круга можно представить так: во всем объеме круга неравномерно размещены отдельные поры, имеющие в большинстве случаев округлую форму. Пространства всех этих пор соединены между собой отверстиями. Совокупность таких взаимосвязанных пор представляет собой лабиринт сложной формы. Если рассматривать направление воздушных ходов в пространстве, то оно сложно и хаотично, и поперечное сечение воздушных ходов непрерывно меняется от минимума до определенного максимума.

Связка при температуре обжига обладает хорошей адгезией с абразивными зёрнами, из-за чего отдельные зёрна соединяются так называемыми мостиками, состоящими из материала связки. Большая поверхностная энергия связки способствует связи отдельных зёрен в один целый скелет. Связка располагается вокруг зёрен в виде пленки, образуя между зёрнами отдельные поры, размеры которых изменяются в пределах, обусловленных размерами порообразователя.

При температуре обжига керамическая связка как бы смачивает абразивное зерно. Во время обжига на поверхностях контакта зерна и связки происходит диффузионный процесс, сопровождающий процесс смачивания зерна, в результате

получается чрезвычайно прочное соединение зерна и связки в граничных поверхностях. Так что в процессе работы круга разрушение происходит не по контактной поверхности, а по мостику связки. Высокая поверхностная энергия материала связки, свойство связки в процессе обжига смачивать абразивные зерна, давление газов при выгорании наполнителя – это основные факторы, способствующие образованию пор округлой формы.

Известен технологический процесс производства высокопористых кругов с использованием в качестве порообразователя бисера сополимера МСН зернистостью 40, 80 и 125. Бисер сополимера МСН имеет округлую форму и обладает достаточной прочностью. Его получают полимеризацией стирола с метилметакрилатом и нитрилом акриловой кислоты [59]. Высокопористые круги, полученные по этому технологическому процессу, обладают по сравнению с обычными кругами рядом преимуществ по стойкости, расходу абразива, отсутствию прижогов при шлифовании.

Однако опыт производства показал, что при обжиге высокопористых кругов, изготовленных с использованием в качестве выгорающего порообразователя бисера сополимера марки МСН, ощущается неприятный запах и при этом выделяются продукты деструкции: стирол – 134,8 г/кг (ПДК 5), метилметакрилат – 181,2 г/кг (ПДК 20) и акрилонитрил – 5,8 г/кг (ПДК 0,5). Кроме вышеуказанных веществ в составе неидентифицированных продуктов деструкции в данном случае могут присутствовать HCN, формальдегид и аммиак. Это является одной из причин, ограничивающих применение бисера сополимера марки МСН для изготовления высокопористых кругов открытой структуры по соображениям экологической безопасности.

В результате исследования широкого ассортимента материалов были определены следующие основные требования к порообразующему наполнителю:

- шарообразная или близкая к ней форма частиц, удобная для смешивания

высокопористой абразивной массы и позволяющая регулировать пористость в инструменте;

- способность улучшать физико-механические свойства формовочной массы (сыпучесть, прочность сырца);
- достаточная прочность на сжатие, т.е. частицы материала не должны разрушаться и изменять свою форму при смешивании и прессовании изделия;
- низкая температура воспламенения (не более 500 °С);
- малая зольность (не более 0,8 %);
- способность к рассеву и равномерному смешиванию с компонентами формовочной массы;
- не должен создавать внутренних напряжений в инструменте в процессе обжига;
- гладкая поверхность;
- отсутствие токсичности газовыделений при сгорании.

На основании разработанных требований Всероссийский научно-исследовательский институт абразивов и шлифования (ВНИИАШ) в качестве порообразующих наполнителей для абразивных инструментов рекомендовал полистирол марки ПС-СБА, перлит и фруктовые косточки.

Полистирол не взрывоопасен, не возгорается при контакте с огнем, характеризуется малой зольностью, имеет сферическую форму, хорошо рассеивается по фракциям (его подвергают рассеву на 4 фракции), при смешивании равномерно распределяется в абразивной массе. Все эти свойства полистирола позволяют изготавливать инструмент с различными характеристиками. Однако санитарно-химическими исследованиями, проведенными при обжиге абразивных кругов с применением полистирола марки ПС-СБА, было установлено, что при его сгорании при температуре 300...700 К происходит выделение таких вредных веществ, как стирол, бензол, толуол, а также углекислый газ. Указанные вещества имеют ограничения по пределу допустимой концентра-

ции. В связи с отрицательным влиянием на окружающую среду указанных веществ, применение полистирола в качестве порообразователя ограничено.

Перлит – минерал естественного происхождения в виде кислого водосодержащего вулканического стекла. Перед применением в качестве порообразователя его специально перерабатывают и классифицируют по размерам. Перлит является родственным материалом керамической связки, при нагреве он вспучивается, увеличиваясь в объеме в 15...20 раз, после чего испаряется, образуя крупные поры. Образующиеся шарообразные включения расплавленного перлита вступают во взаимодействие с компонентами связки и абразивным зерном, упрочняют крепление зерна в каркасе пор. Эти качества перлита делают его хорошим наполнителем для производства высокопористого инструмента.

Недостатком является то, что при смешивании он неравномерно распределяется между компонентами формовочной массы, что вызывает дисбаланс готового инструмента, причем прочность сырца, изготовленного из такой массы, низкая, а при вспучивании перлита в процессе обжига в инструменте возникают внутренние напряжения, сильно снижающие его прочность, ведущие к появлению трещин в инструменте, что является причиной неустранимого брака. Перлит также не позволяет изготавливать высокопористый инструмент из карбида кремния, из-за природы этого порообразователя и физико-химических процессов, происходящих в процессе обжига инструмента.

При использовании полистирола и перлита в качестве наполнителей технологически можно получать достаточно широкий диапазон характеристик высокопористых кругов. Объемное содержание пор 10...30 %. Размер пор, зависящий от размера частиц наполнителя, составляет при использовании полистирола 0,2...0,8 мм, при использовании перлита – 0,2...0,4 мм. Как показали исследования,

объем вводимого наполнителя не должен превышать 40 %; введение предельного количества наполнителя приводит к разрушению образца при обжиге.

Особенностью применения в качестве выгорающего порообразователя молотых фруктовых косточек является их растительное происхождение, что способствует выделению при сгорании продуктов, совместимых с окружающей атмосферой. С их помощью удастся получить особо мягкие (ЧМ...ВМ) высокопористые круги, необходимые для ответственных операций шлифования тяжело нагруженных деталей из труднообрабатываемых материалов.

Фруктовые косточки перед использованием в производстве высокопористого инструмента предварительно проходят стадии дробления, измельчения, классификации по размерам и отмачивания.

В состав формовочной смеси кроме абразивных зерен, керамической связки и фруктовых косточек вводят увлажняющие и клеящие добавки: сульфспиртовая "бура" (лигносульфонат) и сухой декстрин. Лигносульфонат является универсальным увлажнителем смесей с фруктовыми косточками независимо от вида абразивного материала, обеспечивает оптимальные клеящие свойства и хорошую формуемость высокопористой смеси. Рекомендуемые размеры порообразователя 250...800 мкм в количестве 7...15% от содержания абразивного зерна в шлифовальном круге.

В числе достоинств фруктовых косточек в качестве порообразователя – возможность увеличения размеров пор, например, в сравнении с перлитом, и более высокая (до 1,5 раз) прочность заформованных изделий со структурами 10...12. Применение фруктовых косточек обеспечивает получение высокопористого инструмента из всех абразивных материалов, в том числе из карбида кремния.

В табл. 1.13 представлены характеристики высокопористых абразивных кругов, полученных в зависимости от ви-

1.13. Характеристики высокопористых абразивных кругов

Порообразующий наполнитель	Абразивный инструмент		
	Марка абразивного материала	Твердость	Структура
Полистирол ПС-СбД, зернистость 25-40	14А, 24А, 91А, 63С	МЗ...С1	9...16
Перлит, зернистость 40	14А, 24А, 91А	ВМ2...СМ2	9 ...12
Фруктовые косточки, зернистость 80...40	14А, 24А, 25А, 91А, 63С	ЧМ1...СМ2	9 ...14

да применяемого порообразующего наполнителя [59].

В настоящее время в силу различных причин, и не только экологических, отечественная абразивная промышленность использует только молотые фруктовые косточки.

На зарубежных фирмах – производителях высокопористого абразивного инструмента – используются нафталин или молотые фруктовые косточки.

Нафталин – ароматический углеводород $C_{10}H_8$, представляющий собой бесцветные пластинчатые кристаллы с характерным запахом; обладает высокой летучестью. Его получают из каменноугольной смолы. Температура плавления составляет 80 °С, кипения – 218 °С, плотность – 1,145 г/см³. Хорошо растворяется в органических растворителях (эфире, ароматических углеводородах), но плохо в воде; легко окисляется. Пыль нафталена в воздухе может вызвать взрывы, при взрывоопасной концентрации в смеси с воздухом 1,7...8,2 % или 80...400 мг/мм³. Выпускается марок А, Б, В и технический с содержанием нафталена от 91 до 98 % [11].

Нафталин является чрезвычайно токсичным материалом. Поражает нервную систему человека, желудочно-кишечный

тракт, почки. Характерны изменения в крови: гемолиз эритроцитов, лейкоцитоз, анемия и др. Вызывает помутнение хрусталика (катаракту), накопление аммиака в головном мозге, с чем связывается нарушение функции центральной нервной системы. Технический нафталин токсичнее чистого, по-видимому, из-за примесей тионафенов, фенолов и др. Порог восприятия запаха нафталена для человека составляет 0,00001 мг/л, предельно допустимая концентрация паров нафталена в воздухе – 20 мг/м³.

В абразивном производстве нафталин применяют в виде сферических гранул, размеры которых определяются необходимыми размерами пор в шлифовальном круге. Достоинством нафталена как порообразователя в сравнении с другими выгорающими аналогами является стабильность его физико-механических свойств, обусловленных стабильным химическим составом. Этого нельзя, например, сказать о фруктовых косточках, свойства и состав которых как продуктов растительного происхождения обусловлены многими природными факторами.

Автор знаком с производством высокопористого абразивного инструмента с применением нафталена на ряде известных фирм в Австрии и Германии. Внешне

вредное воздействие нафталина не проявляется заметными симптомами, кроме наличия характерного запаха в производственных помещениях. Все эти фирмы оборудованы дорогостоящими и сложными технически очистными сооружениями.

Ограничения экологического, технического и экономического характера привели к тому, что в производстве высокопористого абразивного инструмента с открытой пористостью преобладают технологии с использованием молотых фруктовых косточек или нафталина.

Изготовление инструмента на их основе имеет достаточно серьезные недостатки. У этих кругов низкая технологичность изготовления в сравнении с инструментом нормальных структур из-за малой прочности сырца, повышенной комкуемости, плохой смешиваемости, неполного выгорания порообразователей, химического взаимодействия со связкой и т.д. Из-за формирования неоднородного строения в объеме инструмента проявляется нестабильность по твердости, а у шлифовальных кругов в целом – повышенная неуравновешенность масс и невысокая разрывная прочность – до 2 и более раз меньше, чем у инструмента нормальных структур. Имеются ограничения по количеству вводимых порообразователей из-за разупрочнения и возможного разрушения инструмента.

Нестабильность твердости имеет место не только в объеме одного круга, но и от партии к партии инструмента. В результате брак при изготовлении высокопористого инструмента с открытой пористостью на основе выгорающих порообразователей может достигать 50...80 %.

По этой технологии чрезвычайно сложно или невозможно изготовить круги с номером структуры 12 и выше для абразива с зернистостью 25...40 и более, а с номером структуры 14 и выше – для более мелкой зернистости. Трудно, а чаще невозможно получить мягкие крупногабаритные высокопористые круги с твердостью BM1...M1, со структурами 13...16,

диаметром 500...600 мм и с высотой 100...200 мм, которые применяются при профильном глубинном шлифовании фасонных замков большой длины турбинных лопаток газоперекачивающих установок.

По этим причинам выпускаемые промышленностью высокопористые шлифовальные круги с открытой пористостью имеют экономичный, с точки зрения себестоимости изготовления, конкретный диапазон по характеристике: по зернистости от 10 до 16, по твердости от BM1 до CM1...CM2, по номеру структуры от 10 до 14...15 и по рабочей скорости до 50 м/с.

В указанном диапазоне они обладают безусловными преимуществами в сравнении с инструментом нормальных структур и особенно при необходимости обеспечить бездефектное шлифование с повышенной производительностью деталей из труднообрабатываемых материалов.

Несмотря на то что пористость является одной из важнейших характеристик абразивного инструмента, она не стандартизирована. Так же, как методы и средства ее определения. Поэтому при производстве высокопористого абразивного инструмента ни пористость, ни его структура не контролируются.

Для измерения пористости различных твердых тел возможны четыре основных метода: радиоактивный, ультразвуковой, по газопроницаемости и по методу заполнения пор жидкостью или газом.

Применительно к абразивному инструменту известны приборы и опыт их применения для контроля пористости в основном по газопроницаемости (обычно – воздухопроницаемости).

Принцип измерения пористости по воздухопроницаемости заключается в измерении расхода воздуха, проходящего через определенное сечение его тела в единицу времени. Величина расхода воздуха находится в прямой зависимости от объемной пористости абразивного инструмента: определенной пористости соот-

ветствует определенный расход воздуха; с увеличением объема пор расход воздуха линейно увеличивается.

Продувание воздуха через исследуемый абразивный инструмент может осуществляться путем создания вакуума или избыточного давления. Например, в приборе, разработанном Н.М. Лебединским, измерение пористости основано на просасывании воздуха через поры инструмента в одну из двух вакуумных камер, соединенных с водяным манометром. Вакуум в системе создается вследствие продувания сжатого воздуха, а пористость определяется через перепад давления.

В приборах Н.П. Згонника и Ю.М. Кулакова принцип действия основан на продувании в фиксируемый промежуток времени через постоянную площадь исследуемого образца определенного объема воздуха при установленном давлении.

Практика применения приборов лабораторного типа для измерения пористости абразивного инструмента методом воздухопроницаемости показала, что использование избыточного давления имеет ряд важных преимуществ перед использованием вакуума. К ним относятся простота конструкции приборов, непосредственное измерение расхода воздуха, что обеспечивает более точную и надежную оценку пористости, высокую чувствительность и быстрое действие измерения.

Опыт шлифования высокопористыми кругами. Особенности строения высокопористых шлифовальных кругов становятся их решающими преимуществами при абразивной обработке, что позволяет эффективно решать задачи бесприжогового шлифования на различных технологических операциях обработки самых разнообразных по форме, размерам и материалам деталей.

Применение высокопористых кругов имеет давнюю историю. Первые значимые результаты по их практическому использованию были получены почти полвека назад.

В ранних исследованиях, выполненных Г.В. Бокучавой, А.Б. Кондратьевым, Ю.М. Кулаковым, М.С. Рахмаровой и другими, было отмечено, что пористость оказывает непосредственное влияние на производительность и качество шлифования. Более того, пористость является одним из важнейших показателей качества самого абразивного инструмента, определяющего его физико-механические свойства и режущую способность. Увеличение пористости шлифовального круга создает более благоприятные условия для интенсивного резания материалов, уменьшает количество и степень прижогов и микротрещин на шлифованной поверхности деталей. Положительный эффект при этом создается благодаря уменьшению "засаливаемости" и увеличению самозатачиваемости шлифовального круга.

Г. Вустер из фирмы Norton обосновал, что пористость и соответственно структура абразивного инструмента по своему значению и степени влияния на процесс шлифования аналогична зернистости и твердости.

Высокопористые круги на раннем этапе своей истории показали большую эффективность при обработке вязких металлов и сплавов, закаленных сталей и неметаллических материалов. Эффективность их применения возрастала с увеличением скорости шлифования от 20...35 м/с до 45...50 м/с.

А.Б. Кондратьев показал, что электрокорундовые круги зернистостью 40, твердостью CM1...CM2 со структурами 12...14 на керамических связках при внутреннем шлифовании закаленной стали марки ШХ15 позволяют увеличить в сравнении с кругами нормальной структуры рабочую скорость с 25,5 до 48 м/с при одновременном повышении удельного съема металла в 2,1 раз и значительном улучшении качества обработанной поверхности [13].

В.К. Старков и Н.И. Белоусова использованием высокопористых кругов обеспечили бесприжоговое шлифование

фасонных желобов из закаленных цементированных сталей марок 12Х2Н4А и 18Х2Н4ВА шариковых винтовых пар [75]. Применение высокопористых кругов дало возможность на 65...80 % повысить производительность обработки и на 20...30 % увеличить время работы круга между правками. При этом они обладали в 1,5 раза более высокой размерной стойкостью, чем традиционные шлифовальные круги. Было также установлено, что электрокорундовые круги со структурой 8...10 зернистостью 25 и твердостью СМ1...СМ2 при шлифовании стали 18Х2Н4ВА наводят в поверхностном слое детали сжимающие остаточные напряжения 20...30 МПа с глубиной залегания 0,02...0,06 мм. В сочетании с полученной шероховатостью обработанной поверхности ($Ra = 0,4...0,63$ мкм) это обеспечивает высокую надежность и повышенный ресурс эксплуатации винтовых пар.

В работе [59] приводятся примеры практического применения высокопористых кругов на различных операциях, которые систематизированы в табл. 1.14.

Наиболее значимое достижение в применении высокопористых кругов с открытой структурой было получено при разработке и промышленном освоении технологии глубинного шлифования замков турбинных лопаток из жаропрочных сплавов на никелевой основе [17, 23, 25, 71].

Для этого был разработан специальный высокопористый абразивный инструмент с повышенной режущей способностью. Его пористость составляет 48...70 % при зернистости 10...25 и твердости ВМ1... М1. На первом этапе освоения новой технологии использовали инструмент производства австрийской фирмы Tyrolit, а в последующем – шлифовальные круги отечественного производства на основе электрокорунда белого с реакционно-активными керамическими связками К5ПГ, К20ПГ и др. В качестве порообразующих материалов использовался перлит, в настоящее время – фруктовые косточки.

Процесс глубинного шлифования осуществляется только мягкими высокопористыми кругами с режимом обработки: скорость круга 20...35 м/с, скорости движения детали от 10 мм/мин до 10 м/мин, глубина резания 0,01...10 мм и более за проход.

Технологические средства для реализации новой технологии включали также специальное оборудование повышенной жесткости с многофункциональной системой использования под большим давлением смазочно-охлаждающей жидкости, правочные устройства и профильные алмазные правящие ролики и др.

Процессы глубинного шлифования высокопористыми кругами обеспечивают обработку всех поверхностей различных типов замков турбинных лопаток авиационных двигателей, газоперекачивающих и энергетических установок, включая елочный профиль. При этом замена ранее применявшихся методов лезвийной обработки (протягивание, фрезерование) позволила повысить производительность в 4 раза, точность в 2 раза и снизить в 2 раза параметры шероховатости обработанных поверхностей. Значительно повысилась работоспособность замкового соединения турбинных лопаток.

Два важных обстоятельства ставят технологию глубинного шлифования деталей из жаропрочных никелевых сплавов в ряд наиболее значимых достижений теории и практики обработки резанием. Доказано, что шлифование высокопористыми кругами как технологический процесс съема материала может эффективно совмещать предварительную и чистовую обработки в одной операции. При этом оптимизация условий глубинного шлифования обеспечивает не только высокую производительность, но и вопреки практике шлифования – наиболее благоприятное для эксплуатации формирование свойств поверхностного слоя детали: сжимающие, а не растягивающие напряжения, минимальный наклеп, а также ше-

1.14. Примеры практического применения высокопористых шлифовальных кругов

Операция	Модель станка	Марка стали	R_a , мкм	Припуск на сторону, мм	Тип и размеры круга	Характеристика круга	Стойкость круга между правками, рабочие ходы	Общая стойкость круга, дет.	Наличие прижогов
Шлифование профиля червячной фрезы	"Мичиган" (США)	Р6М5	0,63... 0,32	0,4... 0,5	14 75×10× ×9	44A16 C1 K 44A12C210K5 B20 15	1	3	Имеются Нет
						2	5		
То же	Фи-6153	Р9К10	0,63... 0,32	0,4... 0,5		44 A16 C1 K 44A16C210K5 B40 15	1	3	Имеются Нет
						2	4		
То же	"Икедай" (Япония), "Клингленберг" (ФРГ)	Р9К10	0,63... 0,32	0,4... 0,5	1 100× ×13×20	44A 16 M3 K 44A16CM211K5 B50 20	2	5	Имеются Нет
						3	8		
Затылование профиля червячной фрезы	"Икедай" (Япония), "Клингленберг" (ФРГ)	Р9К10	0,63... 0,32	0,5... 0,7		44A 16 C2 K 24A(44A)16CT211K5 B40 20	5	8	Имеются Нет
						10	10		

Продолжение табл. 1.14

Операция	Модель станка	Марка стали	Ra, мкм	Припуск на сторону, мм	Тип и размеры круга	Характеристика круга	Стойкость круга между правками, рабочие ходы	Общая стойкость круга, дет.	Наличие прижогов
Заточка конусных дисков	Внутришлифовальный	P6M5	0,32... 0,16	0,5...0,7	5 63×50×20	44A 40 CM 1K 44A40CM210 K8 B40 15	— —	2 3	Имеются Нет
Шлифование отверстий фрез, шевров и червячных фрез	Внутришлифовальный CT-1395	P9Ф5 P9K10 P6M5	1,25... 0,63	0,3	5 35×32×10	44A 25 CM2 K 24A(44A)25C110 K8 B40 15	7 10	80 100	Имеются Нет
Шлифование криволинейной поверхности статора	Внутришлифовальный "Брайант" (США)	ШХ15	0,32... 0,25	0,5	5 16,8×29×6 5 18×29×6 (СССР)	23A 80 L6 VBE "Нортон" (США) 44A12C210 K8 B32 15	— —	40...50 50...60	Имеются Нет
Шлифование винтовой канавки шариковой гайки гидротурбины	"Матрикс" Англия	25ХГТ	0,32... 0,16	0,7...0,8	1 30×8×6	44A 8 CT2 Б 44A8C210 K8 B32 15 импрегнирован специальным составом	— —	15...20 25...35	Имеются Нет

роховатость и точность, характерные для финишной обработки.

Второе обстоятельство заключается в том, что хорошие результаты достигнуты в экстремальных термодинамических условиях обработки жаропрочных литейных сплавов на никелевой основе, которые относятся к группе материалов, наиболее труднообрабатываемых резанием: уровень допустимой скорости резания для них до 20 раз ниже, чем для стали 45. Эти сплавы сохраняют свою прочность вплоть до температур шлифования за счет упрочнения интерметаллидной γ' -фазой и выделениями избыточных карбидов и других интерметаллидов с объемным содержанием в сплаве до 50 % и более. Микротвердость их либо больше, либо сопоставима с микротвердостью абразивных зерен шлифовального круга. Твердые дисперсные включения разрушают абразивные зерна, а вязкая никелевая основа сплавов при высоких температурах химически взаимодействует с рабочей поверхностью инструмента, резко снижая его работоспособность при маятниковом шлифовании.

Высокопористые круги на основе карбида кремния эффективно используются также при глубинном шлифовании деталей из титановых сплавов [52, 88].

Многолетняя практика использования высокопористых абразивных кругов с открытой структурой в машиностроении подтверждает их высокую эффективность при различных видах обработки шлифованием как на традиционных операциях маятникового шлифования, так и при переходе на схему профильного глубинного шлифования, а также на операциях высокоскоростного внутреннего шлифования и др. При использовании высокопористых шлифовальных кругов достигается повышение производительности обработки до 2–3 раз при обеспечении высокого качества обработанной поверхности (отсутствие прижогов, трещин, сколов) на традиционных операциях маятникового шлифования деталей из различных магнитных материалов, никелевых и титановых спла-

вов, сталей, чугунов и др.

Этот эффект происходит за счет повышения режущих свойств шлифовального круга при работе его в режиме "самозатачивания", а также за счет его высокой износостойкости. Обработанная поверхность имеет высокие показатели качества, при этом достигается практически полное исключение прижогов, трещин и других дефектов. Это осуществимо за счет уменьшения силы шлифования на 20...30 %, а также температуры шлифования, что позволяет в ряде случаев обрабатывать детали без охлаждения и увеличивать глубину обработки до 2 и более раз.

1.3. КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТЬ АБРАЗИВНОГО ИНСТРУМЕНТА

Основными показателями качества абразивных кругов согласно ГОСТ 2424–83, в том числе высокопористых, являются: геометрическая точность форм и размеров, твердость, дисбаланс, механическая прочность. При этом твердость должна соответствовать заданной, разброс ее значений допускается в пределах одной степени, механическая прочность должна обеспечить работу кругов с рабочими скоростями, указанными в стандарте (до 80 м/с для типа 1), точность размеров ограничивается определенными допусками и др.

На рис. 1.10 показаны показатели качества абразивного инструмента и их взаимосвязь с потребительскими свойствами при шлифовании.

В условиях рынка при наличии большого количества однотипной продукции, качество изготовления не всегда является главным критерием целесообразности ее приобретения и использования. Конкурентоспособность абразивного инструмента подразумевает не только стандартные показатели качества и стоимость, но также такие свойства, которые определяют его повышенную эффективность в эксплуатации в сравнении с другим аналогичным инструментом.



Рис. 1.10. Показатели качества абразивного инструмента

К таким свойствам можно отнести сочетание повышенной износостойкости с гарантированным обеспечением бесприжогового шлифования в широком диапазоне режимов обработки, возможность совмещать черновую и чистовую обработки, достижение больших съёмов материалов при высоких скоростях резания, шлифование без использования смазочно-охлаждающих средств и т.д.

Чтобы установить оптимальное сочетание цена–качество, фирмы-изготовители предлагают разнообразный выбор по материалам абразива, их комбинациям как по составу, так и по зернистости. Рекомендуются также различные связки, в том числе низкотемпературные, адаптированные к конкретным технологическим операциям шлифования и др.

Опыт промышленного применения абразивного инструмента и особенно высокопористого, как наиболее прогрессивного и перспективного, показал, что для оценки конкурентоспособности абразивных кругов в настоящее время стандартных критериев качества недостаточно. Необходимо оценивать конкурентоспособность и соответственно качество абразивных кругов по таким дополнительным

показателям, как стабильность твердости в объеме инструмента, деформация (усадка) круга при его обжиге, разрывная прочность как показатель предельной рабочей скорости, минимальный дисбаланс и др.

Известно, что стабильность твердости абразивного круга оказывает существенное влияние на интенсивность и стабильность его изнашивания, качество обработки (шероховатость поверхности, формирование физико-механических свойств поверхностного слоя детали, вероятность появления прижогов, трещин и т.д.) и др. Практика промышленного изготовления абразивных кругов, и особенно высокопористых, показывает, что, безусловно, на стабильность твердости оказывает влияние технология изготовления и используемое при этом оборудование. В неменьшей степени на стабильность твердости как в одном инструменте, так и в партии инструментов оказывает состав высокопористой абразивной массы, оптимизация которой и обеспечение ее однородности позволяют управлять стабильностью твердости.

Необходимо обратить внимание на характерную особенность, которую образно можно определить как фатум-

свойство или неизбежный дефект изготовления шлифовальных кругов. Круги перед обжигом укладываются на торцы, и при их нагреве происходит перераспределение состава. В результате своеобразной фазии (по аналогии с осадкообразованием в минералогии) под действием высоких температур и гравитационных сил плотность и соответственно твердость нижней части абразивного инструмента становится больше, чем на его верхней половине. Несоответствие твердости может достигать 2–3 степеней и зависит от рецептурного состава шлифовального круга, его высоты и условий обжига.

От эффективности применяемых для решения этой проблемы методов и средств будет зависеть получение инструмента с однородными по его объему свойствами.

Деформация кругов при обжиге, и особенно высокопористых, является одним из основных показателей их качества, так как существенно влияет на изменение формы инструмента и его геометрических размеров, объем удаляемого при механообработке абразивного материала и фактическую пористость (номер структуры) круга.

Важным параметром конкурентоспособности инструмента является его рабочая скорость при эксплуатации: увеличение скорости резания позволяет увеличить производительность и качество обработки, перераспределить тепловые по-

токи в зоне обработки с уменьшением нагрева обрабатываемой детали, уменьшить износ инструмента и т.д.

При прочих равных условиях инструмент, работающий при более высоких скоростях резания, будет предпочтительней инструмента, работающего с более низкими скоростями. Более прочный инструмент выдерживает более высокие нагрузки и эффективно работает с глубинами резания до 3 раз больше, чем шлифовальный круг, изготовленный для рабочей скорости 35 м/с. Особенно это актуально для высокопористых шлифовальных кругов, учитывая, что существующие технологии изготовления высокопористых кругов с открытой структурой обеспечивают лишь обработку при скорости резания до 35...50 м/с.

Конкурентоспособность шлифовальных кругов возрастает с увеличением номера структуры: применение инструмента 8...9 структур, например, в сравнении со структурами 5...7 при практически одинаковой стоимости снижает риск появления дефектов шлифовочного характера при возможном увеличении скорости съема материала до 30 %. Освоение производства высокопористых шлифовальных кругов с повышенной рабочей скоростью, однородным распределением твердости в объеме инструмента при его минимальном дисбалансе являются перспективным направлением развития абразивного инструмента.

Глава 2

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ПРИМЕНЕНИЯ ВЫСОКОПОРИСТЫХ ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ

Многочисленные экспериментальные исследования и производственный опыт внедрения высокопористого абразивного инструмента свидетельствуют о безусловной его эффективности на различных операциях шлифования. При его использовании повышается производительность, уменьшаются силы и температура в зоне резания, снижается или устраняется риск появления дефектов шлифовочного характера, улучшается физико-механическое состояние поверхностного слоя обработанной детали.

Указанные достоинства высокопористых шлифовальных кругов, однако, не прогнозируются из классических представлений теории шлифования. Современная теория шлифования построена на фундаментальных работах П.Е. Дьяченко, Е.Н. Маслова, С.А. Попова, В.И. Островского, Г. Опитца, Е. Мерчанта, Я. Пекленника и многих других, не менее известных и уважаемых исследователей. В ее основе лежат кинематические соотношения взаимодействия шлифовального круга с обрабатываемой поверхностью детали, из которых, как следствие, формализуются термодинамические условия шлифования.

Ниже приведен теоретический анализ строения абразивного инструмента и его связь с механизмом съема материала при шлифовании. В этом анализе удалось, по мнению автора, устранить противоречия существующих теоретических моделей и дать научно обоснованные предпосылки управления процессом шлифования путем изменения структуры и других параметров строения шлифовального круга.

2.1. СТРУКТУРНАЯ МОДЕЛЬ СТРОЕНИЯ АБРАЗИВНОГО ИНСТРУМЕНТА

Теория шлифования как наука началась с анализа строения шлифовального круга. Первой отечественной работой в этом направлении стала монография П.Е. Дьяченко, опубликованная в 1939 г. [20]. В ней были систематизированы сведения о составе шлифовальных кругов по содержанию, формам, размерам и свойствам абразивных зерен, связки и пор.

П.Е. Дьяченко впервые рассчитал количество абразивных зерен и определил характеристики их распределения в объеме инструмента и на его поверхности. При этом он предложил модель зерна в виде шара, обосновывая ее тем, что в процессе размалывания при последовательном откалывании частиц от зерна оно стремится образовать форму с поверхностью минимального размера, т.е. шарообразную.

В работе [20] была также теоретически и экспериментально обоснована связь между объемным строением шлифовального круга и его работоспособностью, включая износ инструмента, интенсивность съема материала и теплообразование при шлифовании.

Последующее развитие теории шлифования подтвердило тесную связь между объемным строением абразивного инструмента и его свойствами с кинематическими, термодинамическими и экономическими показателями процесса шлифования.

В общепринятом смысле понятие "структура" — это строение или устройство исследуемого объекта (лат. *structura* — расположение, порядок) и рассматривается как совокупность устойчивых связей объекта, обеспечивающих его целостность и тождественность самому себе. В соответствии с этим определением предметом структурного моделирования строения абразивного инструмента является изучение закономерностей распределения его основных составляющих элементов — абразивных зерен.

Абразивный инструмент состоит, как уже отмечалось, из абразивных зерен, соединенных связкой, и пор вокруг них, которые сформировались в процессе его изготовления. Объемное строение инструмента нормальных структур определяется формой, размерами и количеством абразивных зерен и пор, а также характером их распределения в объеме. В абразивном инструменте с высокими номерами структур, а также в инструменте из сверхтвердых материалов — алмаза и кубического нитрида бора — присутствуют кроме зерен основного абразивного материала еще и иные твердые компоненты: зерна другого абразивного материала в качестве наполнителя, невыгорающие порообразователи, остатки невыгоревших до конца выгорающих порообразователей органического или неорганического происхождения и др.

Указанные компоненты формируют пространственную каркасную структуру абразивного инструмента с присущими для нее физико-механическими свойствами: сопротивлением внешнему воздействию, теплопроводностью и теплоемкостью, демпфирующими свойствами и т.д. Комбинация этих свойств в конечном итоге определяет работоспособность инструмента, включая его режущие свойства, допустимый уровень скоростей резания, производительность процесса съема материала, интенсивность термодинамического воздействия на обрабатываемую деталь, период стойкости инструмента

между правками и его ресурс эксплуатации в целом.

Моделирование формы зерен и их распределения в объеме инструмента. Это главный вопрос строения абразивного инструмента и теории абразивной обработки.

Основными характеристиками распределения зерен в абразивном инструменте являются их содержание в единице объема и среднее расстояние между ними. В шлифовальном круге диаметром 400...500 мм находится порядка $10^8 \dots 10^9$ абразивных зерен, более точное количество которых обусловлено размерами круга, материалом и зернистостью абразива. Из-за большого числа и более-менее однородного распределения в объеме абразивного инструмента в расчетах принимается, что зерна равноудалены от своих соседей на среднее расстояние l_v . Значение l_v зависит от материала абразива, его зернистости и объемного содержания в инструменте (номера структуры).

Е.Н. Маслов [44] предложил рассчитывать среднее расстояние между зернами в объеме инструмента по формуле

$$l_v = \sqrt[3]{\frac{100000}{(62-2)N\gamma n}} \quad (2.1)$$

в зависимости от номера структуры N , плотности в г/см^3 и числа зерен n в 1 г.

Величина n для абразивных зерен зернистостью в диапазоне от 12 до 40 составляет порядка $10^4 \dots 10^5$, поэтому их точная оценка под микроскопом является весьма трудоемкой и малопривлекательной для исследователя процедурой. По этой причине в литературе имеются данные по числу зерен в единице массы лишь по отдельным материалам и зернистостям.

Более удобным и продуктивным направлением расчетного определения статистических характеристик распределения зерен в абразивном инструменте стало моделирование их формы в виде правильных геометрических фигур.

Моделирование формы абразивных зерен. Процесс размалывания полуфабрикатов абразивного материала не может обеспечить правильной геометрической формы получающихся абразивных зерен. В зарисовках характерных форм абразивных зерен у Е.Н. Маслова [44] и В.Д. Ваксера [6] наиболее часто встречаются формы, напоминающие октаэдр, восьмигранную дипирамиду, тригональный трапециод, ромбический тетраэдр, трехгранную призму и многие другие формы. Обилие возможных форм абразивных зерен затрудняет выбор их теоретической модели в качестве типового представителя.

Ситуацию с моделированием формы усложняет фактический гранулометрический состав абразивных зерен, используемых для изготовления инструмента. По ГОСТ 3647–80 (в ред. 1994 г.) и стандарту FEPA 32 GB 1971 в любом номере зернистости предусмотрены пять различных

фракций от предельно крупной до мелкой. Поэтому типовой представитель абразивного зерна должен характеризоваться не только типовой формой, но и размерами, адекватно отображающими фракционный состав зернистости.

В работе Д.В. Ваксера [6] приведены результаты обстоятельного морфологического измерения абразивных зерен из различных материалов и их зернистостей. Им были исследованы формы, размеры, радиусы скруглений и углы при вершинах у зерен из электрокорунда нормального (Э) и белого (ЭБ), монокорунда (М), карбида кремния черного (КЧ) и зеленого (КЗ) зернистостью 40, 25, 16, 3 и M28.

В табл. 2.1 приведены обобщенные результаты по средним значениям длины l , ширины b , высоты h , радиуса скругления ρ и угла β вершины абразивных зерен из различных материалов для шести зернистостей.

2.1. Морфологические характеристики абразивных зерен

Зернистость	Абразив	b , мм	$\frac{l}{b}$	$\frac{b}{h}$	$\frac{l}{h}$	ρ , мкм	β , °	% острых углов
40	Э	0,470	1,41	1,42	2,2	29	114	12,2
	ЭБ	0,451	1,41	1,47	1,9	30	108,6	20,0
	М	0,541	1,42	—	—	27	113,8	11,0
	КЧ	0,513	1,30	—	—	31	110	18,0
	КЗ	0,456	1,47	—	—	27	105	53,3
25	Э	0,390	1,39	1,66	2,3	2,1	—	—
	ЭБ	0,315	1,61	1,32	2,08	—	108	20,0
	КЧ	0,320	1,52	—	—	17,5	109,9	18,0
16	Э	0,240	1,36	1,9	2,63	—	—	—
	ЭБ	0,210	1,53	2,05	2,5	14,5	111	23,3
	КЧ	0,206	1,55	—	—	12	100,6	28,6
	КЗ	0,228	1,53	2,05	2,5	14,5	111	23,3
12*	ЭБ	0,156	1,51	1,61	1,96	9	—	—
	КЗ	0,169	1,51	1,61	1,96	9	—	—
3	ЭБ	0,046	1,83	—	—	3,8	97,0	42,0
	КЗ	0,033	1,64	—	—	3,5	98,5	45,0
M28	ЭБ	0,024	1,67	—	—	2,7	92,5	43,0
	КЗ	0,020	1,61	—	—	2,3	90,6	46,0

* Данные получены автором расчетной экстраполяцией.

2.2. Обобщенные результаты измерений линейно-геометрических параметров абразивных зерен

Зернистость	l , мм	b , мм	h , мм	ρ , мкм	β , °
40	0,70	0,466	0,331	28	110
25	0,66	0,340	0,266	19	108,5
16	0,40	0,220	0,134	13	106

Статистический анализ результатов измерений подтвердил наличие тесной корреляции между материалом абразива и его зернистостью, с одной стороны, и линейно-геометрическими параметрами, с другой. Эта корреляция обусловлена особенностями кристаллографического строения и, прежде всего, числом и ориентацией плоскостей скалывания, наличием дефектов кристаллического строения, твердостью, способом размалывания и т.д. Однако несмотря на разнообразие форм и большое рассеяние размеров исследованных характеристик была установлена статистическая связь между номером зернистости и линейно-геометрическими параметрами, общая для корунда и карбида кремния различных модификаций (табл. 2.2).

Если усреднить размеры l , b и h независимо от зернистости абразива, то их

соотношение будет равно $1,7 : 1 : 0,71$. Близкое к этим данным соотношение размеров получено И.В. Лавровым и Т.Б. Ермаковой ($1,5 : 1 : 0,7$), причем оно сохраняется неизменным независимо от размеров абразивных зерен.

Наличие статистической связи между зернистостью и линейно-геометрическими параметрами установлена также и для зерен из синтетических алмазов марки АСО и эльбора марки ЛО (табл. 2.3) [102].

Для решения различных задач, связанных с распределением зерен в абразивном инструменте, необходимо знать объем и площадь поверхности отдельного зерна. Независимо от своей формы каждое зерно имеет длину l и высоту h , значения которых могут быть усреднены для конкретной зернистости и материала абразива. В этой связи абразивное зерно можно условно представить в виде приз-

2.3. Обобщенные результаты измерений линейно-геометрических параметров зерен из синтетических алмазов и эльбора

Зернистость	l , мм	b , мм	h , мм	ρ , мкм	β , °
Для зерен из синтетических алмазов					
250/200	0,304	0,221	0,163	7,8	84
100/80	0,146	0,100	—	3,2	76
63/50	0,084	0,066	—	2,6	71
Для зерен из эльбора					
160/125	0,214	0,157	—	9,5	86
100/80	0,135	0,099	—	6,5	84
63/50	0,088	0,066	—	4,6	79

мы с объемом и площадью боковой поверхности, легко рассчитываемыми по размерам l , b , и h . Если расчетные значения объема и площади призмы в соответствии с данными табл. 2.1 привести к объему и площади шара, то для зерен корунда и карбида кремния различных модификаций и зернистостей с погрешностью в пределах $\pm 7\%$ можно получить следующий характеристический размер абразивного зерна:

$$A = 1,42 A_3. \quad (2.2)$$

Размер A – это диаметр шара, который по объему и площади почти адекватен зерну, для которого величина A_3 определяет его зернистость (для зернистости 40 размер A_3 , например, равен 0,4 мм, для 16 зернистости – 0,16 мм и т.д.).

Представление абразивного зерна в виде шара является условным и требуется для решения задач объемного распределения зерен в инструменте. Такой подход очень популярен в теории абразивного инструмента, и его использовали П.Е. Дьяченко, Н.И. Волский, Г.Б. Лурье, В.И. Островский и др. Предполагается, что модель (2.2) универсальна для зерен из корунда и карбида кремния независимо от их зернистости. Для получения более точных оценок, учитывающих материал абразива и его размеры, можно воспользоваться данными, приведенными в работах Д.Б. Ваксера, И.В. Лаврова и Т.Б. Ермаковой.

Объемное распределение зерен. В соответствии с предложенной моделью абразивного зерна в виде шара рассмотрим основные статистические характеристики их распределения в объеме и на рабочей поверхности инструмента. С учетом относительного объемного содержания абразивных зерен V_3 , их число в 1 мм^3 равно:

$$Z_v = \frac{6}{\pi} \frac{V_3}{A^3} = 0,667 \frac{V_3}{A_3^3}. \quad (2.3)$$

При сечении объема, заполненного зернами, плоскостью в произвольном на-

правлении можно определить их число на единице площади поверхности в 1 мм^2 через

$$Z_s = Z_v^{2/3} = 0,763 \frac{V_3^{2/3}}{A_3^2}. \quad (2.4)$$

Среднее расстояние или шаг зерен в объеме инструмента или на площади сечения его плоскостью одинаково и равно:

$$l_v = \frac{1}{\sqrt{Z_s}} = 1,145 \frac{A_3}{\sqrt[3]{V_3}}. \quad (2.5)$$

В работе [6] приведен обзор данных по определению числа зерен на 1 мм^2 поверхности шлифовального круга различной зернистости. Обобщение результатов определения числа зерен по различным методикам семью исследователями дает следующие диапазоны их рассеяния: для зернистости 40 – 2,5...7,4 шт/мм², для зернистости 25 – 5,3...15,5 шт/мм² и для зернистости 16 – 9,4...30 шт/мм². Аналогичные значения получены расчетом по (2.4): соответственно 3,0, 7,6 и 18,8 шт/мм², т.е. все они попадают в поле рассеяния приведенных данных.

На рис. 2.1 показано изменение числа зерен Z_s , рассчитанное по (2.4), а на рис. 2.2 – изменение расстояния между ними l_v для зернистостей 12, 16, 25 и 40 в зависимости от номера структуры абразивного инструмента. Объемное содержание зерна оказывает более сильное влияние на их количество на единице поверхности, чем на средневероятное расстояние между ними: при увеличении номера структуры от 6 до 26 число зерен Z_s возрастает почти в 3 раза, а расстояние между ними l_v – только в 1,7 раз.

Из анализа приведенных рисунков следует, что влияние номера структуры на распределение зерен в абразивном инструменте более существенно проявляется при зернистости 16 и менее. Практика также подтверждает, что повышение номера структуры шлифовальных кругов от 6 до 10...12 и более для диапазона зернистостей 6...16 способствует значительному

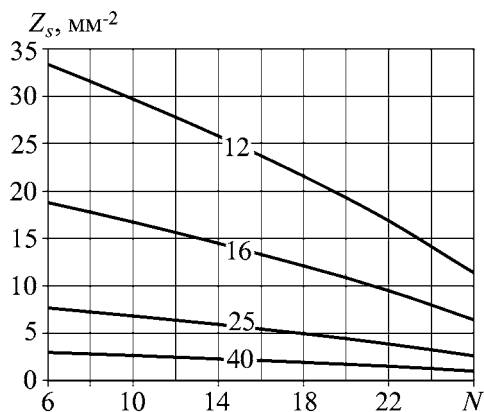


Рис. 2.1. Расчетная зависимость числа зерен разной зернистости на поверхности абразивного инструмента от номера его структуры

повышению эффективности процесса шлифования. В меньшей степени этот эффект проявляется для зернистости 25 и практически неощутим при шлифовании кругами зернистостью 40. Из расчета по формуле (2.3), например, следует, что у абразивного инструмента зернистостью 40 при увеличении номера структуры от 6 до 12 число зерен в 1 мм^3 объема уменьшается с 5,2 до 4, что, естественно, очень слабо отразится на термодинамической напряженности процесса шлифования. Для примера, у инструмента зернистостью 6 расчетное уменьшение числа зерен с повышением номера структуры составляет от 1544 до 1173 штук в 1 мм^3 .

С другой стороны, качественно изготовить крупнозернистый абразивный инструмент со структурами 10...12 и более технологически достаточно сложно именно из-за небольшого числа зерен в объеме. По этой же причине такое изготовление и нецелесообразно, так как в производственных условиях часто крупнозернистые круги используют как высокопористые для предотвращения дефектов шлифовочного характера при обработке.

Следует отметить, что рассчитанное по формуле (2.5) средневероятное рас-

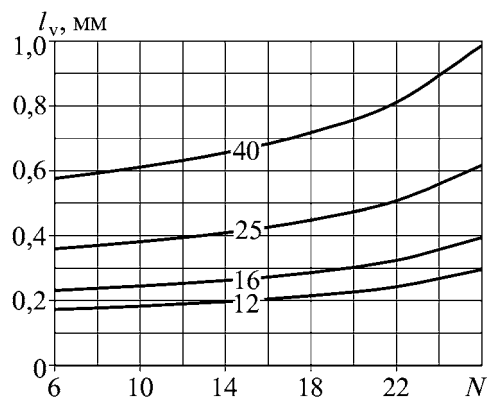


Рис. 2.2. Теоретическое расстояние между зернами разной зернистости в объеме абразивного инструмента в зависимости от номера его структуры

стояние l_v является по существу расстоянием между центрами абразивных зерен в объеме инструмента и может рассматриваться только как характеристика его объемного строения, обусловленная размерами и содержанием абразива.

С.А. Попов впервые обратил внимание на то, что на схему стружкообразования и процесс шлифования в целом оказывает влияние средневероятное расстояние между абразивными зернами на рабочей поверхности круга, а не в его объеме. Поэтому, для реального отображения механизма взаимодействия шлифовального круга с обрабатываемой деталью необходимо знать и учитывать реальное состояние рабочей поверхности инструмента.

Статистическая модель распределения зерен на рабочей поверхности инструмента. Фактическое распределение зерен на рабочей поверхности абразивного инструмента после его правки или формирующееся в процессе обработки значительно отличается от теоретического. Это различие обусловлено тем, что при правке или в процессе шлифования не все зерна, находящиеся в объеме инструмента, вскрываются для участия в съеме материала. На поверхности инструмента

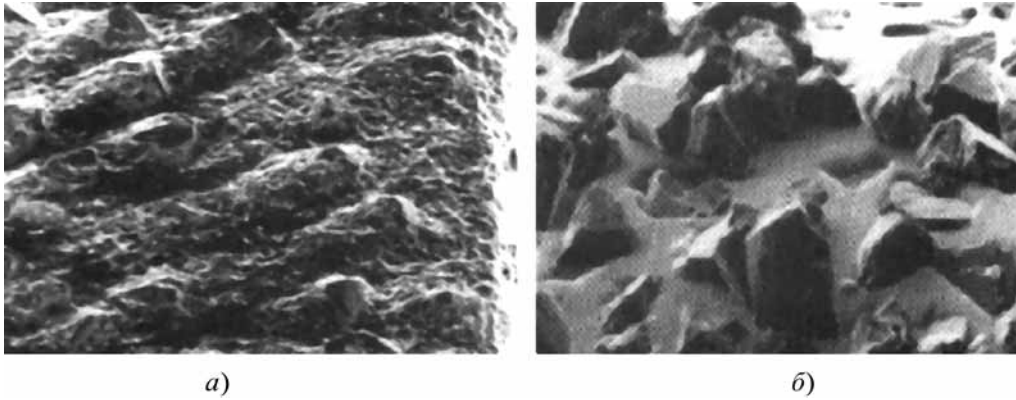


Рис. 2.3. Рабочая поверхность алмазного круга на гальванической связке (а) и шлифовального круга из КНБ на бакелитовой связке (б) (фото фирмы Winter)

находится только часть абразивных зерен из расчетного числа, определяемого по формуле (2.4).

Особенностью рельефа рабочей поверхности абразивного инструмента является наличие разноразмерности зерен, выступающих над уровнем связки и удерживаемых ею. Экспериментально измерить указанную разноразмерность зерен и оценить соответственно характеристики распределения их вершин над уровнем связки весьма сложно. Связано это с тем, что рабочая поверхность абразивного инструмента, по существу, это часть его объема с высотой e_p , равной высоте максимально выступающей из связки вершины зерна. При этом понятие "уровень связки" весьма неопределенное. У инструмента на металлической или органической связке еще можно обнаружить достаточно плотную поверхность, над которой возвышаются абразивные зерна (рис. 2.3). У абразивного инструмента на керамической связке даже нормальных структур такой поверхности не наблюдается (рис. 2.4), не говоря уже о структуре с повышенной пористостью. В этом случае топография поверхности содержит множество различных твердых компонентов, включая зерна переменного гранулометрического состава, и представляет собой сложную объем-

ную конфигурацию с развитой системой порового пространства.

К этому необходимо добавить, что выступающие из связки зерна имеют случайную ориентацию, а их вершины неравномерно распределены по высоте над уровнем связки. Все это вместе взятое в сочетании со случайным по характеру рассеянием значений радиусов округления, углов заострений, форм режущих кромок и физико-механических свойств абразивных зерен, расположенных на рабочей поверхности инструмента, создает

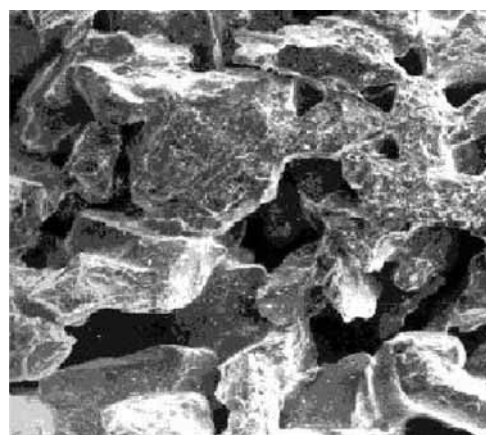


Рис. 2.4. Рабочая поверхность шлифовального круга с характеристикой 14А 40 СМ1 6 К [37]

геометрию режущего рельефа абразивного инструмента.

При анализе состояния рабочей поверхности абразивного инструмента исследователи используют различные определения. Некоторые из них пользуются понятием "шероховатость рабочей поверхности круга" по аналогии с обработанной поверхностью детали, а большинство – "разновысотность зерен", вкладывая, правда, в это понятие разный смысл.

Л.А. Глейзер, например, принимал за разновысотность расстояние между смежными по высоте зернами, которые расположены на 1 см длины контакта шлифовального круга с изделием. И.И. Тимофеев предложил определять разновысотность зерен как максимальное расстояние между наиболее удаленными вершинами зерен по высоте, расположенных на периферии шлифовального круга.

Наиболее удачное, на взгляд автора, определение разновысотности дал В.Д. Сильвестров [54], который рассмотрел ее как разность высот расположения вершин самого высокого и самого низкого зерен в поле зрения микроскопа. Им же был предложен оригинальный, но трудоемкий метод фотостереограмметрирования для топографической съемки участков поверхности абразивного инструмента и их последующего анализа для количественной оценки разновысотности.

Исследователи, которые занимались распределением зерен на поверхности абразивного инструмента, на основании своих экспериментов давали различные интерпретации характера этого распределения. Распределение вершин зерен над рабочей поверхностью отождествляется с законами логарифмически-нормального, нормального, равномерного, бета- и гамма-распределений и др.

В этой связи М.Д. Узунян [89] высказал предположение, что существует общее теоретическое распределение вершин зерен над поверхностью, которое описывается функцией плотности распределения по высоте при $0 < \delta < 2b - h$ сле-

дующего вида:

$$f(\delta) = \frac{2}{\pi} \varphi_{кр}(\delta) \frac{Z_v}{Z_s}, \quad (2.6)$$

где $\varphi_{кр}(\delta)$ – угол, которым характеризуется фиксированное значение δ (угла между вертикальной и большой осями абразивного зерна), равный

$$\varphi_{кр} = \arcsin \frac{1}{k} \sqrt{1 - \frac{(\delta + h)^2}{4b^2}}, \quad (2.7)$$

где h – минимальная глубина заделки зер-

на в связке, $k = \sqrt{1 - \frac{a^2}{b^2}}$; a, b – меньшая и

большая полуоси эллипсоида вращения принятой формы абразивного зерна.

В предложенных формулах (2.6) и (2.7) дается статистическое обобщение координат вершин зерен над рабочей поверхностью круга, исходя из равновероятности их пространственного положения, которое определяется ориентацией по высоте выступания $2b - h$ и углу наклона δ .

Поскольку в процессах правки и шлифования происходят сопутствующие процессы разрушения и изнашивания зерен, интенсивность которых зависит от характеристики инструмента и технологических условий обработки, то в каждом конкретном случае на поверхности шлифовального круга будет формироваться своя топография и адекватное распределение зерен по высоте.

Автором была предпринята попытка теоретически определить характеристики распределения зерен с учетом их разновысотности на рабочей поверхности шлифовального круга. Основная посылка рассуждений следующая: фактическое число зерен на рабочей поверхности круга равно только той части зерен, которая удерживается связкой и распределена по высоте e_p над уровнем связки. Фактическое число зерен на рабочей поверхности было определено путем решения задачи, известной в теории вероятности как "задача Бюффона",

с начальными условиями, адаптированными к абразивному инструменту. Подробно постановка и решение этой задачи была впервые описана в работе [78].

Вероятность того, что вершина зерна, случайным образом ориентированного в пространстве, имеющего размеры, равные средневероятному расстоянию l_s между соседними зернами, будет находиться над уровнем связки на высоте, не превышающей разнорысотность e_p , определяется выражением:

$$P_e = \frac{2e_p}{A_3} \sqrt{\frac{A_3}{e_p}} - 1, \quad (2.8)$$

а соответствующее число зерен, которое будет на поверхности круга с высотой выступания над уровнем связки не более чем на e_p , равно:

$$Z_3 = P_e Z_s. \quad (2.9)$$

На рис. 2.5 показан характер изменения интегральной вероятности P_e в зависимости от отношения e_p/A_3 , изменение которого рассчитано по формуле (2.9).

Формула (2.8) определяет интегральную вероятность распределения вершин абразивных зерен над уровнем связки, начиная от максимально удаленной вершины. Она функционально связана не с высотой выступания зерен над поверхностью, а с относительной величиной (e_p/A_3) размера абразивного зерна. Поэтому в формуле (2.8) содержится не характеристический размер A (2.2), а более удобная для расчетов величина A_3 .

Из расчета по (2.9) следует, что уже при значении e_p , равном 2,5 % от размера зерна, на поверхности находится 31,2 % от теоретически возможного числа абразивных зерен (см. рис. 2.5). При разнорысотности e_p , равной 5 % от размера зерна, их число возрастает до 43,6 %, а при $e_p = 0,1A_3$ увеличивается до 60 %. Максимальное количество абразивных зерен на рабочей поверхности инструмента в соответствии с формулой (2.8) будет в случае,

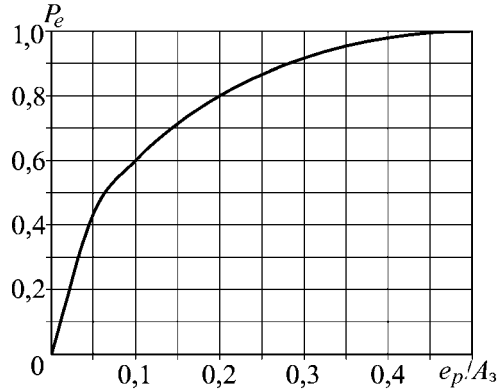


Рис. 2.5. Вероятность распределения количества зерен на рабочей поверхности абразивного инструмента в зависимости от отношения e_p/A_3

если режущий рельеф будет выступать над уровнем связки на половину размера зерна, т.е. при $e_p = 0,5A_3$.

Разнорысотность является очень важным параметром режущей способности шлифовального круга, от которого сильно зависит шероховатость обработанной поверхности детали: чем меньше значение e_p и больше зерен находится в зоне резания, тем меньше высота образующихся микронеровностей.

С разнорысотностью e_p связана и возможная производительность процесса шлифования по скорости съема материала. Г.М. Ипполитов справедливо отметил, что с увеличением степени разнорысотности зерен на рабочей поверхности круга в резании принимает участие меньшее число зерен [27]. Это приводит, по его мнению, к уменьшению средних значений толщины и объема срезаемых стружек и увеличению шероховатости обработанной поверхности. Разнорысотность расположения режущих зерен может стать причиной появления прижогов при шлифовании.

Помимо разнорысотности абразивные зерна неоднородно распределены по самой рабочей поверхности абразивного инструмента (рис. 2.6).

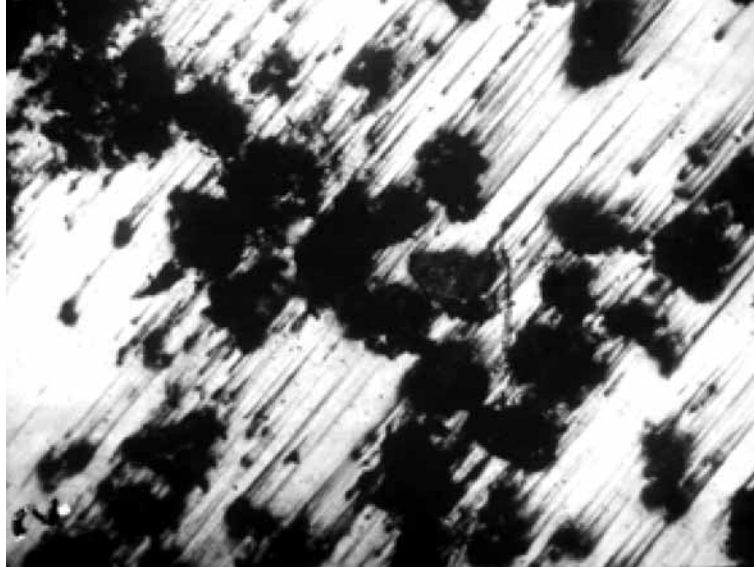


Рис. 2.6. Распределение зерен на рабочей поверхности алмазного круга на металлической связке. $\times 70$

Если при смешивании абразивной массы зерна имеют возможность свободно перемещаться в объеме шлифовального круга, то распределение расстояний между их центрами масс должно иметь чисто случайный характер. Такое статистически независимое распределение, которое формируется при отсутствии какого-либо взаимодействия между перемещаемыми зернами, является равномерно-случайным распределением и с большей достоверностью отождествляется показательным законом (см., например [77]), аналогичным распределению Пуассона:

$$\omega(l) = \frac{1}{\lambda} \exp\left(-\frac{l}{\lambda}\right), \quad (2.10)$$

где λ – параметр распределения, который в нашем случае равен среднему (расчетному) расстоянию между зернами l_v .

Показательный закон (2.10) характерен для объемных распределений твердых дисперсных включений в любых композиционных материалах.

Более сложная задача состоит в пространственном описании координат вершин абразивных зерен, выступающих над рабочей поверхностью инструмента.

Рабочая поверхность – это, по существу, стохастическая совокупность случайных величин, которую можно анализировать с позиций теории случайных функций нескольких независимых переменных. Принимая во внимание бессистемное размещение абразивных зерен на рабочей поверхности инструмента, можно считать, что последовательно расположенные профили статистически независимы и что при этом условии любой отдельный профиль дает достаточно полную характеристику данной поверхности. Однако если расположение абразивных зерен на поверхности шлифовального круга было подвергнуто упорядочению в сколько-нибудь значительной степени, для характеристики такой поверхности потребуется более обширный анализ.

Статистический анализ, который должен дать описание режущего профиля

рабочей поверхности абразивного инструмента, должен учитывать не только статистическое распределение высот зерен, но также и характер чередования зерен различной высоты.

Для подобного анализа Макадамсом предложено использовать понятие спектральной плотности $P(f)$, предложенное Фурье для анализа временного ряда. При этом надо будет сделать одно отклонение: частоту придется выражать через число циклов на единицу расстояния вдоль базовой линии, а не через число циклов в единицу времени, поскольку профиль является скорее функцией пространства, чем времени. Если спектральная функция абразивного профиля показывает, что значительная часть дисперсии вызывается компонентами сравнительно низкой частоты, такой профиль будет условно соответствовать "тупому". Если спектр показывает, что большая часть дисперсии вызывается компонентами с высокими частотами, такой инструмент будет считаться "острым". Сила, потребная для получения данной степени врезания абразивного инструмента, будет больше для "тупого" профиля, чем для "острого".

Спектральную плотность профиля можно представить как спектр, полученный пропусканием белого шума через фильтр с соответствующей передаточной функцией. Этот процесс может быть осуществлен с использованием аналоговых или цифровых вычислительных устройств. На практике чаще всего удобно использовать случайные числа, имеющие нормальное или гауссово распределение. Если обозначить последовательные случайные отклонения, распределенные по гауссовому закону, через X_n , тогда выходные величины J_n , моделирующие исходный профиль, могут быть определены из уравнения вида

$$J_n = \alpha J_{n-1} + \beta X_n; \quad n = 1, 2, 3.$$

В этом уравнении α – "регулируемая" постоянная, с помощью которой можно изменять частоту изломов кривой, а β дает возможность регулировать вы-

ходную величину, с тем чтобы получить требуемую полную дисперсию. В случае, когда имеются две или более "угловые" частоты, выходные величины, полученные из этого уравнения, могут быть профильтрованы вторично с новыми значениями α и β , подобранными таким образом, чтобы обеспечить требуемую спектральную плотность на выходе.

В работе [58] предложено моделировать реальную картину рабочей поверхности абразивного инструмента с позиций стохастической геометрии анизотропных случайных поверхностей. Стохастическая геометрия анизотропных случайных поверхностей предполагает, что все важные и существенные характеристики случайных функций, такие, как число пиков или вершин и число выбросов за данный уровень, можно выразить через моменты спектральных плотностей.

Статистические характеристики анизотропных поверхностей можно разбить на два основных класса. К первому классу принадлежат инварианты спектра поверхности, которые определяют общие геометрические характеристики поверхности безотносительно к каким-либо принятым допущениям о вероятностном законе распределения высот поверхности. Ко второму классу относятся различные статистические характеристики, такие, как плотность вершин выступов на единицу площади поверхности, дисперсия абсолютного углового коэффициента, главные направления, максимальное и минимальное значения среднего квадрата углового коэффициента, число пересечений профилограммой произвольного уровня (в том числе и нулевого) с положительной производной и средняя плотность максимумов на единицу длины профилограммы.

Особенностью этого подхода является анализ только уже имеющихся случайных поверхностей, его нельзя применить для прогнозирования пространственного распределения зерен в зависимости от предполагаемой характеристики инструмента.

Динамика изменения разноразмерности зерен при правке и шлифовании. У абразивного инструмента как формообразующего инструмента есть уникальное свойство ремонтантности или регенеративности, т.е. способность воспроизводить или возобновлять свою режущую способность. Это свойство реализуется как при правке, так и при шлифовании в условиях частичного или полного самозатачивания.

Формирование режущего рельефа рабочей поверхности шлифовального круга обусловлено его характеристиками по материалу абразива, зернистости, твердости и структуре, формой и прочностными свойствами зерен (а также связки), характером их распределения и закрепления в объеме инструмента и т.д. Этот комплекс свойств инструмента предопределяет в основном топографию его рабочей поверхности как при правке, так и при шлифовании.

В свою очередь, правка и шлифование оказывают влияние на формирование рабочего рельефа через характер и интенсивность динамического воздействия на абразивные зерна шлифовального круга.

Другим примечательным свойством абразивного инструмента является диверсификация развития его рабочей поверхности по различным сценариям в зависимости от характера и интенсивности действия нагрузки.

Очевидно, что сопротивление разрушению абразивных зерен больше, чем прочность керамической связки, соединяющая их. Поэтому трудно ожидать, что при первом же контакте зерна с правящим инструментом или обрабатываемым материалом оно может расколоться. Это произойдет только в том случае, если режущее зерно уже в исходном состоянии имеет дефекты кристаллического строения или микротрещины, которые существенно ослабляют его прочность.

Наиболее вероятна ситуация, при которой в течение некоторого времени абразивные зерна сохраняются на рабочей

поверхности инструмента, если прочность их закрепления связкой достаточна, чтобы препятствовать их вырыванию. В течение этого времени зерна подвергаются циклическому ударному воздействию, следствием которого становится накопление в локальных объемах в больших количествах искажений кристаллической решетки: дислокаций, вакансий, дислоцированных атомов и их скоплений. При достижении критической плотности дефектов кристаллического строения происходит скалывание микрообъемов абразивного зерна или его раскалывание по плоскостям спайности.

Описанный механизм соответствует физике разрушения хрупких тел, к которым относятся абразивные материалы. Аналогичным образом разрушаются и сверхтвердые алмазы при их обработке [18].

Формирование режущего рельефа рабочей поверхности шлифовального круга при его правке происходит под влиянием двух одновременно действующих факторов: прочности абразивного зерна и прочности удержания его связкой

$$P_{\text{н}} \geq P_{\text{с}}. \quad (2.11)$$

Прочность сцепления абразивного зерна со связкой определяется механическим охватом зерна связкой и физико-химическими силами сцепления зерна со связкой. Поэтому прочность удержания зерна связкой будет пропорциональна поверхности сцепления, т.е. части зерна, погруженной в связку, и удельной силе сцепления g . По этой причине более крупные абразивные зерна, имея большую поверхность сцепления при одинаковой относительной глубине заделки, будут прочнее удерживаться связкой, чем более мелкие зерна.

Тогда условие (2.11) можно записать в виде:

$$P_{\text{н}} > g(A_3 - e_p). \quad (2.12)$$

Зерна, которые по условию (2.12) удерживаются связкой, подвергаются ме-

ханическому воздействию и могут разрушаться с образованием новых режущих кромок. Сила, необходимая для разрушения абразивного зерна, меньше, чем сила, с которой оно удерживается связкой.

При прочном сцеплении зерна и связки абразивные зерна будут раскалываться, формируя рабочую поверхность с минимальной разнорысотностью. Сопротивление зерна разрушению зависит от материала абразива, его размеров, степени изометричности формы и метода получения. По данным А.Н. Короткова, зерна белого электрокорунда, например, в 1,17 раз прочнее, чем нормального, а монокорунда в 1,64 раза прочнее, чем зерна электрокорунда хромистого [32]. При уменьшении зернистости у электрокорунда марки 13А с 160 до 50 прочность зерен возрастает с 60 до 104 МПа или в 1,73 раза. Очевидно также, что более правильная или изометричная форма зерна лучше сопротивляется разрушению, чем пластинчатые или иглообразные его разнорысности.

При сосредоточенной нагрузке ударного действия формоизменение режущего профиля возможно по механизмам вырывания зерен из связки, их раскалывания и микроскалывания, а также комбинацией этих механизмов.

Из физики хрупкого разрушения, закономерностям которого подчиняется разрушение абразивных зерен, следует, что чем больше кинетическая энергия удара при правке, тем ближе друг к другу вектор скорости перемещения алмазных зерен правящего инструмента и траектория трещины раскалывания зерен на рабочей поверхности шлифовального круга.

Абразивные зерна разрушаются по механизму хрупкого разрушения с формированием поверхностей кристаллического излома по плоскостям скалывания. Направление этих поверхностей связано с их ориентацией относительно вектора разрушающей силы.

В соответствии с условиями (2.11) и (2.12) при правке будет формироваться

разнорысность, величина которой будет зависеть от материала абразива, его зернистости и твердости шлифовального круга.

Для крупнозернистых и мягких (ВМ1...М3) кругов разнорысность всегда больше, чем для мелкозернистых и твердых (с твердостью более СМ1) кругов. Этим объясняется то, что в первом случае круги обеспечивают более высокую производительность шлифования по съему материала и шероховатость обработанной поверхности детали с большей высотой микронеровностей, чем во втором случае.

Это свойство абразивного инструмента предопределено его характеристикой и может регулироваться выбором правящего инструмента и режима правки. Например, после грубой правки шлифовального круга с характеристикой 14А 40 СМ1 К большая часть зерен на поверхности имеет одну вершину (60 %) и только 19...21 % зерен являются многовершинными. При тонкой правке количество одноввершинных зерен уменьшается почти в 2 раза, а многовершинных возрастает в 2,5 раза. После тонкой правки 74 % вершин зерен не выступает более чем на 10 мкм от поверхности круга, а после грубой правки таких зерен не более половины от общего их числа [2].

Правка однокристалльными инструментами в форме зерна обеспечивает наиболее высокие режущие свойства шлифовальных кругов, а правка алмазными карандашами и пластинами их снижает из-за сглаживания режущего рельефа рабочей поверхности.

Разнорысность, сформированная при правке шлифовального круга, изменяется в процессе обработки. В начале работы с поверхности инструмента удаляются крупные осколки абразивных зерен, подвергшихся динамическому воздействию при правке. Как показал Ж.А. Багдасарян, степень диспергирования осколков (отношение их размеров к исходному размеру зерна) на этапе приработки резко воз-

растает, достигая 40 % [54]. Затем наступает период равномерного износа шлифовального круга в режиме его частичного самозатачивания: происходит постепенное откалывание выступающих кромок зерен мелкими порциями со степенью диспергирования до 20 %, радиусы округления их вершин постепенно увеличиваются. Разновысотность вершин абразивных зерен над образующей шлифовального круга постепенно уменьшается, число зерен, одновременно участвующих в работе, увеличивается.

Описанный механизм трансформации разновысотности абразивных зерен способствует более стабильному протеканию процесса шлифования.

Параметры режима шлифования, влияя на характер и интенсивность изнашивания инструмента, соответственно влияют и на разновысотность абразивных зерен. Установлено, что степень диспергирования абразивных зерен уменьшается при повышении твердости обрабатываемой поверхности, диаметра детали и скорости шлифовального круга. С другой стороны, она возрастает с увеличением скорости вращения детали, продольной подачи и глубины шлифования [54]. Чем больше степень диспергирования зерен при обработке, тем выше вероятность формирования минимальной разновысотности абразивных зерен на рабочей поверхности инструмента.

Опыт показывает, что в большинстве случаев (за исключением режима интенсивного самозатачивания) шлифовальные круги на основе традиционных абразивов достаточно быстро теряют свою режущую способность из-за сглаживания рельефа рабочей поверхности. Причиной сглаживания является разрушение выступающих зерен или образование площадок износа на них. Также достаточно быстро исчезает корреляция между условиями правки и формированием свойств поверхностного слоя детали, включая шероховатость обработанной поверхности.

При шлифовании алмазными кругами и кругами на основе кубического нит-

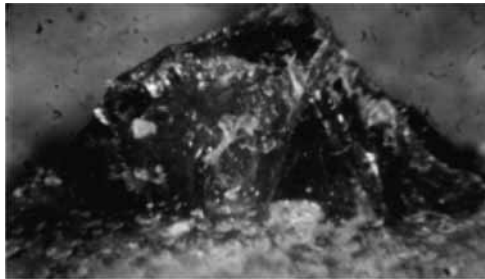
рида бора, вследствие высокой сопротивляемости режущих зерен разрушению и изнашиванию, исходное состояние рабочей поверхности инструмента сохраняется во времени существенно дольше. И также долго сохраняется корреляция между условиями правки кругов из сверхтвердых материалов и результатами обработки [121].

В условиях шлифования вершины зерен, контактирующих с обрабатываемым материалом, помимо динамического нагружения подвергаются также тепловому воздействию. Температурно-силовые условия, развивающиеся в зоне резания, и длительность их действия достаточны для развития адгезионно-диффузионных явлений и механического истирания, которые приводят либо к образованию площадок износа, либо к округлению режущих кромок.

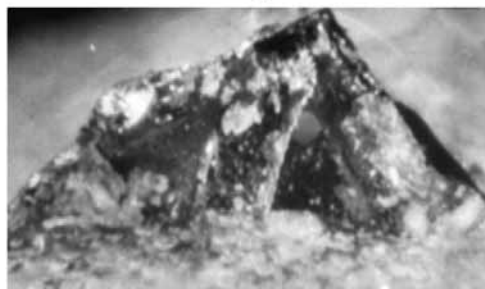
На рис. 2.7 и 2.8 показано разрушение абразивных зерен размером 800 мкм из электрокорунда и карбида кремния зеленого в зависимости от времени шлифования. Условия шлифования оказывают также влияние и на характер распределения зерен на рабочей поверхности инструмента (рис. 2.9, рис. 2.10).

Керамическая связка обладает демпфирующими свойствами, эластичность ее растет по мере нагрева зоны шлифования. Как показали наблюдения автора, за счет демпфирующих свойств связки разновысотность может уменьшаться до 5 % своей величины.

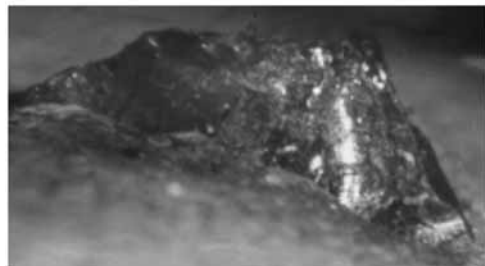
Исследованиями Е.Н. Маслова установлено, что процент фактически работающих зерен в начале шлифования минимален, достигая максимума при затуплении круга [45]. Измерения разновысотности зерен на круге из электрокорунда белого зернистостью 40 и твердостью СМЗ на керамической связке после 10 мин его работы показали, что только около половины зерен по окружности лежит на одной высоте, разница между ними по высоте не превышает 0,05 мм. Следовательно, в работе резания до новой



а)



б)



в)

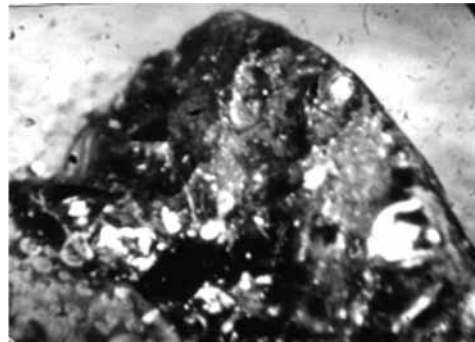
Рис. 2.7. Разрушение вершины зерна из карбида зеленого при шлифовании молибденового сплава ВМ2 с глубиной 0,022 мм:

а – до начала работы; б – после 57 проходов; в – после 302 проходов

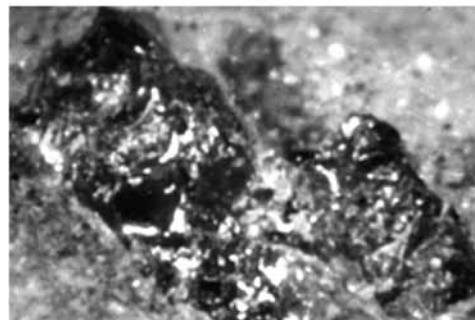
правки круга участвует только половина зерен, расположенных на его рабочей поверхности.

В. Кениг и В. Лортц на примере мягкого (твердость ВМ2) круга после экстремальных условий его правки алмазным роликом показали, что количество режущих зерен быстро возрастает и уже после 8 с шлифования достигает максимума [121]. Затем зерна начинают затупляться и выламываться из связки. После 40 с рабо-

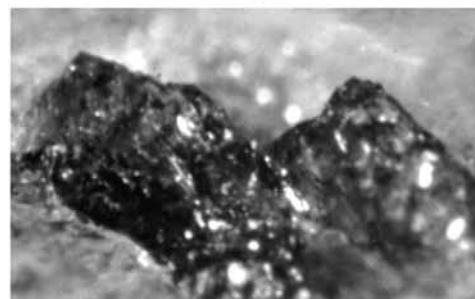
ты формируется новая топография рабочей поверхности круга, отличная от той, которая наблюдалась после его правки. Количество режущих зерен достигает некоторого значения, специфичного для конкретного инструмента. Процесс съема материала протекает в режиме самозатачивания шлифовального круга.



а)



б)



в)

Рис. 2.8. Разрушение вершины зерна из электрокорунда белого при шлифовании сплава W + 5%Mo на глубину 0,012 мм:

а – до начала работы; б – после 1 прохода; в – после 36 проходов

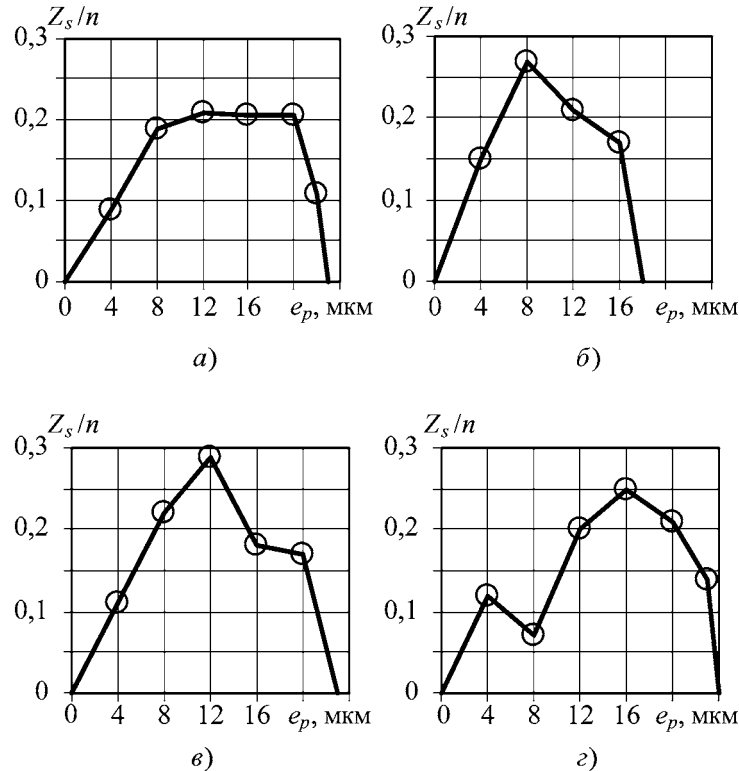


Рис. 2.9. Изменение характера распределения зерен по высоте на рабочей поверхности алмазного круга зернистостью 80/63 на органической связке при шлифовании в зависимости от подачи на глубину:

а – после правки; б – 0,005 мм/дв.ход; в – 0,01 мм/дв.ход; г – 0,02 мм/дв.ход

Прямые измерения разновысотности методом шагового ошупывания алмазной иглой показали, что ее величина зависит от размеров зерен, их объемного содержания в инструменте и состава связки и может достигать значения, равного 0,1 размера зерна при зернистости 6...40 (рис. 2.11). Для шлифовальных кругов на керамических связках с зернами из электрокорунда белого зернистостью 63 разновысотность может достигать предельного значения 0,17 от размера зерна [78].

По экспериментальным данным [54] разновысотность зерен растет с увеличением зернистости и уменьшением степени твердости круга. Так, для круга зернистостью 40 и твердостью С1 разновысотность зерен на его поверхности составила

20...110 мкм или 3,5...19 % от размера, а для круга более мелкой зернистости 6 и твердостью С1 – 7...20 мкм или 8...23,5 % от его размера.

Таким образом, возможный диапазон изменения разновысотности зерен на рабочей поверхности абразивного инструмента может составлять 0,1...0,2 от их размеров.

Полученные экспериментальные данные по разновысотности зерен дают основание привести выражение для оценки вероятности (2.8) для условия $e_p/A_3 \leq 0,2$ к более простому виду:

$$P_e = 2 \sqrt{\frac{e_p}{A_3}}, \quad (2.13)$$

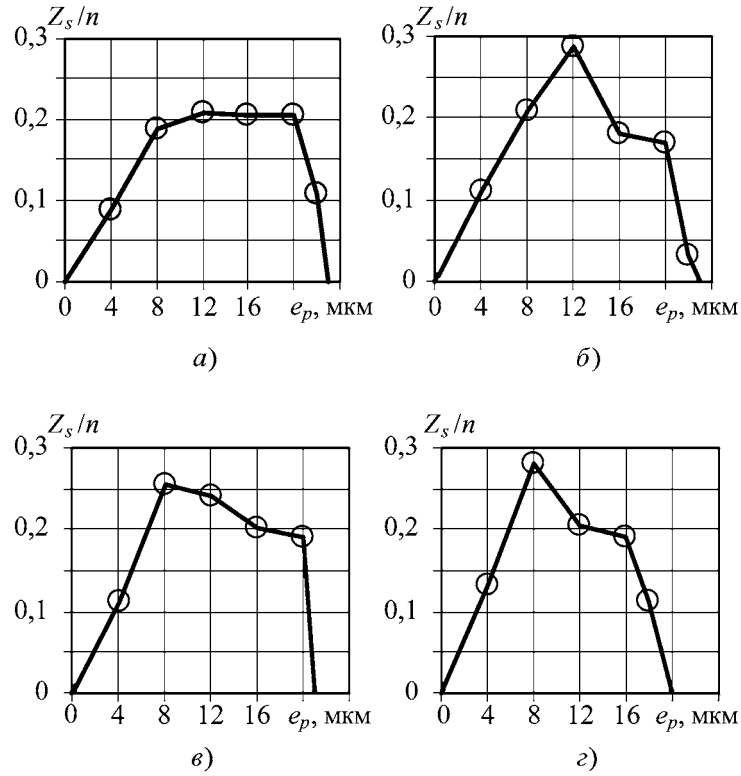


Рис. 2.10. Изменение характера распределения зерен по высоте на рабочей поверхности алмазного круга зернистостью 80/63 на органической связке от времени шлифования:

а – после правки; б – 3 мин; в – 9 мин; г – 15 мин

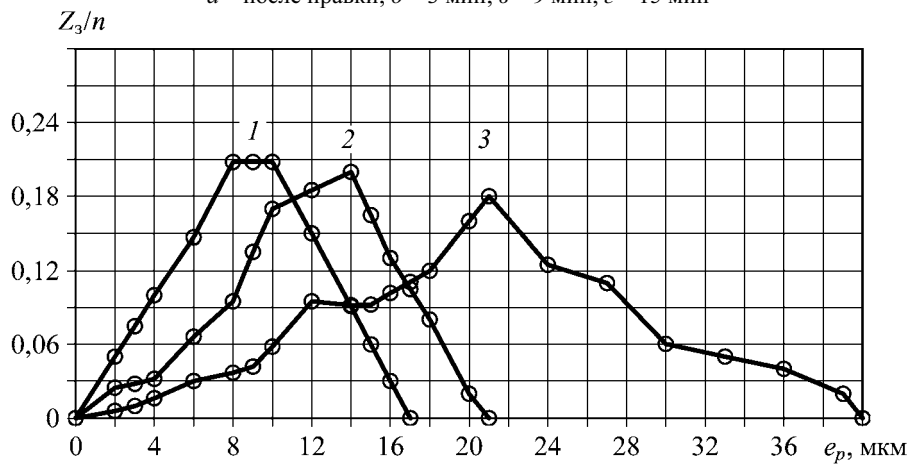


Рис. 2.11. Плотность распределения зерен над уровнем связки у алмазного круга с зернистостью 63/40 (1), 160/125 (2) на органической связке и 400/315 (3) на металлической связке

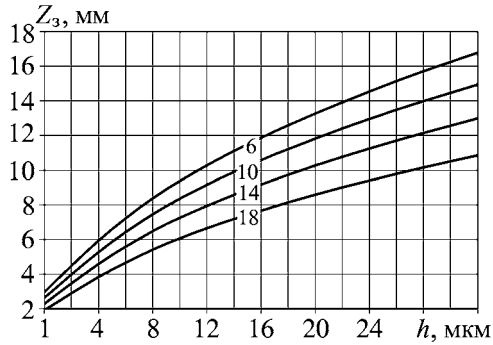


Рис. 2.12. Распределение количества зерен на рабочей поверхности абразивного инструмента зернистостью 16 по высоте для различных номеров структур

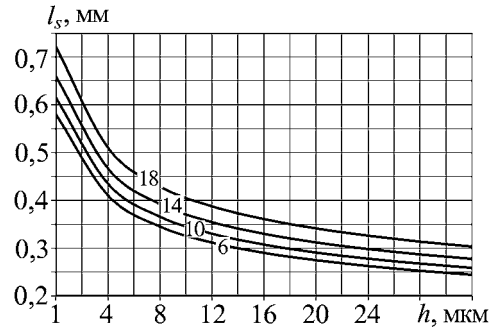


Рис. 2.13. Средневероятное расстояние между абразивными зёрнами зернистостью 16 в зависимости от их высоты над рабочей поверхностью абразивного инструмента различных структур

погрешность применения которого в сравнении с (2.8) составляет до 5,3 % для отношения $e_p/A_3 \leq 0,1$, характерного для наиболее распространенных на практике условий шлифования, и 11,8 % для предельных значений разноразности абразивного инструмента.

С учетом (2.13) получаем функцию распределения фактического числа абразивных зерен на рабочей поверхности инструмента по высоте $h = e_p/A_3$ от вершины зерна, максимально выступающего над уровнем связки до уровня связки:

$$Z_3(h) = Z_3 P_e = 1,526 \frac{V_3^{2/3}}{A_3^2} \sqrt{\frac{e_p}{A_3}} \quad (2.14)$$

и для средневероятного расстояния между ними:

$$l_3(h) = [Z_3(h)]^{-1/2} = 0,809 \frac{A_3}{\sqrt[3]{V_3}} \sqrt[4]{\frac{A_3}{e_p}} \quad (2.15)$$

Для разноразности $e_p = 0,1A_3$ средневероятное расстояние между зёрнами на рабочей поверхности инструмента относительно их шага в объеме увеличивается на 29 %, а при $e_p = 0,05A_3$ возрастает более чем в 1,5 раза.

Расчетные значения шага зерен по (2.15) практически приближены к средневероятным расстояниям между их верши-

нами, и это приближение тем лучше, чем меньше их разноразность.

Разноразность зерен, как уже отмечалось, это часть объема абразивного инструмента, вскрытого в процессе правки. Вершины зерен в этом объеме, уже называемом рабочей поверхностью, распределены с интегральной вероятностью P_e . На условно нулевой линии, проходящей через вершину зерна, максимально удаленной от рабочей поверхности, абразивные зёрна отсутствуют. По мере приближения к рабочей поверхности по текущей координате h число зерен будет увеличиваться и достигнет возможного максимума при $h = e_p$.

Расчетные зависимости числа зерен (2.14) от h и соответственно средневероятного расстояния между ними (2.15) показаны на рис. 2.12 и 2.13.

Без учета фактического распределения абразивных зерен на рабочей поверхности круга можно прийти к ошибочным выводам. Например, в работе [102] при замедленном шлифовании пластинки из оргстекла кругом зернистостью 80 пятой структуры на бакелитовой связке при подаче на глубину от 5 до 20 мкм было зафиксировано на обрабатываемой поверхности соответственно от 5 до 13 царапин. Исходя из расчетного числа, равного

72 зерна на см^2 , авторы на основании полученных данных сделали заключение, что "в реальном процессе шлифования примерно 85...90 % всех зерен не режут, а так или иначе пластически деформируют тончайший поверхностный слой, т.е. наклепывает его".

В действительности же, при внедрении рабочей поверхности круга зернистостью 80 в обрабатываемую поверхность образца при увеличении глубины от 9,5 до 20 $\mu\text{м}$ в контакте на площадке 1 см^2 будет находиться от 9,5 до 18,9 зерен, а относительная доля зерен, участвующих в резании, будет возрастать от 52,6 до 68,8 %.

Приведенное уточнение дает основание считать, что при шлифовании количество режущих зерен может составлять 50...70 % от количества зерен, находящихся в контакте с обрабатываемой поверхностью. При использовании шлифовальных кругов меньшей зернистости это количество должно быть больше, так как абразивные зерна зернистостью менее 80 имеют более благоприятные для удаления стружки геометрические параметры режущих кромок.

Аналогичные выводы могут быть сделаны на основании исследований Е.Н. Маслова, приведенных выше [45].

Вывод о том, что при шлифовании в съеме материала участвует не менее 50 % из числа зерен, находящихся на рабочей поверхности круга, тем более справедлив, что трудно представить, как происходит удаление припусков до 10 мм и более при глубинном шлифовании, если в резании участвуют только 5...10 % зерен из числа тех, что находятся на рабочей поверхности шлифовального круга.

2.2. ФИЗИЧЕСКИЙ МЕХАНИЗМ СЪЕМА МАТЕРИАЛА ПРИ ШЛИФОВАНИИ

Основой физического механизма съема материала при шлифовании является процесс царапания обрабатываемой

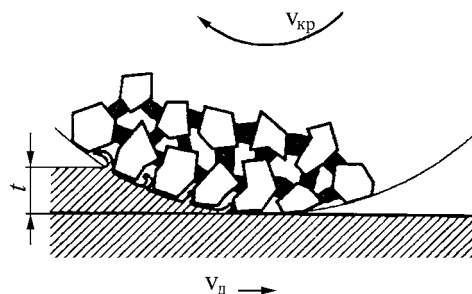


Рис. 2.14. Микрорезание (царапание) при шлифовании

поверхности острыми кромками абразивных зерен, которые перемещаются относительно этой поверхности (рис. 2.14). Удаление материала с обрабатываемой поверхности в виде стружки – диспергирование – будет происходить только при определенных условиях.

Необходимыми условиями, как и при лезвийной обработке, является существенно более высокая твердость абразива относительно обрабатываемого материала, возможность внедрения режущих кромок абразивных зерен в обрабатываемую поверхность и наличие траектории их относительного перемещения. При абразивной обработке решающее значение приобретает соотношение радиуса округления ρ режущих кромок абразивных зерен и толщины a_z удаляемой стружки. Это обстоятельство обусловлено тем, что при шлифовании толщина стружек на два-три порядка меньше, чем при лезвийной обработке, и их размеры сопоставимы с радиусом ρ .

Феноменологический подход. Формирование царапины округленной режущей кромкой абразивного зерна происходит в два этапа. На первом этапе идет внедрение режущего элемента в обрабатываемый материал при его сопутствующей упругопластической деформации. На этом этапе профиль царапины формируется в результате смятия материала и образования "навалов" по краям царапины. Когда пластичность обрабатываемого ма-

териала будет исчерпана в результате его смятия и упрочнения до критической степени деформации, начинается процесс разрушения с образованием стружки. Величина критической деформации, предшествующей разрушению, обычно связана с глубиной внедрения абразивного зерна в обрабатываемый материал. Если эта глубина не достигнута при абразивной обработке, то происходит только упруго-пластическая деформация (смятие) обрабатываемой поверхности.

Помимо пластичности материала, глубины внедрения и радиуса округления царапающего элемента зерна на механизм формирования царапины оказывают влияние форма режущей кромки, ее ориентация относительно обрабатываемой поверхности, скорость царапания и др. В зависимости от сочетания указанных факторов на обрабатываемой поверхности может получиться выдавленная или вырезанная царапина. Но даже в последнем случае при формировании царапины часть материала вытесняется и образует навалы по сторонам царапины, а часть удаляется в виде стружки.

Кинематическая схема взаимодействия зерна с обрабатываемой поверхностью на примерах плоского и круглого наружного шлифования показана на рис. 2.15.

Формирование среза обусловлено физическими условиями внедрения округленной вершины зерна. Существует так называемый "порог резания", который определяется отношением a_z/ρ , при котором в процессе перемещения абразивного зерна относительно обрабатываемой поверхности происходит переход от трения скольжения к микрорезанию (царапанию). При кинематических условиях шлифования, когда значение a_z/ρ ниже порога резания, в энергетическом балансе съема материала будет преобладать работа упругопластического деформирования и трения, если выше – возрастает удельный вес работы диспергирования.

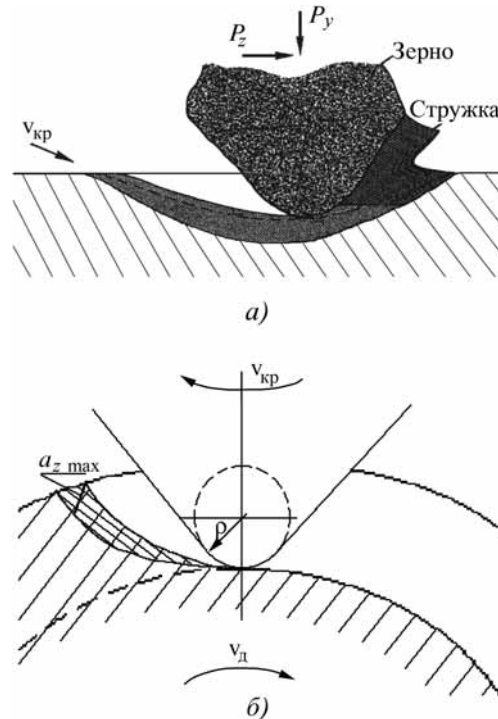


Рис. 2.15. Взаимодействие абразивного зерна с обрабатываемым материалом при шлифовании:

а – попутная схема плоского шлифования;
б – круглое наружное шлифование

Критическое значение $K = a_z/\rho$, при котором начинается формирование стружки, зависит от пластичности обрабатываемого материала, радиуса округления режущей кромки абразивного зерна и скорости шлифования [44, 69, 93].

На эту принципиальную особенность процесса шлифования одним из первых обратил внимание Е.Н. Маслов, который экспериментально установил основные закономерности указанного явления [44]. Чем меньше радиус округления режущей кромки, тем меньше глубина его внедрения в обрабатываемый материал, при которой начнется процесс образования стружки. Для более пластичного материала необходимая глубина внедрения абразивного зерна должна быть больше, чем для хрупкого. В экспериментах по цара-

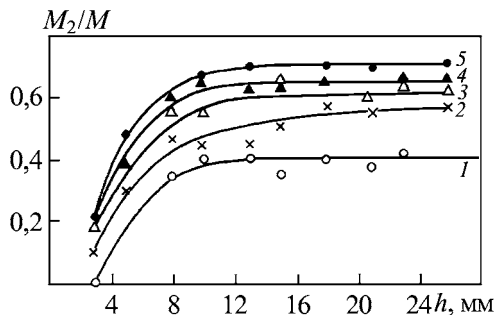


Рис. 2.16. Зависимость отношения массы срезанного металла к массе металла, вытесненного из царапины, от глубины царапины для алюминия. Скорость царапания, м/с:

1 – 0,1; 2 и 10; 2 – 40; 3 – 70; 4 – 100; 5 – 120

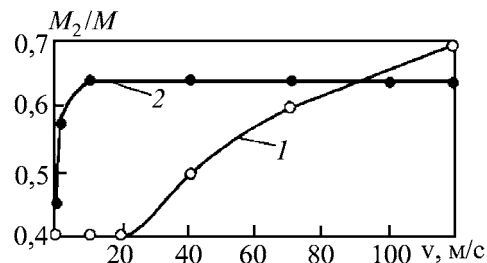


Рис. 2.17. Зависимость отношения массы срезанного металла к массе металла, вытесненного из царапины, от скорости царапания:

1 – алюминий; 2 – сталь

панию алмазным конусом с радиусом округления 6 мкм на закаленной стали ШХ15 стружка начала образовываться при глубине 1 мкм, а на пластичном сплаве 80 % Pb + 20 % Sn – при 6,5 мкм. В зависимости от пластичности металла отношение a_z/ρ , при котором начинается резание, может изменяться от 0,17 до 1,08.

С повышением пластичности обрабатываемого материала возрастает доля пластически отесненного металла по краям царапины и уменьшается доля металла, удаленного в виде стружки. Из-за преобладания работы пластической деформации над собственно работой резания процесс царапания и соответственно шлифования пластичных материалов становится энергетически неэффективным и малопродуктивным, так как требуются дополнительные проходы шлифовального круга для удаления пластически отесненного металла.

В этом заключается еще одно отличие абразивной обработки от резания лезвийным инструментом. Если лезвийная обработка наиболее эффективна при резании пластичных материалов, то абразивная обработка и процесс шлифования, в частности, применим при изготовлении деталей из твердых и хрупких материалов.

Указанные данные получены для малых скоростей царапания, значения которых в работах Е.Н. Маслова не приводятся. Для реальных скоростей шлифования в диапазоне 0,02...160 м/с закономерности царапания приведены в работах, которые содержатся в сборнике [19].

Г.Д. Полосаткин и И.А. Соломеин в своих исследованиях по царапанию алюминия и стекла корундовой иглой с углом конуса 60° и радиусом округления 70 мкм выявили связь между скоростью царапания и механизмом формообразования царапин [69]. На рис. 2.16 показана зависимость отношения массы срезанного металла M_2 к массе металла M , вытесненного из царапины, от ее глубины для различных скоростей царапания алюминия. По отношению M_2/M можно оценить долю работы резания в общей работе формообразования царапины, которая дополнительно включает в себя затраты на упругопластическую деформацию при внедрении сферического индентора, смятие металла перед его разрушением, образование навалов и трение.

Как следует из анализа рис. 2.16, с увеличением глубины внедрения царапающей иглы отношение M_2/M быстро возрастает и при глубине 10...12 мкм его

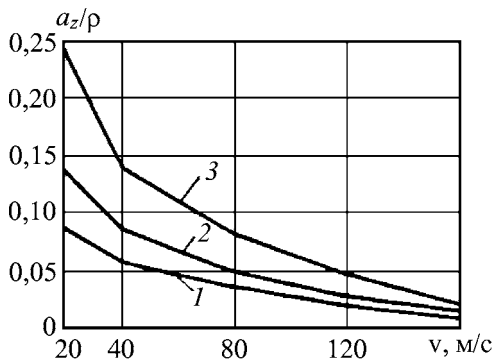


Рис. 2.18. Зависимость отношения a_z/ρ от скорости резания:
 1 – $\rho = 110$ мкм; 2 – $\rho = 60$ мкм;
 3 – $\rho = 30$ мкм

значение для конкретной скорости царапания стабилизируется. Если при скорости 0,1 м/с вклад работы резания в общий энергетический баланс составляет 0,4, то при скорости царапания 120 м/с этот вклад возрастает до 0,7, т.е. в 1,75 раз повышается коэффициент полезного действия процесса резания и формирование царапин происходит при более благоприятных физических условиях.

Пластичность обрабатываемого материала также оказывает заметное влияние на механизм формирования царапания (рис. 2.17). При царапании малоуглеродистой стали марки Ст2 с глубиной 12 мкм отношение M_2/M быстро растет с увеличением скорости царапания до 10 м/с, а затем его значение, близкое к 0,65, сохраняется в диапазоне до 120 м/с. Для алюминия, напротив, процесс формирования царапины нестабилен во всем исследованном диапазоне скоростей царапания: при возрастании скорости от 20 до 120 м/с отношение M_2/M и, следовательно, доля работы резания в работе формообразования увеличивается с 0,4 до 0,7.

Л.Н. Филимонов, исследуя процесс царапания различными сталями единичными абразивными зёрнами в условиях шлифования, получил аналогичные результаты [93]. При царапании сталей 45 (48...52 HRC), P18 (60...62 HRC), X18H9T и

армко-железа установлено, что с увеличением скорости от 20 до 160 м/с интенсивность пластической деформации при деформировании шлифовочных рисок, включая образование навалов по их краям, уменьшается. С увеличением скорости царапания кардинально уменьшается и отношение a_z/ρ (рис. 2.18). Например, при царапании стали 45 электрокорундовым зёрном с радиусом округления вершин 30 мкм отношение a_z/ρ уменьшилось с 0,24 при скорости 20 м/с до 0,025 при 60 м/с или почти в десять раз. При этом с увеличением скорости царапания наблюдается тенденция сближения значений a_z/ρ независимо от радиуса округления абразивного зерна.

По результатам описанных исследований можно сделать выводы, важные для понимания механизма съёма материала при абразивной обработке: увеличение глубины и скорости царапания создаёт наиболее благоприятные физические условия для формообразования. Увеличение этих параметров (особенно одновременное) способствует тому, что при формировании царапины возрастает доля собственно резания и уменьшается интенсивность пластической деформации. При повышении скорости царапания снижается порог резания, т.е. отделение стружки может начаться при меньшей глубине внедрения абразивного зерна в обрабатываемый материал и при больших значениях радиуса округления его режущих кромок.

При царапании глубина внедрения режущего элемента зерна в обрабатываемый материал плавно возрастает от 0 до значения, при которой начинается процесс отделения стружки, и далее до предельной глубины, определяемой траекторией движения зерна относительно обрабатываемой поверхности. Такая схема резания предопределяет специфичность нагружения абразивного зерна или, другими словами, динамику процесса царапания.

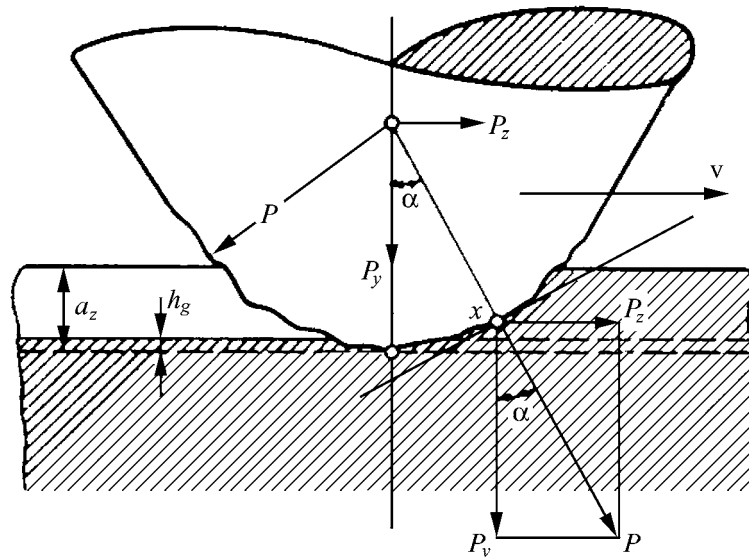


Рис. 2.19. Силы, действующие на металл в процессе царапания

Из расчетной модели [45] следует, что влияние отношения a_z/ρ на процесс образования стружки проявляется через значение фактического переднего угла резания зерна (рис. 2.19):

$$\gamma_\alpha = \arcsin \frac{\rho - a_\alpha}{\rho}, \quad (2.16)$$

где γ_α – передний угол в точке x , a_α – толщина удаляемого слоя в той же точке x .

Чем меньше отношение a_z/ρ , тем больше отрицательный передний угол резания и меньше вероятность съема материала удалением стружки.

По мнению Е.Н. Маслова, образование стружки царапанием пластичных материалов возможно при $a_z/\rho \approx 0,5$ [44]. При $a_z/\rho \geq 1$ процесс резания обеспечивается во всех случаях. При малых величинах a_z/ρ , когда царапание происходит с большими отрицательными передними углами (до $-50 \dots -60^\circ$), профиль царапины образуется за счет выдавливания материала по ее краям. В этом случае возможен съем материала, но не в виде стружки, а после его выдавливания. Большая

пластическая деформация в сочетании с трением высокоскоростного скольжения округленной части абразивного зерна относительно металла может привести к его интенсивному нагреву и оплавлению. Указанные явления подтверждаются экспериментально [69, 78, 93].

При царапании необходимо внедрение абразивного зерна с радиусом округления ρ в обрабатываемый материал на глубину a_z , при которой начинает формироваться стружка. Внедрение зерна обеспечивается приложенной радиальной составляющей P_y силы царапания P (см. рис. 2.15, а; 2.19).

В теории резания обычно анализируется отношение двух составляющих силы резания – тангенциальной P_z (главной составляющей по ГОСТ 25762–83) к радиальной P_y , по значению которого можно судить о динамике процесса обработки. При лезвийной обработке радиальная составляющая P_y обычно в 2...4 раза меньше, чем тангенциальная составляющая P_z силы резания. Специфика силового нагружения режущих элементов абразивных зерен как при царапании единичным зер-

ном, так и при шлифовании множеством абразивных зерен, приведут к обратной закономерности: отношение P_y/P_z обычно изменяется в диапазоне $0,2 \dots 0,6$.

Чтобы объяснить указанную закономерность, Е.Н. Маслов воспользовался аналогией с резанием геометрически определенной плоской поверхностью с отрицательным передним углом γ , в результате чего получил формулу для отношения P_y/P_z [44]. Приведем ее в обратном виде:

$$\frac{P_z}{P_y} = \frac{\cos \gamma - \mu \sin \gamma}{\sin \gamma + \mu \cos \gamma}, \quad (2.17)$$

где μ – коэффициент трения, а значение γ можно рассчитать по формуле (2.16).

Условность предложенной модели царапания, в которой определяющим параметром является отрицательный передний угол, в действительности отсутствующий, очевидна. Но она впервые позволила качественно объяснить влияние наиболее важного параметра a_z/ρ на закономерности процесса царапания.

Основываясь на экспериментальных данных различных исследователей, можно представить физический механизм съема материала царапанием следующим образом. Необходимым условием удаления материала в виде стружки при царапании является внедрение режущего элемента абразивного зерна с округленной вершиной в обрабатываемый материал на глубину, определяемую радиусом округления вершины зерна, пластичностью материала и скоростью царапания. Необходимым условием является также и этап царапания, предшествующий внедрению зерна в обрабатываемый материал. Зерно не может сразу же в момент контакта с обрабатываемой поверхностью начать удалять материал в виде стружки. Этого не произойдет, даже если технологическими условиями шлифования: режимом и схемой обработки (например, при плоском маятниковом или встречном плоском глубинном шлифовании) будет задана

глубина обработки, соответствующая порогу резания.

Требуется некоторое время, чтобы обрабатываемый материал под действием пластической деформации со стороны режущего элемента абразивного зерна исчерпал свою пластичность и эволюционировал в состояние, при котором начнется его разрушение.

Этап резания – царапания, предшествующий началу образования новой поверхности, является, пожалуй, самым важным и ответственным в процессе шлифования. До настоящего времени не удалось найти ответ на вопрос: каким образом начинается процесс отделения стружки при внедрении режущего элемента – индентора, который имеет крайне неблагоприятную с точки зрения физики резания материалов геометрическую форму в виде сферы. При царапании округленной вершиной абразивного зерна отсутствуют режущий клин и режущая кромка. Поэтому на обрабатываемом материале действует распределенная по сферической поверхности нагрузка в отличие от сосредоточенной нагрузки при внедрении режущего клина.

С учетом изложенного можно сделать вывод, что процесс съема материала в виде стружки при царапании абразивным зерном может начаться тогда, когда напряжение, действующее в направлении z , достигнет некоторого критического значения. Это значение напряжения σ_{nz} , которое неравномерно распределено по сферической поверхности радиусом ρ , обеспечивает в некоторой точке A (рис. 2.20) напряжение, достаточное для начала разрушения материала, деформированного в условиях, близких к всестороннему сжатию.

В точке A локализовано действие результирующей силы царапания

$$P = \sqrt{P_z^2 + P_y^2}, \quad (2.18)$$

и соответственно, в этой точке будет максимальное напряжение деформирования.

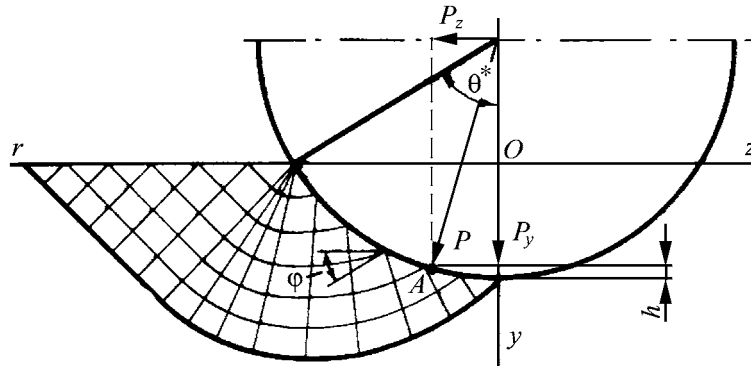


Рис. 2.20. Поле напряжений при движении сферической поверхности по пластическому полупространству

Координата точки A определяется высотой h над нижней точкой касания сферической части вершины зерна с обрабатываемой поверхностью:

$$h = \rho(1 - \cos \alpha), \quad (2.19)$$

где $\alpha = \arctg \frac{P_z}{P_y}$.

Твердость абразива обычно существенно превосходит твердость материалов, обрабатываемых шлифованием. Поэтому начальный этап царапания можно рассматривать как внедрение жесткого индентора сферической формы радиусом ρ в пластически деформируемое полупространство. Нормальное напряжение в произвольной точке их контакта по Б.А. Друянову и Н.М. Михину выражается следующим образом [69]:

$$\sigma_n = -\sigma + k \sin 2(\theta - \varphi), \quad (2.20)$$

где σ – среднее давление в точке, φ – угол наклона линии скольжения к оси Ox , θ – текущее значение θ^* ; k – пластическая постоянная, равная $k = \sigma_s/2$, σ_s – предел текучести деформируемого материала. Поле нормальных напряжений, возникающее в пластически деформируемом материале при внедрении сферического индентора, показано на рис. 2.20.

Составляющие силы деформирования без учета сил трения можно определить интегрированием на поверхности сферы S проекций нормального напряжения на вертикальную σ_{ny} и горизонтальные σ_{nz} оси:

$$P_y = \iint_S \sigma_{ny} dS, \quad (2.21)$$

$$P_z = \iint_S \sigma_{nz} dS. \quad (2.22)$$

В предположении, что деформируемый материал идеально пластичен, Б.А. Друяновым и Н.М. Михиным [69] получено приближенное решение уравнений (2.21) и (2.22) с учетом уравнения (2.20) в зависимости от деформации в зоне контакта:

$$P_y = \pi \rho a c \sigma_s, \quad (2.23)$$

$$P_z = 1,74 \rho^{1/2} a^{3/2} c \sigma_s, \quad (2.24)$$

где a – глубина внедрения сферического индентора, c – коэффициент формы ($c \approx 2,8$).

Если учесть возможное проявление адгезии между абразивным зерном и деформируемым металлом через τ_0 – прочность на срез адгезионных соединений и β – коэффициент, учитывающий увеличе-

ние прочности τ_0 от нормального напряжения, то при расчете тангенциальной составляющей силы в (2.24) добавляется еще один член:

$$P_z = 1,74\rho^{1/2}a^{3/2}c\sigma_s + \pi\rho a(\tau_0 + 2,57\beta). \quad (2.25)$$

В действительности же, даже в условиях шлифования, когда зона контакта может быть нагрета до высоких температур, деформируемый материал упрочняется. Эффект упрочнения приводит к тому, что действующее напряжение будет увеличиваться в соответствии с ростом степени деформации до начала процесса разрушения.

Давление на обрабатываемом материале со стороны сферического индентора будет неодинаковым по направлениям y и z . В направлении y идет внедрение зерна со скоростью, на три-четыре порядка меньше, чем скорость шлифования, вектор которой направлен по оси z . Степень деформации по толщине сминаемого материала в направлении z тоже будет в 1,5–3 раза больше, чем по глубине внедрения. Так как напряжение деформирования для упрочняемых материалов зависит от степени ε и скорости $\dot{\varepsilon}$ деформации, то в формулы (2.23) и (2.24) целесообразно внести коррективы, учитывающие их влияние на составляющие силы царапания:

$$P_y = \pi\rho a c \sigma_y(\varepsilon_y, \dot{\varepsilon}_y), \quad (2.26)$$

$$P_z = 1,74\rho^{1/2}a^{3/2}\sigma_z(\varepsilon_z, \dot{\varepsilon}_z). \quad (2.27)$$

После деления (2.26) на (2.27) получаем важное для понимания физических условий царапания и шлифования отношение:

$$\frac{P_z}{P_y} = 0,55 \sqrt{\frac{a_z}{\rho} \frac{\sigma_z(\varepsilon_z, \dot{\varepsilon}_z)}{\sigma_y(\varepsilon_y, \dot{\varepsilon}_y)}}. \quad (2.28)$$

Определить заранее теоретически, которое из двух действующих напряжений σ_y или σ_z будет больше, практически невозможно. С одной стороны, с увеличе-

нием степени деформации (а она всегда больше в направлении оси z) возрастает необходимое напряжение деформирования. С другой стороны, с возрастанием скорости деформации (а она также больше по оси z) напряжение, необходимое для заданной степени деформации, уменьшается.

Из экспериментальных данных [93] следует, что с увеличением скорости царапания стали 45 от 20 до 120 м/с отношение P_z/P_y уменьшается примерно в 1,7 раз за счет более быстрого уменьшения составляющей P_z (в 4,2 раза) по сравнению с радиальной составляющей P_y (ее снижение составило 2,5 раза).

Необходимо теперь установить, какая из двух составляющих силы царапания ответственна за формирование стружки. По мнению Е.Н. Маслова, сдвиг и отделение элемента стружки обеспечивает радиальная составляющая. Именно она определяет глубину внедрения абразивного зерна и достигает порога резания, при котором начнется образование стружки [44, 45].

Противоположной точки зрения придерживается В.Н. Кашеев [30]. Им экспериментально установлено, что при царапании алмазным конусом с постоянной нормальной нагрузкой тангенциальная составляющая увеличивается от нуля до критического значения, при котором начинается стружкообразование. В дальнейшем процесс царапания протекает при стабильных значениях обеих составляющих силы царапания.

Логично предположить, что если формирование новой поверхности при царапании и шлифовании происходит по направлению вектора тангенциальной составляющей силы царапания – шлифования, то именно ее величина становится определяющим фактором начала стружкообразования. В свою очередь, нормальная составляющая, обеспечивая необходимую для микрорезания глубину внедрения абразивного зерна в обрабатываемый материал, деформирует и упрочняет

его до степеней деформации ниже начала разрушения.

Указанное явление подтверждается экспериментально. Л.К. Филимонов, измеряя микротвердость поверхности царапин в различных ее сечениях на сталях 45, P18 и X18H9T, установил, что наибольшее упрочнение наблюдается на дне риски [93]. Прямые измерения Н.И. Богомолова, Ю.В. Безолюка и И.И. Есикова плотности дислокаций на дне царапин на стали X18H9T показали, что плотность дислокаций в результате упрочнения возрастает примерно на два порядка [69]. Но полученные значения плотности дислокаций на несколько порядков ниже значений, соответствующих предельно упрочненному состоянию этой стали. Этими же авторами по результатам измерения микротвердости на дне царапин на сталях У8, X18H9T и меди показано, что только при определенных условиях царапания, в частности меди, упрочнение может достигнуть предела. Чаше же упрочнение при царапании исследованных металлов не достигает предельного наклепа.

Важным следствием приведенного анализа стало прогнозирование по (2.28) отношения P_z/P_y , по величине которого можно оценить физические условия царапания (шлифования). Смысл этого отношения заключается в том, что он оценивает вклад полезной работы резания – диспергирования – относительно работы внедрения зерен в обрабатываемый материал и их взаимного трения. Чем больше P_z/P_y , тем оптимальней условия шлифования с точки зрения работы резания и работы трения, которая обычно преобладает в энергетическом балансе шлифования.

Физический механизм. Феноменологическое описание процесса взаимодействия абразивного зерна с обрабатываемой поверхностью можно дополнить физической моделью явлений, сопровождающих съем материала при шлифовании.

Процесс съема материала при шлифовании в любой момент времени происходит в результате контактирования ре-

жущего рельефа с геометрически неопределенными параметрами, в отличие от обработки лезвийным инструментом. В этом случае взаимодействие происходит в условиях, приближенных к свободному резанию с фиксированной геометрией режущего клина. Несмотря на указанное различие в условиях контактирования, физический механизм формирования стружки и новой поверхности при резании лезвийным и абразивным инструментом оказывается одинаковым. Такое заключение подтверждается прямым наблюдением эволюции дислокационной структуры обрабатываемого материала при его резании различными методами [77].

Теория дислокаций физики твердого тела признана эффективным средством анализа многих физических явлений, связанных с поведением материала под нагрузкой и в условиях действия высоких температур. Макроскопические особенности протекания того или иного явления по этой теории обосновываются микроскопическими механизмами зарождения, движения и взаимодействия дефектов кристаллического строения, важнейшим из которых для описания пластической деформации и упрочнения металлов и сплавов являются дислокации.

Исследование с помощью метода декорирования показало, что дислокационная структура поверхностного слоя жаропрочных сплавов имеет общий характер для различных способов резания. Общность проявляется, прежде всего, в упорядоченном движении множества дислокаций от поверхности в глубь обрабатываемого материала по различным системам скольжения. Количество наблюдаемых систем скольжения и характер их взаимодействия зависит от типа кристаллической решетки и степени легированности, величины действующего напряжения, скорости деформирования и других факторов (рис. 2.21).

Основываясь на отмеченной аналогии в эволюции дислокационной структуры, можно более подробно рассмотреть на



Рис. 2.21. Дислокационная структура сплава ХН77ТЮР после шлифования

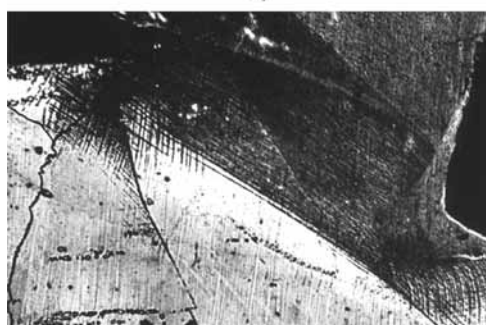
субструктурном уровне особенности процесса съема материала при шлифовании. При внедрении абразивного зерна, так же, как и при внедрении режущего клина, в свободном резании формируется упруго-пластическая зона деформирования.

На рис. 2.22, *а* в качестве примера приведена дислокационная структура пластически деформированной зоны никелевого сплава ХН77ТЮР при строгании резцом с положительным передним углом. Конфигурация пластически деформированной зоны резания наблюдается как область с множеством полос скольжения, самым различным образом ориентированных относительно движения инструмента. Ориентация наблюдаемых систем скольжения и их количество связано с ориентацией кристаллографических систем скольжения в каждом конкретном зерне и величиной действующей в нем нагрузки.

Размеры пластически деформированной зоны резания, плотность полос скольжения и характер их распределения свидетельствуют об интенсивности пластической деформации. Вклад работы пластической деформации в общий энергетический баланс при свободном резании может достигать 90 %.



а)



б)

Рис. 2.22. Дислокационная структура пластически деформированной зоны сплава ХН77ТЮР при резании:

а – с опережающим упрочнением;
б – с локализованной зоной деформации.
× 500

стической деформации в общий энергетический баланс при свободном резании может достигать 90 %.

Размеры пластически деформируемой зоны резания чувствительны к технологическим условиям обработки: скорости резания, толщине среза и форме режущего клина (в случае резца – переднему углу). При шлифовании скорости резания существенно больше, а толщины среза значительно меньше, чем в процессах резания лезвийным инструментом. Такое сочетание скорости резания и толщины среза создает условия высокоскоростного деформирования шлифуемого материала со скоростями деформации на три-четыре порядка выше, чем у известных методов лезвийной обработки.

Из-за высокой скорости деформации и неблагоприятной для резания формы режущей кромки абразивного зерна (сфе-

ра с большим отрицательным передним углом) сопротивление деформированию при шлифовании будет заметно больше. При кратковременном контактировании абразивного зерна с обрабатываемым материалом создаются предпосылки, когда времени не хватает, чтобы металл исчерпал свой ресурс пластичности. Пластическая деформация локализуется у вершины режущей кромки (рис. 2.22, б). Под действием больших локальных напряжений он начинает разрушаться хрупко с формированием опережающей трещины (рис. 2.23).

Одновременно с упругопластической деформацией в зоне резания происходит интенсивное теплообразование. Источником тепла при шлифовании в меньшей степени является деформация, а в большей степени – трение множества одновременно находящихся в зоне резания абразивных зерен (режущих и нережущих), контактирующих с обрабатываемым материалом. Тепловая волна идет с опережением перед шлифовальным кругом, так как скорость ее распространения существенно больше, чем скорость перемещения круга относительно обрабатываемой зоны детали. Предварительный нагрев материала, который вступает в контакт с абразивным зерном, повышает его пластичность, снижая уровень напряжения, при котором начинается необратимая пластическая деформация, и уменьшает сопротивление деформированию в целом.

Таким образом, особенностью физического механизма формообразования при шлифовании является появление двух полярных факторов. С одной стороны, создаются предпосылки для повышения сопротивления резанию – деформированию обрабатываемого материала за счет высокой скорости деформации и неблагоприятной формы режущего элемента. С другой стороны, интенсивное теплообразование стремится нивелировать негативное действие этого фактора повышением пластичности и уменьшением сопротивления деформированию.



2.23. Трещина разрушения при резании сплава ХН77ТЮР. $\times 800$

Экспериментальные оценки отношения P_z/P_y дают основание полагать, что действие теплового фактора при шлифовании превалирует. Работа трения при шлифовании, как правило, всегда больше, чем работа пластической деформации. По данным, например Ж.А. Багдасаряна [54], работа, затрачиваемая на пластическую деформацию срезаемого слоя, составляет 18...25 % суммарной работы шлифования.

2.3. МЕХАНИЗМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ШЛИФОВАЛЬНОГО КРУГА С ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ДЕТАЛЬЮ

В теории шлифования в качестве релевантного параметра принята толщина слоя, снимаемого одним зерном шлифовального круга. Из-за статистической неопределенности условий взаимодействия множества абразивных зерен с обрабатываемой поверхностью в зоне контакта инструмента с деталью практически невозможно адекватно формализовать его характер.

В этой связи, толщина срезаемого слоя как усредненная величина возможных толщин среза и учитывающая также участие зерен, не выполняющих работу по съему материала, является удобным параметром количественной оценки термодинамических условий процесса шлифования. Как следствие, она оказывает влияние на характер и интенсивность изнашивания инструмента, формирование свойств поверхности и поверхностного слоя обрабатываемой детали.

Разновысотность зерен, разнообразие форм их режущих кромок и статистический характер их распределения по площади контакта шлифовального круга с обрабатываемой поверхностью детали определяют переменные значения толщины и ширины среза отдельным зерном, изменяющийся характер образующихся стружек и схем наложения срезов.

Из упрощенной схемы шлифования кругом, на рабочей поверхности которого равномерно распределены абразивные зерна с одинаковой высотой выступания над поверхностью инструмента (см. рис. 2.14), можно установить связь параметров процесса с толщиной удаляемого слоя. Из кинематики взаимодействия шлифовального круга со средним расстоянием между зернами l_3 , при его внедрении в обрабатываемую деталь на фактическую глубину t_ϕ толщину среза можно определить как

$$a_z = \frac{l_3}{L_k} \frac{t_\phi}{q}, \quad (2.29)$$

где q – отношение скоростей вращения круга $v_{кр}$ и детали v_d , а L_k – длина контакта круга с деталью.

Е.Н. Маслов предложил более точное выражение для a_z :

$$a_z = \frac{v_d}{60v_{кр} \pm 2v_d} l_3 t_\phi^{0,5} \left(\frac{D+d}{Dd} \right)^{0,5} \frac{S}{B}, \quad (2.30)$$

в котором для условий круглого наружного шлифования детали диаметром d кру-

гом диаметром D и высотой B с продольной подачей S учтена возможная винтовая траектория царапины на обрабатываемой поверхности.

Общий недостаток моделей (2.29) и (2.30) заключается в том, что при номинальных значениях глубины резания t (точнее – подачи на глубину), распространенных в практике маятникового шлифования, расчеты толщины среза a_z дают значения, существенно меньшие тех, при которых возможен по физическим условиям сьем материала. К этому можно добавить, что в расчетных формулах a_z не учтены параметры распределения абразивных зерен на рабочей поверхности инструмента (за исключением l_3) и их геометрия.

Г.Б. Лурье в этой связи предложил другой подход к оценке толщины среза [41]. Разделив объем материала, удаленный за единицу времени, на число зерен, находившихся во взаимодействии с ним за этот же период времени, он получил формулу в виде

$$a_z \approx 8 \left[\frac{Q_m}{Z_3 v_{кр}} \frac{D+d}{Dd} \right]^{0,5}. \quad (2.31)$$

Формула (2.31) получена для условий круглого наружного шлифования в предположении, что каждая отдельная стружка представляет собой две сложенные основаниями пирамиды.

Расчеты по формуле (2.31) показали, что полученные толщины среза a_z в достаточно широком диапазоне условий шлифования при изменении съема материала Q_m , отнесенного к 1 мм высоты шлифовального круга, от 16 до 400 мм³/(мин·мм) соответствуют физическим предпосылкам начала процесса резания.

Для нас представляет интерес сравнение кругов нормальной и высокой структур по приведенным расчетным формулам с точки зрения их влияния на термодинамику процесса шлифования через толщину среза a_z . Оказывается, что при переходе к высоким номерам струк-

туры абразивного инструмента с соответствующим увеличением l_3 (2.15) и Z_3 (2.14) при прочих равных условиях обработки толщина срезаемого слоя возрастает и, следовательно, сопротивление резанию также возрастает. В действительности же по результатам многочисленных исследований сделаны прямо противоположные выводы: сила резания и температура в зоне контакта при шлифовании высокопористым кругом существенно – до 2 и более раз – снижается.

Этот парадокс объясняется несовершенством кинематической модели взаимодействия шлифовального круга с обрабатываемой поверхностью детали, которая не принимает во внимание жесткость технологической системы резания и не учитывает физические предпосылки съема материала абразивными зернами.

Два важных обстоятельства необходимо учитывать при теоретическом анализе работоспособности шлифовальных кругов различных характеристик, в том числе номеров структур.

Первое обстоятельство, как уже было показано, связано с тем, что по кинематической модели шлифования не может происходить съем материала, если глубина резания t соответствует номинальной подаче на глубину. Для начала процесса образования стружки, необходимо выполнение условия

$$a_z \geq K\rho. \quad (2.32)$$

Чтобы обеспечить внедрение абразивного зерна с радиусом округления вершин ρ по условию (2.32), необходимо, чтобы фактическая глубина шлифования t_ϕ соответствовала значению

$$t_\phi \geq K\rho \frac{v_{кр}}{v_d} \frac{L_k}{l_3}. \quad (2.33)$$

Длина дуги контакта L_k шлифовального круга диаметром D с обрабатываемой поверхностью детали зависит также от глубины резания. Для случая плоского шлифования формула (2.33) преобразуется к виду

$$t_\phi \geq (K\rho)^2 \frac{D}{l_3^2} \left(\frac{v_{кр}}{v_d} \right)^2, \quad (2.34)$$

где характеристика круга идентифицирована через радиус ρ (связан с материалом абразива и его зернистостью) и средний шаг между зернами l_3 на поверхности круга, который зависит от зернистости и номера структуры инструмента по формуле (2.15).

В соответствии с формулой (2.34) фактическая глубина шлифования, необходимая для начала стружкообразования, при обработке кругами различных структур обратно пропорциональна квадрату отношений средних расстояний между режущими зернами

$$\frac{t'_\phi}{t''_\phi} = \left(\frac{l''_3}{l'_3} \right)^2. \quad (2.35)$$

Если для простоты отождествлять l_3 с расстоянием l_v по (2.5), то тогда для кругов одной зернистости можно установить связь фактической глубины шлифования с относительным содержанием зерна V_3 в объеме шлифовального круга

$$t'_\phi = t''_\phi \left(\frac{V'_3}{V''_3} \right)^{2/3}. \quad (2.36)$$

Из (2.36) следует, что с увеличением номера структуры шлифовального круга фактическая глубина обработки, при которой начинается съем материала, заметно уменьшается: для 12 структуры – в 1,2 раза, а для 18 структуры – в 1,55 раза по сравнению с кругом 6-й структуры.

Если принять жесткость технологической системы резания станок–круг–деталь равной j (для шлифовальных станков обычно $j = 10 \dots 50$ Н/мкм), определяемой классическим выражением

$$j = \frac{P_y}{i}, \quad (2.37)$$

то необходимое сближение рабочей поверхности круга с обрабатываемой поверхностью детали по условию (2.32) для начала процесса резания должно составить

$$i \geq K\rho. \quad (2.38)$$

Так как в шлифовальных станках обычно внедрение абразивных зерен круга в обрабатываемый материал реализуется за счет кинематических перемещений (а не силового давления) инструмента и детали, то для схемы плоского шлифования с продольной скоростью перемещения v_d относительно круга время необходимого сближения ориентировочно составит

$$\tau = \frac{K\rho}{v_d} \quad (2.39)$$

с сопутствующей реакцией в виде нормальной составляющей силы резания, равной

$$P_y \geq jK\rho, \quad (2.40)$$

или с учетом формул (2.32) и (2.33)

$$P_y \geq j l_3 \sqrt{\frac{t_\phi}{D} \frac{v_d}{v_{кр}}}. \quad (2.41)$$

При маятниковой схеме шлифования необходимое сближение i шлифовального круга с обрабатываемой поверхностью определяется разницей в значениях фактической t_ϕ и номинальной t_n глубин шлифования на первом проходе

$$i = t_\phi - t_n. \quad (2.42)$$

Второе обстоятельство, которое не отражено в кинематической модели шлифования, обусловлено эффектом наложения срезов. Абразивные зерна на рабочей поверхности инструмента специфическим образом распределены не только по высоте выступания их вершин над уровнем связки. Они неоднородно распределены и по самой площади рабочей поверхности.

Случайный характер в распределении зерен на поверхности абразивного инструмента, строго говоря, не дает оснований отождествлять положение режущих зерен в зоне контакта, как следующих друг за другом по аналогии с фрезерованием.

А.В. Никольский проанализировал возможные схемы наложения срезов в зависимости от условий шлифования и характеристики инструмента на примере обработки площадки с размерами $L_k \times l_3$ (рис. 2.24) [54].

Для того чтобы площадка была обработана по всей поверхности, с ней должно войти в контакт и сделать срезы достаточно большое число K_ϕ зерен.

Общее число зерен K , вступающих в контакт с участком обрабатываемой поверхности во время одного прохода, определяется следующим выражением:

$$K = \frac{L_k}{l_3} \frac{v_{кр}}{v_d}.$$

Если K встреч с режущими зернами круга недостаточно для того, чтобы обработать всю поверхность $L_k \times l_3$, то обработка ее не ограничится одним проходом $K_\phi > K$ и фактическая глубина резания зерен t_ϕ будет больше, чем одна подача на врезание t . Фактическая глубина резания по существу представляет собой расчетную высоту микронеровностей, образующихся на шлифовальной поверхности.

В том, что понятие "фактическая глубина резания" является реальным, нетрудно убедиться на практике. Достаточно отшлифовать полированный ранее вал с такими режимами, чтобы за первый проход с подачей на врезание была покрыта следами срезов лишь часть обрабатываемой поверхности, остальная часть поверхности останется по-прежнему полированной. После первого прохода (за 1 оборот детали или за 1 ход стола) последует новое врезание на глубину подачи t , и на полированной поверхности увеличится число следов от срезов и уменьшится

ся площадь еще нетронутой зернами части поверхности.

Наконец, после достаточного числа проходов n вся первоначально полированная поверхность окажется обработанной, и при дальнейших проходах с постоянной подачей t процесс шлифования будет стабильным, если прочие факторы останутся неизменными. При этом фактическая глубина резания зернами будет соответственно больше подачи на врезание t :

$$t_{\phi} = nt.$$

Положим, что одно из режущих зерен сделало полный срез (см. рис. 2.24, срез 1). Следующее зерно может сделать срезы одного из трех видов (см. срезы 2, 2а и 2б).

Если это зерно сделает срез, не накладывающийся на предыдущие, то получится срез вида 2а. Когда зерно сделает срез, не накладывающийся на предыдущие, то получится снова полный срез 2б. Наконец, если зерно сделает срез, отчасти накладывающийся в боковом направлении на один из предыдущих срезов, то получится срез вида 2. Такие срезы обычно являются наиболее характерными при формировании шлифованной поверхности.

Для того чтобы при шлифовании образовывались срезы типа 2а, необходимо, чтобы каждое зерно резало строго вслед предыдущему; в результате на обрабатываемой поверхности должны образоваться параллельные канавки шириной b_n на расстоянии l_3 друг от друга. Это значит, что в пределах участка обрабатываемой поверхности $L_k \times l_3$ должна образоваться одна такая канавка, и поверхность будет полностью обработана при $b_n = l_3$. Но это физически невозможно, потому что между режущими зернами есть и связка, и еще другие, не режущие зерна, не достигающие до срезаемого слоя металла или не снимающие стружку.

По расчету среди всех срезов при шлифовании доля срезов типа 2а при реальных условиях не превышает 10 %. На

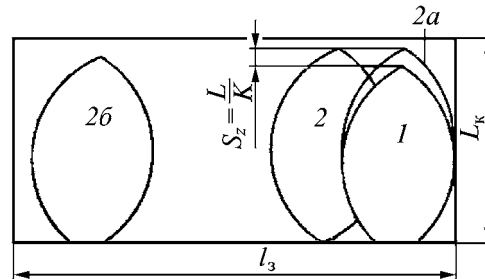


Рис. 2.24. Формы срезов на обработанной поверхности

основе теории вероятности можно также определить долю полных срезов типа 2б среди всех срезов при шлифовании. Оказывается, что в большинстве случаев относительное количество полных срезов невелико и их нельзя считать характерными для процесса шлифования, но при определенном сочетании режимов доля полных срезов возрастает, хотя никогда не превышает 50 %, если учесть фактическую глубину резания.

Действительные срезы при шлифовании имеют разнообразные размеры и форму. Определение размеров срезов затрудняется еще и тем, что шлифуемая поверхность детали всегда имеет микронеровности, не подчиняющиеся никакой видимой закономерности, но имеющие иногда весьма значительную высоту по сравнению с величиной подачи на врезание t .

Известно много попыток интерпретировать кинематическую модель процесса шлифования с учетом фактической глубины обработки, неоднородного распределения режущих зерен в зоне контакта, наложения срезов на обработанной поверхности и др. Из-за сложности реальной картины съема материала при шлифовании и отсутствия соответствующего аппарата и, в частности, теории вероятностей указанные попытки сводятся к включению в расчетные формулы специальных коэффициентов.

В работе [74], например, приведена модифицированная модель толщины среза Г. Кассена и Г. Вернера

$$a_z = \frac{2}{A_N} V_3^{-\beta} \left(\frac{v_d}{v_{кр}} \right)^{1-\alpha} \left(\frac{t}{d^*} \right)^{\frac{1-\alpha}{2}}, \quad (2.43)$$

где A_N – постоянная пропорциональности, обусловленная геометрией режущего рельефа, α и β – показатели степени, связанные с распределением режущих зерен ($0 < \alpha; \beta < 1$), d^* – эквивалентный размер, зависящий от диаметров круга D и детали d и определяющей длину их контакта.

В другой работе [87] приводится формула для расчета толщины среза

$$a_z = A \sqrt[3]{\frac{t}{Z_s^2 \rho D}} \sqrt[3]{\left(\frac{v_d}{v_{кр}} \right)^2}, \quad (2.44)$$

где инструмент идентифицирован плотностью зерен с радиусом округления вершин ρ на рабочей поверхности Z_s круга диаметром D ; A – постоянная.

По формулам (2.43) и (2.44) невозможно априорно без проведения специального экспериментального анализа прогнозировать толщину среза. Важно также другое: качественно эти формулы для толщины среза соответствуют основным закономерностям классической кинематической модели шлифования по влиянию плотности абразивных зерен в объеме инструмента и параметров режима обработки. Они также не дают адекватного ответа на преимущества высокопористых шлифовальных кругов в сравнении с обработкой абразивным инструментом нормальной структуры.

При достижении фактической глубины резания, при которой по условию (2.32) начинается съем материала, в технологической системе резания станок–инструмент–деталь устанавливается динамическое равновесие, обеспечивающее последующее стабильное протекание процесса шлифования. При глубинном шли-

фовании, когда глубина обработки изначально задается достаточно большой, процесс съема материала тоже начинается только через некоторое время после начала контакта режущего зерна с обрабатываемой поверхностью.

Из анализа взаимодействия шлифовального круга с обрабатываемым материалом можно сделать вывод, что толщина стружки может быть рассчитана только с учетом ее распределения. На распределение толщины стружки при шлифовании оказывает влияние не только характер рабочей поверхности инструмента, но и кинематика процесса. Именно кинематика шлифования оказывает влияние на то, какие точки режущего профиля в действительности окажутся активными режущими точками.

Трехмерный анализ влияния структуры и геометрии рабочей поверхности шлифовального круга на характер резания и характеристики шлифования выполнен, например, С. Мацуи [126], В. Кенигом и В. Лортцем [121].

Установлено, что результаты шлифования в значительной степени зависят от топографии шлифовального круга, к наиболее значимым характеристикам которой относятся фактическое расстояние между режущими кромками абразивных зерен, геометрия их вершин и разноточность зерен, находящихся в зоне резания.

2.4. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ РАЗЛИЧНЫХ СТРУКТУР

В соответствии с вышеизложенным теоретическим анализом, можно выделить характеристические признаки, по которым можно сравнить работоспособность шлифовальных кругов различных структур.

Работоспособность абразивного инструмента – это интегрированное понятие (синоним – режущие свойства), в котором

аккумулированы основные характеристики процесса шлифования, обусловленные, в первую очередь, свойствами самого инструмента. К ним можно отнести его износостойкость, термодинамические условия процесса, производительность по съему материала, точность и качество обработки. Все они прямо или косвенно связаны с топографией рабочей поверхности шлифовального круга и механизмом его взаимодействия с обрабатываемой деталью.

Только применение высокопористых кругов дает возможность эффективно реализовывать процесс высокопроизводительного глубинного шлифования за счет:

- развитого рельефа рабочей поверхности, в котором сочетается максимальная разновысотность режущих зерен при их минимальном количестве;
- оптимальной комбинации твердость–зернистость–структура, которая обеспечивает работу инструмента в режиме частичного самозатачивания с минимизацией термодинамического воздействия на обрабатываемую поверхность детали.

Указанные особенности распределения абразивных зерен на рабочей поверхности высокопористых кругов отражаются на кинематике и динамике их взаимодействия с обрабатываемой поверхностью.

В соответствии с формулой (2.33) фактическая глубина, при которой начинается процесс съема материала, обратно пропорциональна среднему расстоянию l_3 между зернами, расположенными на рабочей поверхности круга. Величина l_3 , в свою очередь, по (2.15) зависит от разновысотности e_p и объемного содержания V_3 . С увеличением номера структуры от 6 до 16 объемное содержание зерна в круге уменьшается в 1,67 раз, а их разновысотность на рабочей поверхности возрастает на 70 %. В результате среднее расстояние между зернами одного размера, участвующими в процессе резания, при струк-

турах 6, 12 и 16 находится в соотношении 1 : 1,21 : 1,35.

Конкретизация характеристик распределения режущих зерен при шлифовании кругами различной структурности позволяет установить условия начала съема материала. По (2.33) фактическая глубина шлифования, при которой создаются физические предпосылки для стружкообразования, будет на 21 и 35 % меньше соответственно при использовании кругов 12-ю и 16-ю структур по сравнению с кругом нормальной структуры. По расчетной модели (2.41) необходимое радиальное усилие для начала процесса съема материала с учетом жесткости технологической системы резания достигается при глубинах соответственно почти в 1,5 и 1,8 раз меньших, чем при обработке шлифовальным кругом 6-й структуры.

В табл. 2.4 приведены результаты анализа работоспособности шлифовальных кругов различных структур на примере инструмента из электрокорунда белого зернистостью 16. Анализ выполнен с учетом топографических характеристик рабочей поверхности круга при толщине среза и соответственно разновысотности зерен, равной 20 мкм. В некоторых случаях показаны относительные характеристики процесса шлифования, приведенные к кругу 6 структуры, для которой ее величине принята за 1.

Решающим преимуществом инструмента с повышенной пористостью и соответственно высокими номерами структуры является уменьшение времени, при котором начинается процесс резания, т.е. отделение стружки по условию (2.32).

При постоянных режимах шлифования изменение объемного содержания зерна в круге по аналогии с (2.36) приводит к изменению времени стабилизации процесса съема материала.

$$\frac{\tau'}{\tau''} = \left(\frac{V'_3}{V''_3} \right)^{2/3}. \quad (2.45)$$

2.4. Работоспособность шлифовальных кругов различных структур

Характеристика	Номер структуры			
	6	10	14	18
Число режущих зерен при $a_z = 20$ мкм, мм ⁻²	13,3	11,8	10,3	8,6
Среднее расстояние между режущими зернами при $a_z = 20$ мкм, мм	0,274	0,291	0,301	0,312
Среднее расстояние между зернами в объеме круга, мм	0,231	0,245	0,262	0,287
Сечение режущего профиля при $a_z = 20$ мкм, мкм ² /мм	592,5	559,3	521,7	477,5
Коэффициент перекрытия профиля	0,030	0,028	0,026	0,024
Средний объем материала, удаляемый одним зерном	1	1,13	1,29	1,55
Время стабилизации резания	1	0,89	0,77	0,65
Интенсивность предварительного нагрева	1	0,79	0,60	0,42

Следовательно, до момента начала отделения стружки через зону контакта пройдет абразивных зерен значительно больше при обработке кругом со структурами 5...8, чем со структурами 10...15 и выше. Эти зерна, не выполняя полезной работы резания, будут являться источником интенсивного теплообразования, обеспечивая предварительный нагрев зоны обработки.

С.Г. Редько установил, что максимальная температура на шлифуемой поверхности прямо пропорциональна количеству абразивных зерен, находящихся в контакте с обрабатываемым материалом [13]. Поэтому интенсивность предварительного нагрева линейно связана с количеством зерен, прошедших через зону контакта, пластически деформируя обрабатываемый материал до начала его резания. При увеличении номера структуры такой нагрев заметно уменьшается. Интенсивность предварительного нагрева при шлифовании кругом 18-й структуры почти в 2,4 раза меньше, чем кругом 6-й структуры.

Аналогично на температурный режим шлифования оказывают влияние зерна, которые находятся в зоне резания при стационарном процессе съема материала.

Сравнение шлифовальных кругов различных структур можно провести по площади сечения в произвольном направлении режущего профиля абразивных зерен, выступающих над поверхностью инструмента (рис. 2.25).

Съем материала при шлифовании происходит, по образному выражению И.М. Брозголя, в результате "прочесывания" удаляемого припуска режущим рельефом шлифовального круга. Режущий

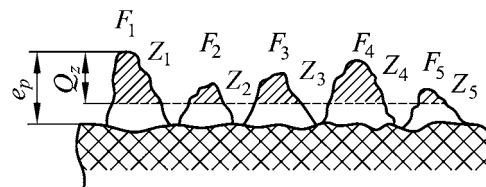


Рис. 2.25. Сечение режущего профиля зерен на рабочей поверхности шлифовального круга

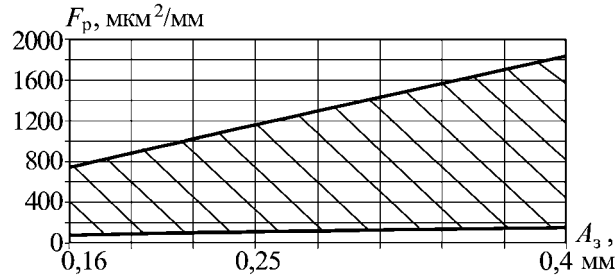


Рис. 2.26. Возможный диапазон площади сечения режущего профиля круга из электрокорунда белого со структурой 12 в зависимости от его зернистости

рельеф зерен, участвующих в работе съема материала, будет определяться их количеством, характером распределения по рабочей поверхности круга и по высоте, а также площадью сечения каждого режущего элемента.

Статистически обобщив данные Д.Б. Ваксера, автор предложил площадь сечения режущего элемента абразивных зерен связать с радиусом округления ρ их вершин, углом β и глубиной внедрения h в виде [80]

$$f = 3,059h^{1,489} \rho^{0,599} \beta^{-0,081}. \quad (2.46)$$

Площадь режущего рельефа зерен Z_s , находящихся на рабочей поверхности круга, должна учитывать их разновысотность и соответственно переменную толщину среза (глубину внедрения) для каждого из них. Так как распределение зерен по высоте подчиняется симметричному закону (обычно нормальному), то можно принять, что для всех зерен, находящихся во взаимодействии с обрабатываемым материалом, средняя толщина стружки составит $a_z/2$.

Приняв во внимание эти уточнения, можно получить для сечения режущего рельефа формулу в общем виде:

$$F = K_n Z_s P_e e_p h, \quad (2.47)$$

где K_n — коэффициент перекрытия; $e_p = a_z$; $h = a_z/2$.

Если раскрыть составляющие, получаем сечение режущего профиля круга

при шлифовании с толщиной срезаемого слоя a_z в виде следующего выражения:

$$F = 1,66 a_z^2 \frac{V_3^{0,67} \rho^{0,6}}{A^{2,5} \beta^{0,08}}. \quad (2.48)$$

Размерность сечения режущего профиля по (2.48) рассчитывается в мкм^2 или мм^2 на единицу площади рабочей поверхности абразивного инструмента. Так как на этой поверхности находится достаточно большее число зерен, то велика вероятность, что при проецировании их сечений на сечение удаляемого припуска при шлифовании они будут перекрываться друг другом.

Расчетную оценку мгновенного или рабочего сечения режущего рельефа можно произвести через число зерен Z_e на единице длины рабочей поверхности круга:

$$Z_e = \frac{1}{l_3(h)}, \quad (2.49)$$

где $l_3(h)$ — средневероятное расстояние между зернами, вычисляемое по формуле (2.15).

С учетом формул (2.47)–(2.49) получаем площадь рабочего сечения в виде:

$$F_p = 1,346 \frac{V_3^{0,33}}{A_3^{1,25}} a_z^{1,74} \frac{\rho^{0,6}}{\beta^{0,08}}. \quad (2.50)$$

На рис. 2.26 показан диапазон возможных сечений режущего профиля кругов 12-й структуры из электрокорунда бе-

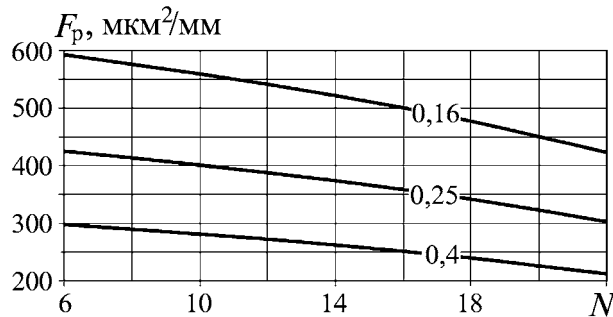


Рис. 2.27. Изменение сечения режущего профиля кругов из электрокорунда белого разной зернистости в зависимости от номера структуры при толщине среза 20 мкм

лого зернистостью 16, 25 и 40. Диапазон ограничен минимальным сечением, когда достигается порог резания ($a_z/\rho = 0,5$), и максимальным – для случая $a_z = e_p$.

Картина, представленная на рис. 2.26, оказалась ожидаемой: при увеличении зернистости от 16 до 40 минимальная площадь рабочего сечения возрастает в 1,9 раза, а максимально возможная его площадь увеличивается почти в 2,5 раза. В одинаковых условиях шлифования, при которых обеспечивается средняя толщина срезаемой стружки 20 мкм, рабочее сечение режущего профиля для зернистости 16 оказывается больше, чем для зернистости 25 и 40 (рис. 2.27).

С увеличением номера структуры шлифовального круга площадь его рабочего сечения уменьшается, поэтому вероятность наложения срезов при удалении припуска также уменьшается. Соответственно увеличивается средний объем, удаляемый отдельным зерном. Если разделить сечение удаляемого припуска $1 \times 0,02$ мм на сечение режущего профиля F_p , рассчитанного по (2.50) для глубины внедрения $a_z = 0,02$ мм, то получим коэффициент перекрытия. Его величина косвенно оценивает степень дисперсности удаляемого материала за счет наложения срезов от зерен, следующих друг за другом. Чем больше коэффициент перекрытия, тем больше степень дисперсности срезаемого

материала и тем больше вклад составляющих работ резания от пластической деформации и трения в общий энергетический баланс шлифования. С уменьшением коэффициента перекрытия у кругов с высокими номерами структур в энергетическом балансе резания возрастает вклад собственно работы формирования новой поверхности при общем снижении работы шлифования.

Усилие шлифования пропорционально площади сечения удаляемого материала, поэтому при одинаковых условиях обработки высокопористые круги всегда дают снижение силы резания.

Приведенные результаты теоретического анализа подтверждают наблюдаемые экспериментально преимущества высокопористых шлифовальных кругов, связанные с уменьшением усилий и температуры шлифования.

2.5. ИСХОДНЫЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ДЛЯ ВЫБОРА АБРАЗИВНОГО ИНСТРУМЕНТА

Контактное взаимодействие внедрением выступающих зерен рабочей поверхности круга в обрабатываемый материал с последующим его удалением формирует источник волн напряжений. Пульсирующий характер действующих напряжений обусловлен дискретным и аддитивным действием отдельных абразивных

зерен на обрабатываемую поверхность детали.

Волны напряжений с одинаковой начальной интенсивностью в контактном слое взаимодействия распространяются в деталь и шлифовальный круг, но по-разному. В шлифовальном круге, имеющем дискретную полиморфную структуру, волны напряжения быстро затухают: зона их действия охватывает только 2–3 слоя абразивных зерен [51].

В обрабатываемом материале, например металле, имеющем более плотную и более однородную структуру, волны напряжений распространяются с более высокой скоростью и на большую глубину. Энергия пластической деформации и разрушения металлов трансформируется в тепловой поток, который создает зону опережающего разупрочнения обрабатываемого материала перед движущимися абразивными зёрнами инструмента. Эффект снижения прочности металла от его предварительного нагрева при шлифовании экспериментально подтвердил С.Н. Корчак.

Процесс шлифования протекает как процесс взаимного воздействия текущего состояния рабочей поверхности шлифовального круга на обрабатываемый материал и, соответственно, его физико-механического состояния на трансформацию режущей способности инструмента. Сопутствующая резанию деградация режущего рельефа круга приводит к изменению термодинамических условий формирования свойств поверхностного слоя обрабатываемой детали.

Из-за существенных различий в явлениях, сопровождающих процесс шлифования, его формализованное описание обычно дается либо с позиций поведения обрабатываемого материала детали, либо с позиций реакции шлифовального круга на внешнее воздействие.

Шлифование относится к процессам обработки апикального типа, в которых формообразование детали происходит

путем удаления поверхностных слоев с заготовки. Поэтому основные физико-химические явления и изменения происходят также в поверхностных слоях двух взаимодействующих тел, в отличие, например, от процессов обработки объемного типа – формообразованием литьем или давлением.

В технологической системе шлифования станок–приспособление–инструмент–деталь шлифовальный круг является самым слабым элементом. От его режущих, прочностных и теплофизических свойств зависит эффективность действия всей системы шлифования в целом, включая уровень реализации ее технического потенциала по скорости, производительности, точности и качеству обработки.

Представляя собой замыкающее звено в системе резания, шлифовальный круг воспринимает возмущения случайного и систематического характера, обусловленные нестабильностью размеров припуска, свойств обрабатываемого материала, частоты вращения шпинделя, скоростей перемещения исполнительных органов станка, развитием колебательного процесса в зоне контакта инструмента с деталью и др. Это обстоятельство накладывает дополнительные требования к свойствам инструмента сверх тех, которые необходимы для выполнения условий шлифования по чертежу обрабатываемой детали.

До вступления в контакт с обрабатываемым материалом абразивный круг целесообразно рассматривать не как рабочую часть технологической системы, а как самостоятельное физическое тело, обладающее комплексом физических, химических, термических и других свойств. Свойства, характеризующие тело, можно классифицировать по масштабу их проявления на *объемные* и *поверхностные*. К объемным относятся упругие (модуль упругости), вязкие (коэффициент вязкости), прочностные (предел прочности на сжатие, изгиб, разрыв), демпфирующие (коэффициент внутреннего трения), термические (теплопроводность, теплоем-

кость, температуропроводность), а также условная твердость кругов, определяемая по глубине внедрения индентора или пескоструйной лунки. Эти свойства не зависят от условий шлифования и являются постоянными характеристиками данного инструмента. К поверхностным свойствам относятся геометрические характеристики рельефа и фрикционные характеристики пары абразив–металл. Последние не являются некоторым постоянным свойством тела (в отличие от объемных), а существенно зависят от условий их определения (материала контртела, времени опыта и т.п.).

Перечисленные свойства абразивного инструмента проявляются в неявном виде через стандартизированные параметры: материал абразива, зернистость, твердость, структура, тип связки и др., которые не раскрывают физической индивидуальности инструмента. Более того, такая характеристика шлифовального круга чаще всего не отражает набор его объемных и поверхностных свойств, необходимых для эффективного выполнения конкретных операций шлифования.

Процесс шлифования можно отнести к разновидности агрессивного формообразования за счет суперпозиции множества элементарных актов удаления материала единичными зёрнами, неоднородно распределёнными по сечению удаляемого припуска. Вероятностная природа процесса съема материала в этой связи обусловлена проявлением большого количества взаимосвязанных или независимых возмущений, имеющих случайную природу. К основным из них можно отнести следующие:

- непостоянство физико-механических свойств абразивных материалов: микротвердость наиболее распространенных абразивных материалов изменяется в диапазонах для электрокорунда нормального 0,18...0,25, белого 0,19...0,29, монокорунда 0,21...0,28, карбида кремния зеленого 0,25...0,37, карбида бора 0,33...

0,49, кубического нитрида бора 0,73...1 и алмаза 0,8...1. Большая нестабильность характерна также для прочности, модуля упругости, плотности и др;

- большое разнообразие форм и размеров абразивных зерен одной зернистости и связанное с ними рассеяние радиусов округлений и углов заострений режущих кромок;

- неоднородное распределение абразивных зерен на рабочей поверхности шлифовального круга как по высоте (разновысотность), так и по поверхности. На случайный характер распределения зерен на рабочей поверхности инструмента накладывается дополнительно их случайная ориентация относительно поверхности заготовки;

- разброс физико-механических свойств связки инструмента, обусловленный неоднородностью химического состава и распределения компонентов, различием коэффициентов термического расширения зерен и связки, нестабильностью условий обжига и др;

- случайный характер размеров пор и их распределения в объеме шлифовального круга и др.

Отмеченные свойства шлифовального круга определяют стохастический характер съема материала вследствие формирования срезов различной формы и размеров; наложения срезов; непрерывно изменяющегося количества режущих и упрочняющих зерен и их соотношения; изменения режущих свойств зерен или их совокупности во времени. Это создает неоднородный температурно-силовой режим в микрообъемах зоны шлифования, изменяющийся во времени и по площади зоны обработки.

Кроме того, для шлифования присутствуют случайные возмущающие факторы, обусловленные нестабильностью физико-механических свойств обрабатываемого материала, удаляемого припуска, статических и динамических характеристик элементов технологической системы. Однако

их действие существенно меньше, чем влияние шлифовального круга, так как высокий нагрев обрабатываемого материала разупрочняет его и снижает рассеяние его физико-механических свойств.

От надежности работы шлифовальных кругов зависит надежность функционирования автоматизированных станочных систем. Основная масса шлифовальных кругов проходит испытание на механическую прочность, поэтому вероятность внезапных отказов из-за разрушения инструмента мала. Значительно выше вероятность отказов в результате потери инструментом своей режущей способности, вызванной износом.

Время безотказной работы шлифовального круга, т.е. период его стойкости до правки, становится лимитирующим параметром при определении времени безотказной работы всей технологической системы резания. Надежность шлифования определяется выполнением требований точности и качества обрабатываемых заготовок и ритмом их выпуска за период стойкости инструмента.

Работоспособность шлифовальных кругов изменяется в результате совместного действия механизмов хрупкого разрушения зерен, их абразивного истирания, диффузионного и адгезионного изнашивания, а также вырыва зерен из связки.

Если при шлифовании активно протекают явления истирания режущих кромок с налипанием на них стружки и заполнением пор круга, то изнашивание идет в режиме затупления. При этом шлифовальный круг быстро теряет свою режущую способность и требует частой правки. Затупление характерно при шлифовании алмазными кругами и кругами из карбида кремния сталей, а электрокорундовыми кругами при обработке титановых сплавов. Такое изнашивание наблюдается также и при использовании оптимальных с точки зрения химической инертности сочетаний абразив–обрабатываемый материал при обработке на мягких режимах.

Затупление сопровождается уменьшением фактической глубины шлифования и, следовательно, производительности, возрастанием силы и температуры резания, появлением прижогов и трещин на обрабатываемой поверхности детали.

Если абразив химически инертен к обрабатываемому материалу, а нагрузки, действующие на режущие зерна, достаточны, чтобы разрушить их с образованием новых режущих элементов и удалить с рабочей поверхности по мере уменьшения размера зерна, то в этом случае происходит самовосстановление работоспособности инструмента. Самовосстановление – это изнашивание круга как процесс самозатачивания его рабочей поверхности. При этом производительность, сила и температура резания сохраняются практически постоянными на всем протяжении времени обработки.

Самозатачивание сопровождается периодическим восстановлением режущей способности круга, а шлифование можно рассматривать как стационарный случайный процесс. Правка круга необходима для восстановления формы его рабочей поверхности. Период времени между правками регламентируется условиями поднастройки круга на обрабатываемый размер детали и требованиями к форме инструмента.

На рис. 2.28 показан типичный характер изменения режущей способности шлифовального круга от времени обработки при его изнашивании в режиме самозатачивания. В качестве характеристики режущей способности круга использовано отношение P_z/Q_m , т.е. тангенциальной составляющей силы резания к минутному съему материала.

Промежуточное положение занимает изнашивание с частичным самозатачиванием или с частичным затуплением. В этом случае круг сохраняет работоспособность более длительное время, чем при режиме затупления. Правка необходима для восстановления исходной режущей

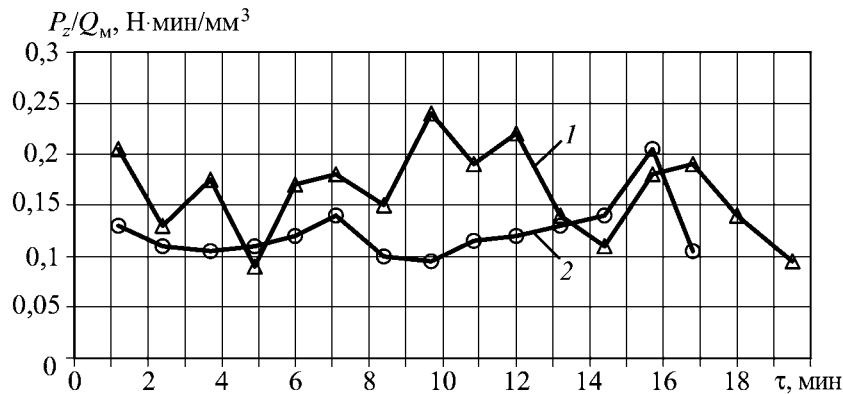


Рис. 2.28. Изменение режущей способности шлифовального круга с характеристиками 63 25 CM1 6 K (1) и 25A 25 CM1 6 K (2) от времени обработки

способности круга и формы его рабочей поверхности.

Из-за разноразмерности абразивных зерен и неравномерности их распределения на рабочей поверхности круга формируется своеобразный режущий рельеф, параметры которого зависят от характеристики инструмента, его рецептурного состава и технологии изготовления. Большое многообразие форм и размеров абразивных зерен одной зернистости в сочетании с рассеянием радиусов округлений и углов заострений их режущих кромок дополняет и усложняет наблюдаемую картину. На случайный характер распределения зерен на рабочей поверхности инструмента дополнительно накладывается их случайная ориентация относительно поверхности заготовки. Условия правки круга и его эксплуатации, при которых происходит частичное разрушение и вырыв отдельных зерен, вносят также изменения в характер распределения зерен, участвующих в работе, к тому же изменяющийся во времени.

Неоднородный термодинамический режим взаимодействия шлифовального круга с обрабатываемой поверхностью детали создает предпосылки для формирования неоднородного напряженно-деформированного состояния в поверхностном слое.

Решающее значение в этой связи приобретает правильное назначение характеристики шлифовального круга с тем, чтобы в экстремальных условиях шлифования обеспечить благоприятный режим в зоне резания в основном за счет стабильной режущей способности и равномерного изнашивания инструмента по всей рабочей поверхности.

Процесс шлифования является очень интенсивным источником теплообразования — температура в зоне контакта шлифования круга и заготовки достигает температуры плавления обрабатываемого материала независимо от его марки (включая жаропрочные и тугоплавкие материалы). На интенсивность теплообразования основное влияние оказывает характеристика шлифовального круга и условия его правки, а также режим обработки. Скорость и время нагрева обрабатываемой детали и распределение тепловых потоков в зоне обработки в значительной степени зависят от режима шлифования и применения охлаждения.

Теплота, которая образуется при шлифовании, неоднородно распределяется в зоне обработки: 60...80 % теплоты идет в деталь, 10...20 % — в стружку, 5...10 % — в шлифовальный круг.

Применение высокопористых шлифовальных кругов со структурой 12...18 и

выше существенно снижает интенсивность теплообразования при шлифовании и соответственно температуру обрабатываемой поверхности заготовки, снижая риск появления шлифовальных дефектов – прижогов, трещин и др.

При увеличении скорости круга и глубины обработки возрастает доля теплоты, переходящая в стружку, что, однако, не приводит к существенному изменению температуры детали, так как интенсивность теплообразования, пропорциональная скорости шлифования, при этом увеличивается.

Снижение интенсивности теплообразования – в этом главное назначение высокопористых шлифовальных кругов. С этой точки зрения их применение эффективно при больших площадях контактирования инструмента с обрабатываемой поверхностью детали и форсированных режимах шлифования. Высокопористые круги, у которых при одинаковых режимах длина дуги контакта круга с деталью больше, чем при круглом наружном шлифовании, предпочтительны при внутреннем и плоском шлифовании. Они вне конкуренции на операциях профильного шлифования зубчатых колес, шлицевых и резьбовых соединений, беговых дорожек и других фасонных поверхностей подшипников и шариковых силовых передач, фасонного режущего инструмента, штампов, пресс-форм, хвостовиков турбинных и компрессорных лопаток газовых и гидравлических двигателей и других деталей из самых разнообразных конструкционных материалов.

Хорошие режущие свойства высокопористые круги демонстрируют при шлифовании поверхностей после химико-термической обработки: цементации, азотирования, нитроцементации, хромирования и др. При правильно подобранных характеристиках инструмента и режимах обработки не проявляются не только дефекты шлифовочного характера, но и возможные дефекты от химико-термической обработки.

Альтернативы высокопористым кругам нет при освоении процессов глубинного шлифования взамен методов лезвийной обработки.

В настоящее время процессы лезвийной обработки (фрезерование, протягивание и др.) успешно вытесняются прогрессивной схемой глубинного шлифования с использованием высокопористого абразивного инструмента. Как показывает анализ, глубинное шлифование имеет ряд достоинств и перед традиционной схемой маятникового шлифования.

Сравнительные испытания этих двух схем шлифования при обработке магнитных материалов при одинаковой производительности по минутному съему материала показали, что процесс глубинного шлифования в сравнении с маятниковым обеспечивает лучшие показатели работоспособности круга, включая статистические показатели стабильности, изнашивания, удельной производительности, динамической напряженности и шероховатости обработанной поверхности.

Очевидно, что улучшение технологических показателей процесса должно сопровождаться и повышением экономических показателей обработки. В этой связи был выполнен сравнительный анализ лезвийной обработки и глубинного шлифования по стоимости съема 1 см^3 материала. Оценка по этому показателю позволяет не учитывать технологические различия сравниваемых процессов резания.

Лезвийная обработка. Если принять, что лезвийный инструмент стоимостью $C_{\text{и}}$ за период эксплуатации претерпевает k переточек стоимостью $C_{\text{п}}$ каждая, то затраты на инструмент, отнесенные к 1 см^3 материала, составляют:

$$W_{\text{и}} = \frac{C_{\text{и}} + kC_{\text{п}}}{kS_{\text{м}}BtT}, \quad (2.51)$$

где $S_{\text{м}}$ – скорость стола (минутная подача); B – ширина обработки; t – глубина шлифования; T – период стойкости инструмента.

Стоимость основного времени с учетом тарифной ставки рабочего C_p равна:

$$W_p = C_p / (S_m B t), \quad (2.52)$$

и в итоге получаем для лезвийной обработки:

$$W_{\text{л}} = W_{\text{и}} + W_p = \frac{C_{\text{и}} + k C_{\text{п}} + k T C_p}{k S_m B t T}. \quad (2.53)$$

Глубинное шлифование. При непрерывной правке шлифовального круга износ его происходит за счет правки. Время, за которое круг изнашивается до критического размера $D_{\text{кр}}$, составит:

$$\tau = \frac{D - D_{\text{кр}}}{2 Q_{\text{пр}}}, \quad (2.54)$$

где $Q_{\text{пр}}$ – скорость правки (скорость правящего ролика).

Затраты только на абразивный инструмент составят

$$W_{\text{и}} = \frac{2 C_{\text{и}}}{C_{\text{ст}} B t} \frac{Q_{\text{пр}}}{D - D_{\text{кр}}}, \quad (2.55)$$

а с учетом затрат на правящий ролик

$$W_{\text{и}}^* = \frac{2 C_{\text{и}}}{v_{\text{ст}} B t} \frac{Q_{\text{пр}}}{D - D_{\text{кр}}} + \frac{W_p}{Q_m}, \quad (2.56)$$

где $C_{\text{ст}}$ – стоимость 1 мин работы станка; W_p – стоимость ролика; $v_{\text{ст}}$ – скорость стола; Q_m – объем материала, удаленного за период эксплуатации ролика.

Общие затраты при глубинном (или врезном) шлифовании с учетом стоимости основного времени составят при односторонней обработке:

$$W_{\text{а}} = \frac{2 C_{\text{и}}}{v_{\text{ст}} B t} \frac{Q_{\text{пр}}}{D - D_{\text{кр}}} - \frac{W_p}{Q_m} - \frac{C_p}{n v_{\text{ст}} B t}, \quad (2.57)$$

где $n = 1$ при односторонней обработке и $n = 2$ при двухсторонней обработке (например, на станках Elb-Schliff при шлифовании замков лопаток).

В случае многопроходной обработки, когда припуск удаляется за два-три и более проходов, формула (2.57) приобретает вид:

$$W_{\text{а}} = \frac{2 C_{\text{и}}}{B \sum_{i=1}^k v_{\text{ст}i} t_i} \frac{Q_{\text{пр}}}{D - D_{\text{кр}}} - \frac{W_p}{Q_m} - \frac{C_p}{n B \sum_{i=1}^k v_{\text{ст}i} t_i}. \quad (2.58)$$

Для наиболее распространенного случая обработки с циклической правкой ролика формула (2.58) преобразуется к виду:

$$W_{\text{а}} = \frac{2 C_{\text{и}}}{B \sum_{i=1}^k t_i L_i} \frac{z}{D - D_{\text{кр}}} + \frac{W_p}{Q_m} - \frac{C_p}{n B \sum_{i=1}^k v_{\text{ст}i} t_i}, \quad (2.59)$$

где z – число проходов при правке.

Рассмотрим конкретный пример замены фрезерования твердосплавной фрезой елочного профиля замка лопатки из жаропрочного сплава ЖС6-ВИ на процесс глубинного шлифования высокопористым шлифовальным кругом из электрокорунда белого.

Анализ конкретного случая обработки показал, что при замене фрезерования профильным глубинным шлифованием производительность обработки возрастает в 8,1 раза, а шероховатость обработанной поверхности уменьшается в 3 раза. При этом затраты на сьем 1 см³ металла при фрезеровании составляют в 2,5 раза больше, чем при глубинном шлифовании.

Представляет также интерес структура затрат в приведенных примерах. При фрезеровании 86 % затрат приходится на инструмент и 14 % – на зарплату рабочего. При шлифовании 26,5 % затрат идет на абразивный инструмент, 69 % – на правящий ролик и 4,5 % – на зарплату рабочего. В этой связи улучшение технико-экономических показателей глубинного шлифования должно проводится прежде всего за счет оптимизации технологических условий правки, включая выбор оптимальной характеристики правящего ролика.

При назначении параметров режима шлифования выбирается отношение $q = v_{кр}/v_d$, величина которого влияет на точность геометрической формы обрабатываемой поверхности и время ее нагрева при обработке. Чем больше q , тем эквидистантнее профиль цилиндрической поверхности окружности при круглом наружном и внутреннем шлифовании и тем прямолинейней поверхность детали, обрабатываемой на плоскошлифовальном станке. Но одновременно увеличивается время контактирования шлифовального круга с обрабатываемой поверхностью и соответственно время нагрева. В этом заключается негативная сторона повышения q .

Обычно используемый в практике шлифовальный диапазон значений q составляет при круглом наружном и внутреннем шлифовании 20...100, а при плоском – 60...210. Для профильного глубинного шлифования, например, хвостовиков турбинных лопаток из жаропрочных никелевых сплавов в зависимости от выбранного соотношения $v_{кр}$, $v_{ст}$ и t значение q может изменяться от $6 \cdot 10^2$ до $3,6 \cdot 10^4$, т.е. на три порядка больше, чем в технологических схемах маятникового шлифования.

В крайне неблагоприятных условиях теплообразования, когда сочетаются большая мощность теплового источника с продолжительным нагревом зоны резания, после глубинного шлифования формируется поверхностный слой детали с минимальными структурными искажениями, наклепом, сжимающими остаточными напряжениями.

Схема глубинной обработки наиболее распространена при плоском шлифовании. При оптимизации параметров режима обработки обычно обращается внимание на сопротивление процессу съема материала, т.е. на величину силы резания.

Обобщенная модель тангенциальной составляющей силы резания для кругов различных характеристик при плоском шлифовании жаропрочных никелевых

сплавов может быть связана с параметрами режима следующим образом [17]:

$$P_z = C_p t^{0,6...0,77} v_d^{0,4...0,49} v_{кр}^{-(0,42...0,46)}.$$

Из представленной модели следует, что предпочтительней увеличивать глубину резания t , чем скорость продольного перемещения детали v_d . Возможные комбинации t и v_d для шлифования никелевых сплавов лежит в диапазоне: от $t = 0,005$ мм и $v_d = 20$ м/мин до $t = 10$ мм и $v_d = 50$ мм/мин. С учетом принятого диапазона t и v_d можно установить целесообразные области применения схем маятникового и глубинного шлифования.

Возможны два альтернативных варианта: съем заданного припуска за один проход круга с малой скоростью и его удаление за n проходов со скоростью v_d , в n раз большей, чем при глубинном шлифовании. При таком идеализированном подходе выясняется, что при удалении припуска толщиной до 2 мм по скорости съема материала равноценны оба варианта. Для удаления припуска более 2 мм рационально использовать только глубинную схему шлифования.

По технологическим схемам глубинное шлифование разделяют на шлифование с попутной вращению круга подачей и на шлифование со встречной подачей (рис. 2.29). Эти схемы значительно отличаются по тепловым явлениям в зоне контакта, производительности обработки и шероховатости обработанной поверхности.

При обработке материалов с пониженной теплопроводностью, таких как литейные жаропрочные или титановые сплавы, предпочтительной является схема с попутной подачей. Максимальное количество выделяющегося тепла концентрируется в удаляемых слоях материала, не успевая нанести повреждение поверхности обработки. Этому также способствует обильное охлаждение наиболее нагретого участка и включение в процесс резания новых участков абразивного круга, час-

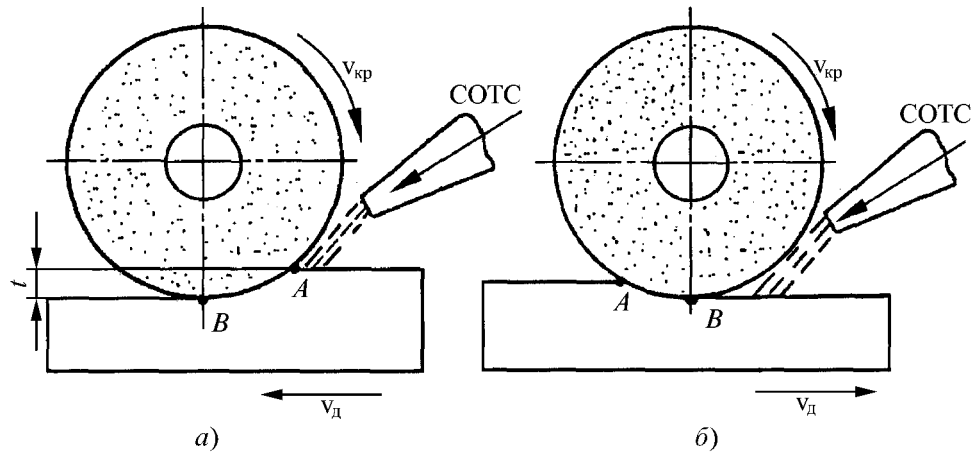


Рис. 2.29. Технологические схемы глубинного шлифования:
а – с попутной вращению круга подачи; б – со встречной подачи

тично освобожденных от стружки в порах и насыщенных жидкостью. В конечную точку контакта (точка *B*) круг приходит с заполненными стружкой порами, в результате чего проявляется повышенный полирующий эффект. При этом производительность на 20...30 % выше, чем с использованием встречной подачи при прочих равных условиях.

Глубинное шлифование вязких конструкционных сталей с высокой теплопроводностью предпочтительно осуществлять со встречной подачи. Вследствие высокой теплопроводности удаляемые слои материала являются более эффективным барьером для проникновения большого количества сконцентрированного тепла вглубь и исключения повреждения плоскости обработки, а интенсивное охлаждение именно этой плоскости способствует получению поверхности без тепловых повреждений. При обработке жаропрочных материалов по этой схеме в районе точки *A* концентрируется большое количество тепла, проникающего ниже плоскости обработки и вносящего тепловые повреждения. Обильное охлаждение срезаемых слоев материала ближе к точке *B* уже не гарантирует высокое качество обработанной поверхности.

2.6. ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ ДЕФЕКТОВ ШЛИФОВОЧНОГО ХАРАКТЕРА

Особенностью процесса шлифования является интенсивное теплообразование в зоне обработки с нагревом до температур плавления обрабатываемого материала. Автор наблюдал после шлифования тугоплавких сплавов на основе вольфрама и молибдена застывшие капли металла на рабочей поверхности шлифовального круга, что свидетельствует о нагреве до 2600...3400 °С.

Сочетание высоких температур и скоростей нагрева с последующим быстрым охлаждением создает предпосылки для структурно-фазовых превращений в поверхностном слое обрабатываемого материала и, как следствие, возможное появление дефектов шлифовочного характера – прижогов, микротрещин, сколов и др.

Дефекты в виде прижогов и трещин снижают долговечность, например, зубчатых колес в 3...8 раз, подшипников качения в 2...3 раза, их контактную прочность до 30...40 %, а стойкость вырубных штампов в 10...30 раз. Прижоги, распространяющиеся на глубину до 90...100 мкм и уменьшающие твердость обрабатываемого

мой поверхности с 60 до 50 HRC, уменьшают долговечность деталей из стали 12Х2Н4А до 8 раз, предел контактной прочности – на 20...30 %. При наличии прижогов, контактная выносливость стали ШХ15 снижается примерно в 4 раза, а грузоподъемность шариковых винтовых передач в 2 раза [99, 101].

Преимуществом высокопористых кругов является то, что при их технически грамотном использовании дефекты шлифовочного характера не возникают. Более того, производительность шлифования кругом высокой пористости при условии обеспечения одинакового качества обработки на уровне границы бесприжоговой зоны может быть увеличена в 1,5...2,0 раза по сравнению с кругом нормальной структуры [59].

Рассмотрим более подробно природу возникновения дефектов при шлифовании, чтобы установить рациональные пути их предотвращения.

Природа дефектов на шлифованной поверхности детали может быть различной. Они могут оказаться следствием неправильной предшествующей термообработки (закалки или химико-термической обработки) и вскрываться при последующем шлифовании. В процессе же шлифования формируются дефекты сугубо шлифовочного характера, появление и количество которых зависит от неблагоприятных термодинамических условий обработки и шлифуемого материала.

Последний фактор имеет принципиальное значение для качественной обработки: от типа обрабатываемого материала зависит возможность или невозможность предотвращения дефектов шлифовочного характера. При шлифовании металлических материалов правильным подбором характеристики инструмента, условий его правки, режимов обработки и охлаждения можно избежать их появления на поверхности детали. В случае шлифования неметаллических материалов, хромовых и других электролитических покрытий сьем происходит по меха-

низму хрупкого разрушения, при котором новая поверхность формируется за счет образования микро- и субмикротрещин, часть из которых остается в поверхностном слое обработанной детали. Для их удаления необходимы дополнительные операции финишной обработки.

В производстве важно правильно установить причину появления дефектов на поверхности детали, чтобы в дальнейшем ее устранить улучшением технологии изготовления. Безусловны также и требования к процессу шлифования: его организация должна предусматривать возможные негативные факторы появления дефектов, включая технологическую наследственность обрабатываемой детали.

Появление прижогов и микротрещин на шлифованной поверхности детали является следствием теплового фактора. А.А. Михайлов, однако, показал, что одного нагрева недостаточно, чтобы спровоцировать разрушение поверхности при шлифовании. Превалирующим фактором является силовой, действие которого создает предпосылки для разрыва межзеренных границ или межкристаллитных фаз, ослабленных нагревом.

При неблагоприятных условиях шлифования практически всех известных конструкционных материалов могут возникать указанные дефекты. У пластичных и малопластичных материалов: сталей, чугунов, сплавов на основе титана, никеля, тугоплавких металлов, твердых сплавов и других – после шлифования чаще наблюдаются прижоги и микротрещины. После обработки хрупких и твердых материалов: керамики, магнитных материалов и т.п. – основными шлифовочными дефектами являются сколы. Сколы появляются также, например, и при шлифовании отсечных кромок у плунжерных пар гидросистем из закаленных легированных сталей.

Нагрев любого материала всегда сопровождается изменением его физико-механических свойств и структурно-фазового состояния, но кинетика этих

изменений зависит от химического состава материала, условий его силового нагружения при шлифовании и сопутствующих явлений нагрева и охлаждения.

Г.Б. Лурье описал в своей работе [41] особенности структурно-фазовых превращений при шлифовании закаленных сталей. Закаленные стали при шлифовании претерпевают структурные и фазовые превращения. Быстрый нагрев мартенситной структуры до температуры выше A_{c3} вызывает превращение ее в аустенит. Структурные превращения сопровождаются изменением тетрагональной решетки аустенита. Верхний, вторично закаленный слой; лежит обычно на слое отпущенного металла, который по мере углубления постепенно переходит через все стадии отпуска в исходную структуру закалки. Это объясняется воздействием нижележащих нагретых слоев металла.

Соотношение структурных составляющих аустенита и мартенсита в поверхностном слое определяет знак и величину остаточных напряжений, возникающих при шлифовании закаленных сталей. В том случае, когда в поверхностном слое металла в результате шлифования стали с мартенситовой структурой количество аустенита свыше 50 % и имеется в наличии относительно глубокий слой отпущенного металла, в поверхностных слоях возникают напряжения растяжения, возрастающие с увеличением количества остаточного аустенита и глубины отпущенного слоя. Если преобладающей окажется мартенситная составляющая, т.е. составляющая с большим удельным объемом, и отпущенный слой будет незначительным, то в результате такого сочетания в поверхностном слое появятся остаточные напряжения сжатия.

Таким образом, теплота, выделяющаяся при шлифовании, оказывает на обрабатываемую поверхность одновременно упрочняющее действие, проявляющееся в образовании вторично закаленного слоя повышенной твердости, и разупрочняющее действие, выражающееся в отпуске

поверхностно закаленного слоя. При небольшой глубине слоя, находящегося под влиянием высоких температур, превалирует упрочняющее действие тепла. В тех случаях, когда имеет место большая глубина распространения теплоты, наблюдается уменьшение поверхностной твердости детали, снижение глубины вторично закаленного слоя и появление растягивающих остаточных напряжений. Отпуск поверхностного слоя в таких случаях происходит под действием теплоты нижележащих слоев.

Закаленная углеродистая сталь имеет структуру тетрагонального мартенсита и остаточного аустенита. При отпуске закаленной стали в интервале 80...200 °C происходит превращение тетрагонального мартенсита в кубический, что связано с уменьшением объема. Отпуск в интервале 200...260 °C вызывает превращение остаточного аустенита в кубический мартенсит и соответственно некоторое увеличение объема. Отпуск в пределах 260...400 °C способствует образованию троостита, что сопровождается уменьшением объема.

Для стали с содержанием 1,2 % углерода при переходе тетрагонального мартенсита (структура закалки без отпуска) при температуре 400 °C в троостит объем уменьшается приблизительно на 4 %. При шлифовании детали, подвергнутой дополнительному отпуску, под действием такой же температуры шлифования произойдет превращение кубического мартенсита в троостит, что вызовет уменьшение объема приблизительно на 2 %. При шлифовании стали, подвергнутой отпуску при температуре превращения тетрагонального мартенсита в кубический, возникают меньшие объемные изменения, поэтому опасность образования трещин уменьшается.

Прижоги при шлифовании. Зона прижога – это поверхность отпущенного металла с пониженной твердостью. Визуально она выглядит темнее остальной. Мягкие трооститные пятна проявляются в

виде темных пятен с размытыми границами, прижоги – в виде темных пятен или штрихов с резко выраженными границами. Прижоги со вторичной закалкой – в виде более светлых пятен, окаймленных полоской обычного прижога, обезуглероженные места – в виде более светлых пятен без каймы с размытыми границами.

Появление прижогов зачастую обусловлено дополнительным воздействием технологических факторов обработки – биением шлифовального круга, нестабильностью удаляемого припуска, кинематическими особенностями применяемой схемы шлифования и др. В этой связи прижоги особенно часто появляются при шлифовании фасонных поверхностей кругами нормальной структуры.

В работе [99] приведены примеры возможных прижогов после шлифования фасонных поверхностей. В зависимости от схемы шлифования прижоги на фасонных поверхностях располагаются в виде отдельных пятен, чередующихся полос или отдельных мелких штрихов.

Например, при шлифовании беговых дорожек колец шарикоподшипников, профиля резьбы ходовых винтов, спирально-конических зубчатых колес прижоги имеют вид отдельных пятен. При шлифовании зубчатых колес тарельчатыми кругами на боковых поверхностях зубьев появляются прижоги в виде отдельных штрихов. При шлифовании колес конусным кругом прижоги имеют вид узких полос, проходящих вдоль всего зуба. Замечено, что расстояние между полосами прижогов при шлифовании зубчатых колес на станках мод. 5831 зависит от частоты вращения кривошипа, а расстояние между штриховыми прижогами на боковых поверхностях зубьев обратно пропорционально частоте вращения тарельчатых кругов. Опытами установлено, что темные штриховые полосы на рабочей поверхности зубьев колес после шлифования на данных станках повторяются через один оборот шлифовального круга. Причиной появления таких циклических

прижогов является дисбаланс шлифовального круга.

При шлифовании резьбы винтов прижоги появляются на одной из боковых поверхностей нитки профиля. Основной причиной такого расположения является неравномерность снимаемого припуска, обусловленная накопленной погрешностью в шаге. При шлифовании беговых дорожек колец шарикоподшипников прижоги появляются на боковой стороне профиля, расположенной к торцу, которым кольцо прижимается к магнитному патрону.

Иногда прижоги на обработанной поверхности после шлифования могут визуально и не просматриваться, а их наличие можно установить только специальным травлением.

Прижоги, которые распространяются на небольшую глубину – до нескольких мкм, можно удалить повторной обработкой, исключаяющей появление новых дефектов.

Статистика свидетельствует, что неисправимый брак по шлифовочным прижогам может достигать 10...50 %. Часто вместе с прижогами на шлифованной поверхности детали формируются трещины.

В зависимости от режимов обработки, обуславливающих интенсивность и продолжительность нагрева зоны шлифования, Д.Г. Евсеев выделил два основных вида структурных превращений в закаленных сталях (на примере сталей марок 45, 40Х, У8, ШХ15, 18ХН3А) [21]:

В одном случае верхний слой – вторичной закалки аустенито-мартенситный – лежит на отпущенном слое металла (троостит и мартенсит), который переходит в результате всех стадий отпуска в структуру исходного, термически нормально обработанного металла (мартенсит отпуска).

Для этой структуры характерно наличие на поверхности так называемого белого нетравящегося слоя вторичной закалки с повышенной твердостью и небольшой глубиной залегания. Он перехо-

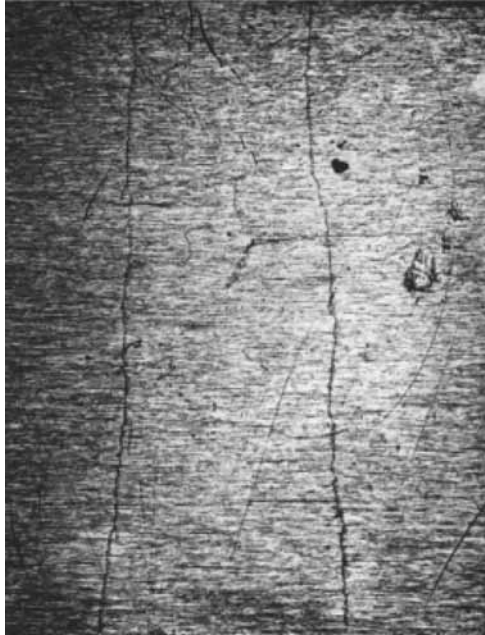


Рис. 2.30. Трещины на обработанной поверхности молибденового сплава BM2, расположенные перпендикулярно направлению шлифования. $\times 5$

дит в слой вторичного отпуска с твердостью, пониженной на 20...30 %.

В другом верхний слой вторично отпущенного металла со структурой троостита и мартенсита переходит в структуру исходного металла – мартенсита отпуска – через переходный слой вторичной закалки со структурой аустенито-мартенсита или без него.

Трещины при шлифовании. Наиболее часто при шлифовании закаленных сталей встречается структура с наличием на поверхности отпущенного слоя с развитием растягивающих остаточных напряжений. Они становятся причиной разрушения поверхности обрабатываемого материала либо по границам зерен, либо по основному металлу.

Трещина, образовавшаяся в отпущенном слое, распространяется в радиальном направлении, но распространению ее на поверхность препятствует слой вторичной закалки, находящийся под дейст-

вием сжимающих напряжений. Чем дальше от поверхности расположен очаг трещин, чем толще вторично закаленный слой и больше сжимающие напряжения в нем, тем меньше вероятность выхода трещин на поверхность.

Трещины от шлифования расположены параллельно между собой и под прямым углом к направлению шлифования. Появление шлифовочных трещин сопровождается прижогами. Чувствительность шлифуемой стали к прижогам и трещинам возрастает с повышением твердости выше 55 HRC, а также с увеличением содержания легирующих добавок. Отпуск закаленной стали при температуре 150...180 °С снижает чувствительность шлифуемой стали, так как теплопроводность стали, прошедшей после закалки отпуск, больше, чем у стали, прошедшей только закалку. Наличие остаточного аустенита способствует образованию трещин. Это вызвано тем, что остаточный аустенит является неустойчивым и может переходить в мартенсит под действием местного нагрева.

Важно подчеркнуть, что микротрещины, причиной появления которых стали неблагоприятные условия шлифования на обработанной поверхности детали, располагаются перпендикулярно направлению движения шлифовального круга (рис. 2.30). Другой характер распространения трещин у закаленных сталей может свидетельствовать о том, что металл перед шлифованием был перенапряжен термической или химико-термической обработкой. В этом случае в процессе шлифования вскрываются дефекты, заложенные предшествующей операцией термического упрочнения детали.

По мнению авторов работ [61, 100], появление трещин обусловлено действием суммарных напряжений от неоднородной пластической деформации в разных зонах поверхностного слоя обрабатываемой детали. Чувствительность к трещинообразованию возрастает с увеличением исходной твердости стали. Например, при

шлифовании зубчатых колес из стали 18ХНВА с исходной твердостью 58...60 HRC трещины на рабочих поверхностях зубьев появляются очень редко. С повышением твердости до 64...65 HRC чувствительность материала к появлению шлифовальных трещин возрастает. После шлифования материалов с высокой исходной твердостью под воздействием тепловых явлений в тонком поверхностном слое возникают резкие ее перепады вследствие появления в глубинных слоях структур отпуска. Распад мартенсита на троостито-сорбитную и бейнитную структуры вызывает в поверхностном слое появление растягивающих напряжений, пропорциональных градиенту твердости материала.

Замечено, что далеко не на всех шлифованных поверхностях, имеющих явно выраженные прижоги, возникают трещины, и, наоборот, шлифовочные трещины иногда появляются на поверхностях деталей, на которых отсутствуют прижоги.

Сложнолегированные стали и сплавы содержат в своей структуре дефекты, которые служат источником концентрации напряжений и являются местом зарождения трещины. Например, в цементуемых сталях ослабление межзеренных границ вызывает цементная сетка, в жаропрочных сплавах – интерметаллидная сетка; в металлокерамических сплавах – неметаллические включения и поры. Охрупчивание высокохромистым сталям придает карбидная строчечность. В зависимости от структуры материала и режимов обработки шлифовочные трещины располагаются перпендикулярно направлению движения режущих зерен или, имея замкнутый вид, по границам контура бывших аустенитных наследственных зерен, сформировавшихся при высокотемпературных нагревах предшествующих операций.

Границы обрабатываемых деталей в направлении движения источника выполняют роль адиабатических преград, вбли-

зи которых происходит накопление тепла по мере приближения к ним теплового источника. Области, прилегающие к таким границам, оказываются в более тяжелых температурных условиях по сравнению с отдаленными участками. Аналогичную роль в создании повышенной теплонапряженности процесса играют раковины, поры и интерметаллидные включения, встречающиеся на пути движения зоны контакта шлифовального круга с обрабатываемой поверхностью.

Теплонапряженность процесса шлифования и технологическая наследственность материалов имеют прямое отношение к трещинообразованию.

В цементуемых и азотируемых сталях и жаропрочных сплавах шлифовочные трещины обычно распространяются в области стыка встречных пластически деформированных зон металла. Наиболее мягкие фазы деформируются больше, причем деформация имеет характер пластического сдвига. Сдвиги фаз распространяются не прямолинейно, а по плоскостям, имеющим наименьшее сопротивление деформации. Характер образующихся трещин в плоскости обработки подтверждает наличие эффекта сдвига в направлении, перпендикулярном следам обработки. Явление сдвига указывает на концентрацию локальных напряжений по границам наследственных аустенитных зерен.

Смещение следов режущих зерен свидетельствует о том, что шлифовочная трещина появилась на поверхности детали не в момент действия сил резания в зоне контакта, а в момент резкого охлаждения поверхностного слоя, когда зона вышла из под круга. Тончайшие поверхностные слои, подвергаясь интенсивному охлаждению, уменьшаются в объеме. Глубинные слои, препятствуя этому уменьшению, порождают появление временных термоупругих растягивающих напряжений. При определенных условиях шлифования величина временных термоупругих напряжений, зависящая от скорости ох-

лаждения и температуры нагрева поверхности, превышает предел прочности материала.

Слой металла разрушается в наиболее ослабленных участках. Такими ослабленными участками являются границы зерен, по контуру которых обычно сплошным слоем выделяются шлаковые или иные неметаллические включения. Сдвиговый характер разрушения поверхности детали по границам зерен металла обусловлен еще и тем, что внутри каждого наследственного зерна содержатся более мелкие зерна дисперсных продуктов распада, по-разному ориентированных по отношению к контуру наследственного зерна. Различно ориентированные зерна фаз в силу анизотропии свойств при нагревании расширяются, а при охлаждении сокращаются в объеме, что также является одной из причин возникновения напряжений на границах зерен.

При шлифовании заготовок из жаропрочных сплавов, цементуемых, азотируемых и закаливаемых сталей, имеющих в структуре цементитную или интерметаллидную сетку, трещины в виде замкнутого контура располагаются по границам зерен. При шлифовании с малыми глубинами резания и подачами деталей с хромированными, борированными и другими гальваническими покрытиями, а также заготовок из сталей и сплавов, не имеющих дефектов структуры, шлифовочные трещины располагаются перпендикулярно направлению движения режущих зерен.

Установлено, что при глубине шлифования $t = 0,03$ мм поверхностный слой нагревается до температуры $700...900$ °С, но глубина проникновения этих температур не превышает $0,01...0,02$ мм.

Большие градиенты температур и скорости охлаждения поверхностного слоя вызывают появление больших растягивающих напряжений, под воздействием которых тончайшие слои металла разрушаются на мелкие ячейки. При увеличении глубин резания за счет изменения баланса тепла температура поверхностно-

го слоя изменяется не существенно, но увеличивается глубина проникновения высоких температур. При этих условиях уменьшается температурный градиент и скорость охлаждения, а также количество энергии, приходящейся на разрушение единицы объема металла. Размеры замкнутых контуров шлифовочных трещин и глубина их проникновения увеличиваются.

Существенное влияние на трещинообразование оказывает продольная подача стола. Например, после шлифования твердосплавных пластин из Т5К10 и Т15К6 на плоскошлифовальном станке 3Г71 с глубиной резания $t = 0,03$ мм и различными скоростями стола $v_{ст} = 3; 8; 12$ и 15 м/мин (без поперечной подачи) с помощью цветной дефектоскопии обнаружены трещины.

После шлифования с малыми подачами трещины в виде мелких продольных штрихов глубиной $0,01...0,02$ мм направлены перпендикулярно движению режущих зерен. Увеличение продольной подачи видоизменяет их форму и пропорционально увеличивает глубину залегания до $0,5...1$ мм.

На трещинообразование при шлифовании оказывают существенное влияние вид и способ подвода в зону резания смазочно-охлаждающей жидкости. Например, смазочно-охлаждающая жидкость на водной основе не понижает температуру в зоне контакта за счет теплообмена, а охлаждает разогретую поверхность после выхода ее из зоны контакта. При этом резко увеличивается скорость охлаждения тонких поверхностных слоев и возрастает вероятность появления шлифовочных трещин. Например, после шлифования плоских образцов из стали Х12М кругом 24А 40 СМ2 К с глубинами резания $t = 0,01; 0,03; 0,05$ и $0,07$ мм с продольной подачей $v_{ст} = 5$ м/мин с охлаждением 0,5%-ным содовым водным раствором на всех образцах, шлифованных обычным кругом, обнаружены трещины в виде сетки замкнутого контура. С увеличением

глубины резания укрупняются контуры трещин и увеличиваются глубины их проникновения в металл. После шлифования без охлаждения обнаружены единичные прямолинейные трещины.

При шлифовании сталей физическая природа появления прижогов и трещин обусловлена формированием в поверхностном слое структур с различной плотностью от $7,76 \text{ г/см}^3$ у мартенсита до $7,83 \text{ г/см}^3$ у троостита и $8,15 \text{ г/см}^3$ у аустенита, что приводит к неоднородному напряженно-деформированному состоянию обрабатываемого материала.

У других конструкционных материалов причина появления дефектов шлифовочного характера может быть иной. Рассмотрим обработку тугоплавких сплавов.

Визуальными наблюдениями и металлографическим анализом установлено, что наиболее распространенными дефектами шлифования тугоплавких сплавов на основе вольфрама и молибдена являются прижоги, трещины и сколы.

Спектральным анализом и металлографическими исследованиями установлено, что прижоги представляют собой участки с рыхлой оксидной пленкой черного или коричневого цвета с различными оттенками. Микротвердость поверхности на участках с прижогами на 300...600 Н/мм² меньше по сравнению с микротвердостью участков без прижогов.

На участках с прижогами межкристаллитные границы заметно утолщены. В микроструктуре поверхностного слоя без прижога имеются очень мелкие фигуры травления, беспорядочно расположенные в пределах зерна. На участках с прижогами под действием высоких температур шлифования происходит упорядочение внутризеренной структуры сплава. Расположение фигур травления внутри каждого зерна строго ориентировано и подчиняется определенной закономерности.

Многочисленные эксперименты по шлифованию тугоплавких сплавов различными методами с последующим метал-

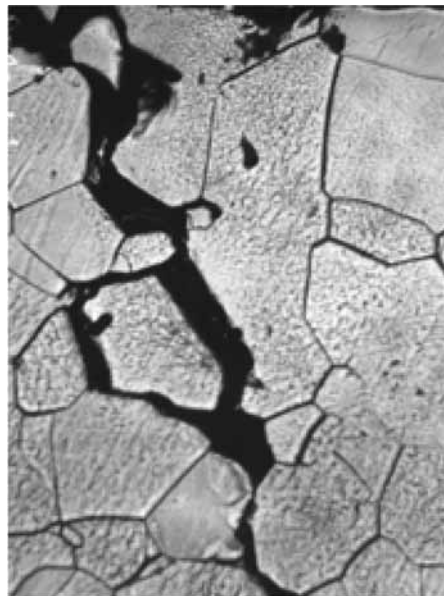


Рис. 2.31. Трещина на поверхности шлифованного образца из молибденового сплава BM2. $\times 500$

лографическим анализом поверхностного слоя позволяют установить некоторые особенности зарождения и развития шлифовочных трещин.

Появление трещин обусловлено, главным образом, неблагоприятными технологическими условиями шлифования, когда большая степень деформации поверхностного слоя сочетается с интенсивным разогревом в зоне резания.

Разрушение поверхности происходит вследствие ослабления межкристаллитной связи зерен твердого раствора тугоплавких сплавов. Даже при небольших растягивающих напряжениях трещина может распространиться на значительную глубину, так как утолщение границ зерен доходит до глубины 0,2 мм. Развитие трещин в большинстве случаев идет по границам зерен (рис. 2.31). Если возникающие напряжения превышают прочность зерна, то разрушение может идти по телу зерна. Примеси по границам зерен в этом случае служат концентраторами на напряжений и источником зарождения трещин.

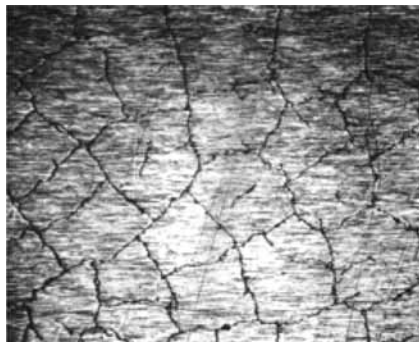


Рис. 2.32. Сетка трещин после шлифования. $\times 3$

Трещины на шлифованной поверхности могут быть отдельными или в виде сетки (рис. 2.32). На характер трещины решающее влияние оказывает направление проката исходного тугоплавкого сплава.

Кристаллическая структура пластически деформированного металла характеризуется искажением кристаллической решетки и определенным ориентированием зерен – текстурой деформации. Поэтому, например, прокату молибдена и его сплавов свойственны такие недостатки, как хрупкость вдоль направления прокатки или под углом 45° к этому направлению и анизотропия механических свойств.

При шлифовании в сечении, поперечном направлению проката, на обработанной поверхности возникает межкристаллитная сетка трещин, мелкая и чистая.

В продольном сечении образцов трещины располагаются вдоль направления проката в виде отдельных трещин независимо от направления движения шлифовального круга. Только при особо неблагоприятных условиях шлифования зарождение трещин вдоль направления проката может быть в виде очень слабой межкристаллитной сетки.

Вероятность появления трещин при постоянных условиях шлифования зависит от микроструктуры тугоплавкого сплава. Для рекристаллизованного сплава с зернистой структурой вероятность возникновения трещин больше, чем для сплавов с нерекристаллизованной структурой. На качественно обработанной по-

верхности могут быть скрытые дефекты, наличие которых можно установить только металлографическим анализом.

К числу дефектов шлифования тугоплавких сплавов можно отнести сколы целых зерен или части их.

На лопатках компрессоров из титановых сплавов и жаропрочных сталей травлением выявляются дефекты в виде разнообразных по форме пятен прижогов или визуально наблюдаемых по оксидным пленкам [99]. Места переходов от одной структуры к другой являются наиболее опасными, так как здесь концентрируются максимальные растягивающие напряжения, вызывающие преждевременное разрушение при эксплуатации.

Рентгенографические исследования фазового состава структуры титанового сплава после шлифования лопаток в зоне пятен показали увеличение высокотекстурной β -фазы от 5 до 30 % или в 6 раз. По этой причине зона прижога имеет твердость на 10...17 % меньше, чем основной материал.

Титановые сплавы, прошедшие после закалки старение, приобретают термостабильную структуру, но повышенную чувствительность к прижогам. На профиле пера лопаток у таких сплавов часто появляются характерные прижоги в виде белых пятен, твердость которых на 11...17 % больше твердости основного материала. Аномальная природа повышения твердости зоны прижога в данном случае связана с интенсивным поглощением поверхностным слоем титана водорода, кислорода и азота из атмосферы воздуха, которое начинается уже при температуре 300°C .

Несмотря на повышенную твердость зоны прижога сопротивление усталости титанового сплава снижается с 360 до 270 МПа или почти в 1,35 раз.

Условия предотвращения дефектов шлифования. Чтобы предотвратить появление дефектов шлифовочного характера необходимо понять соответствующий механизм действия факторов процесса шлифования на их появление и определить возможные пути управления этими факторами.

Температура нагрева в зоне резания, безусловно, является основным фактором развития структурных и фазовых превращений в обрабатываемом материале.

Д.Г. Евсеев показал, что наряду с температурой необходимо также учитывать скорости нагрева и охлаждения, т.е. фактор времени [21]. Снижение температуры далеко не всегда гарантирует уменьшение глубины измененного слоя. Так, даже при сравнительно небольших температурах можно получить поверхностный слой с большой глубиной распространения структурных превращений, растягивающих остаточных напряжений и укрупненных блоков, если тепловой процесс характеризовался длительным временем действия и небольшими скоростями нагрева и охлаждения.

Влияние скоростей термических процессов при шлифовании обуславливает весьма серьезные изменения глубины и характера структурных превращений и физико-механических свойств. Повышение скоростей нагрева и охлаждения приводит к тому, что структура вторичной закалки может появляться при более низких температурах, чем при обычной термообработке, а для развития процессов отпуска необходимы более высокие температуры, что приводит к уменьшению общей глубины структурно измененного слоя. Кроме того, интенсификация нагрева задерживает рост блоков когерентного рассеяния и снижение микронапряжений и плотности дислокаций, при этом повышается минимальная температура, при которой обнаруживаются изменения тонкой кристаллической структуры. Наблюдается также уменьшение глубины распространения и величины растягивающих остаточных напряжений.

Фактор времени имеет очень большое значение в процессах деформирования и разрушения материалов. Известно, что в основе атомного и субатомного механизмов этих процессов лежит теория дислокаций физики твердого тела. Пластическая деформация, упрочнение и разрушение металлов с сопутствующими

явлениями двойникования, полигонизации, дефрагментации зерен, диффузии, релаксации и т.д. являются следствием зарождения и развития субструктур из несовершенств кристаллического строения – линейных (дислокаций) и точечных (вакансий, дислоцированных атомов и др.) дефектов. Степень завершенности возможных дислокационных структур зависит от времени.

В.С. Иванова, например, показала, что если в металле при данной скорости деформирования и данной температуре плотность дислокаций $\rho(\sigma)$ успевает стать равной величине, которая соответствует заданному уровню действующего напряжения σ за время, равное времени задержки пластического течения, то металл будет деформироваться пластически. Если этого не произойдет, то металл будет склонен к хрупкому разрушению [65].

Субструктурные изменения в кристаллической решетке деформируемых материалов обусловлены также действующими напряжениями и скоростями деформирования. В процессах резания скорость деформации обрабатываемого материала достигает $10^3 \dots 10^6 \text{ с}^{-1}$ (при статических испытаниях на сжатие и растяжение скорость деформации $10^{-3} \dots 10^{-4} \text{ с}^{-1}$), при больших (до 2000 МПа) давлениях в зоне контакта.

Как показано автором [85], высокая скорость деформации в сочетании с большой ее интенсивностью приводит к снижению температурного порога структурно-фазовых превращений обрабатываемого материала. Это явление экспериментально установлено на примерах обработки строганием электротехнической стали 1511 и жаропрочного никелевого сплава ЖС6-КП. Так, в стали полигонизация в зоне резания началась при температуре в 1,3 раза более низкой, чем она протекает в условиях нагрева без нагрузки. При строгании сплава ЖС6-КП коагуляция упрочняющей интерметаллидной γ' -фазы аналогична той, которая происходит за 100 ч при температуре 950 °С без действия нагрузки, произошла за время $5 \cdot 10^{-2} \text{ с}$.

Таким образом, начало развития и степень завершенности субструктурных изменений в материалах и, как следствие, его структурно-фазовых превращений зависят от термодинамических условий нагружения: действующего напряжения, скорости и времени деформирования с сопутствующей интенсивностью и скоростью нагрева и охлаждения. Сочетание указанных факторов в сторону их увеличения может привести к снижению температурного порога начала необратимых изменений в структуре обрабатываемого материала и повышенного риска появления дефектов шлифовочного характера.

Процесс шлифования протекает со скоростями деформации на 2...3 порядка более высокими, чем при обработке резанием лезвийным инструментом, при достаточно больших удельных давлениях и с чрезвычайно высокими температурами нагрева. Такой уровень термодинамической напряженности зоны шлифования создает предпосылки для снижения температурного порога начала и интенсивного развития неблагоприятных и необратимых изменений в обрабатываемом материале, предшествующих появлению дефектов шлифовочного характера.

Чтобы предотвратить появление дефектов шлифовочного характера, необходимо подобрать такие условия обработки, включая, прежде всего, состав и характеристику шлифовального круга, чтобы уменьшить силовое воздействие, нагрев зоны резания и время его контактирования с обрабатываемой поверхностью. Минимизируя все составляющие указанной триады, действующие одновременно и взаимосвязано в процессе шлифования, а именно: давление, температуру и время – можно гарантированно создать предпосылки для бездефектной обработки. В этом заключаются теоретические основы решения данной проблемы.

В качестве практических примеров ее решения можно рекомендовать увеличение структурности и зернистости шлифовального круга, снижение твердости и замену абразивного материала. При увели-

чении скорости круга всегда возрастает риск появления дефектов, а если повысить скорость перемещения обрабатываемой поверхности относительно инструмента, то вероятность появления дефектов снижается. Для уменьшения работы трения в зоне резания полезней поменять состав СОТС, чем интенсифицировать его подачу.

Обильное охлаждение, например, водными растворами различного состава, обладающими наилучшим охлаждающим эффектом, не всегда может гарантировать предотвращение дефектов шлифовочного характера. Иногда, особенно для закрытых зон контакта с большими площадями, благоприятный эффект может оказать применение масел или растворов на их основе. В этом случае снижение работы трения зерен круга с обрабатываемой поверхностью детали минимизирует интенсивность теплового источника шлифования.

Выбрать оптимальный вариант характеристики абразивного круга, режимы шлифования и охлаждения для конкретных условий обработки с целью предотвращения возможных дефектов бывает трудно из-за разнополярного действия оптимизирующих факторов. Увеличение скорости детали, с одной стороны, повышает силу резания, а с другой – уменьшает время контакта круга с деталью, поэтому результирующее воздействие на температуру обрабатываемой поверхности может быть различным [21].

Наиболее удобным, доступным и универсальным средством предотвращения дефектов при шлифовании, как показывают исследования [4, 13, 17, 24, 33, 59, и др.], промышленный опыт и результаты, изложенные в данной монографии, является применение высокопористых шлифовальных кругов. Как правило, только повышение номера структуры с 6...8 до 10...12 инструмента оказывается достаточным, чтобы устранить прижоги и трещины шлифованной поверхности детали. Реже приходится изменять и другие параметры характеристики круга (зернистость, твердость), но при этом появляется возможность форсировать процесс съема материала.

Глава 3

НОВЫЕ ПРИНЦИПЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ВЫСОКОПОРИСТОГО АБРАЗИВНОГО ИНСТРУМЕНТА

Новые технологические принципы изготовления высокопористого абразивного инструмента основаны на применении невыгорающих порообразователей: корундовых, стеклянных и силикатных полых микросфер в сочетании с выгорающим порообразователем в виде молотых фруктовых косточек. Объемное строение, технологические и эксплуатационные свойства такого инструмента заметно отличаются от высокопористого инструмента открытой структуры, технология производства и опыт применения которого описаны в разделе 1.2.

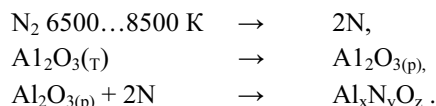
Применение невыгорающих порообразователей в виде полых микросфер является оригинальным и перспективным направлением в производстве высокопористого абразивного инструмента [76]. Чтобы оценить технологические и эксплуатационные возможности невыгорающих порообразователей и соответственно установить рациональную область их использования, целесообразно ознакомиться с технологией их изготовления, гранулометрическим и химическим составом, а также физико-механическими свойствами. Комплекс указанных свойств предлагаемых порообразователей оказывает большое влияние на весь спектр свойств высокопористых кругов, начиная от технологичности изготовления до их работоспособности при шлифовании.

3.1. НЕВЫГОРАЮЩИЕ ПОРООБРАЗОВАТЕЛИ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ВЫСОКОПОРИСТОГО АБРАЗИВНОГО ИНСТРУМЕНТА

Корундовые микросферы. В литературе приводятся сведения о производстве

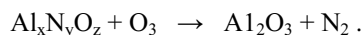
различных типов оболочек из оксидов металлов. Наиболее полная информация по технологии получения, свойствам и областям применения таких частиц приведена в работе [1]. Полые неорганические частицы изготавливаются из различных стекол, перлита, золы, отложений лавы и т.д. Из керамических материалов производятся два вида микросфер: корундовые и глиноземные (силикатные).

Получение полых микросфер из корунда основывается на оригинальном плазмохимическом процессе. В общем виде процесс может быть представлен уравнениями:



Индексы (т) и (р) отражают фазовое превращение оксида, а x , y и z являются дробными числами и указывают на сложный состав гетерофазных оксинитридов, зависящий от параметров процесса (соотношение азот/аргон в разряде, мощность разряда, расход шлифпорошка и т.д.).

На выходе из разрядной камеры, т.е. в плазменной струе, расплавленные частицы оксинитридов алюминия взаимодействуют с кислородом, который диффундирует в объем капель и реагирует с нитридной фазой оксинитрида по уравнению:



Именно на этой стадии плазмохимического процесса развивается гидродинамический процесс формирования полых микросфер. В начальный момент реакции

в объеме оксинитридных капель происходит зарождение субмикронных пузырьков, наполненных азотом. Эти пузырьки, вбирая азот из прилегающего к ним объема расплава, растут, сливаясь под действием сил Лапласа и поверхностного натяжения в более крупные. Процесс завершается образованием однополостных оболочек расплавленного оксида алюминия, которые при охлаждении превращаются в микросферы.

Важная особенность гидродинамического процесса заключается в том, что скорость роста и развития газовой полости в расплавленных оболочках падает при движении их в плазменной струе с быстро понижающейся температурой, что приводит к замедлению диффузии азота через стенки оболочек и удержанию его до отвердения в микросфере.

Масс-спектрометрическим анализом корундовых микросфер различного гранулометрического состава установлено, что газовые полости содержат 82...99 % азота, 1...17 % кислорода и некоторое количество углекислого газа. При этом содержание азота в микросферах диаметром 80...125 мкм составляет не менее 95 %, а для фракции 200...250 мкм не превышает 83...84 %. Полученные данные подтверждают рассмотренный выше механизм образования корундовых микросфер, поскольку стенки мелких микросфер (80...125 мкм), как показывают электронно-микроскопические снимки, практически не содержат сквозных микротрещин, в то время как большая часть микросфер диаметром более 200 мкм имеет разрывы или трещины в стенках, через которые происходит диффузионное натекание воздуха.

Таким образом, корундовые микросферы полифракционного состава являются экологически чистым материалом и обеспечивают это важное преимущество новому поколению высокопористых шлифовальных кругов при их изготовлении.

Количественный анализ процесса получения корундовых микросфер, вы-

полненный для единичных частиц с использованием уравнений движения, нагрева, гидродинамики и химической кинетики, позволил сделать вывод о том, что стадиями, определяющими скорость всего процесса, является нагрев (полное расплавление) частиц корунда в разряде и гидродинамическое развитие газовых полостей в оболочках в зоне плазменной струи.

Разработанная промышленная технология производства корундовых микросфер на основе вышеизложенного плазмохимического процесса включает три последовательные стадии.

На *первой стадии* исходное сырье – промышленный шлифпорошок электрокорунда (обычно марки 25 А зернистостью 6...8) обрабатывается углеродосодержащими соединениями (графитом, сажей). Эта технологическая операция имеет важное значение и, по существу, обеспечивает реализацию производственного процесса, поскольку углерод, нанесенный на поверхность шлифпорошка, выступает в роли эффективного катализатора плазмохимической реакции расплавленного оксида алюминия с диссоциированным (атомарным) азотом. Для проведения поверхностной обработки электрокорунда используется стандартное промышленное оборудование (смеситель и грохот), обеспечивающие высокопроизводительный экономичный процесс.

Вторая стадия – собственно процесс получения корундовых микросфер – реализуется в специально разработанном технологическом блоке, основным узлом которого является высококачественный плазматрон.

Третья стадия процесса включает ситовое фракционирование полученных микросфер. Эта операция осуществляется на обычном грохоте с набором стандартных ситовых полотен (например, 80...112 мкм) и обеспечивает получение материала с регулируемой плотностью, практически не содержащего сплошных оплавленных частиц электрокорунда (сплош-

3.1. Химический состав корундовых микросфер

Химический состав	Содержание, % по массе	Химический состав	Содержание, % по массе
Al_2O_3	99,4...99,8	Fe_2O_3	0,01...0,03
SiO_2	0,1...0,5	C	0,01...0,04
$\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$	0,01...0,03		

ных микрошариков) диаметром 20...80 мкм, являющихся основным отходом в производстве полых микросфер.

Химический состав и основные характеристики корундовых микросфер представлены в табл. 3.1 и 3.2.

Фракционный состав корундовых микросфер (табл. 3.3), изготавливаемых в промышленных масштабах, зависит от использованной модификации электрокорунда и его зернистости и может регулироваться в достаточно широких пределах со средним размером 103 мкм (вариант 1), почти 132 и 171 мкм для вариантов 2 и 3 соответственно. В зависимости от выбора варианта изготовления корундовых микросфер в их фракционном составе могут преобладать фракции от 84,3 до 160,4 мкм – более 77 % для вариантов 1 и 2 и фракции от 112,8 до 261,6 мкм – 74 % для 3-го варианта изготовления.

Данные табл. 3.3 содержат информацию о наличии конкретной фракции, если

есть необходимость обеспечить заданное соотношение между размером абразивных зерен и корундовых микросфер в высокопористом шлифовальном круге.

Принципиальной особенностью корундовых полых микросфер является идеальная геометрическая форма шара и тонкая стенка, что позволяет вскрывать их при действии сосредоточенной нагрузки в несколько сотых долей ньютона. Такое сочетание формы и толщины стенки обеспечивает достаточную прочность порообразователю в условиях гидростатического сжатия при прессовании формочной массы и образование дополнительных режущих кромок и пор на рабочей поверхности круга при его правке и шлифовании. Этим корундовые микросферы существенно разнятся со сферокорундом (см. раздел 1.1), который представляет собой пустотелые сферы неправильной формы с толстой стенкой.

На рис. 3.1 представлена фотография корундовой микросферы, которая находится на поверхности алмазного круга на металлической связке. Условия изготовления инструмента на металлической связке достаточно жесткие, тем не менее корундовая микросфера находится в "рабочем" состоянии в качестве порообразователя с возможностью участия в процессе шлифования.

Особенностью корундовых микросфер является толщина их стенок, зависящая от размера микросфер. Так как раздув сфер производится из абразива одной зернистости, то чем больше получается диаметр микросферы, тем меньше толщина ее стенки.

3.2. Свойства корундовых микросфер

Свойства	Значения
Плотность, г/см ³ :	
истинная	0,52...0,65
насыпная	0,28...0,40
Температура плавления, °C	2000
Микротвердость, ГПа	2200
Толщина стенки, мкм	2...6

3.3. Фракционный состав корундовых микросфер

Размер фракции, мкм	Содержание фракций, % по массе					
	1-й вариант		2-й вариант		3-й вариант	
	Диапазон изменения	Среднее значение	Диапазон изменения	Среднее значение	Диапазон изменения	Среднее значение
564...261,6	0...0,2	0,1	—	—	4,3...8,3	6,3
261,6...160,4	3,4...4,9	4,15	9,8...11,6	10,4	44,9...52,9	48,9
160,4...112,8	28,5...30,2	29,35	65,1...68,4	66,3	19,5...30,2	24,85
112,8...84,3	48,4...47,4	47,9	14,0...15,2	14,9	3,9...9,6	6,75
84,3...64,6	15,3...12,9	14,1	2,4...2,9	2,6	1,3...6,1	3,7
64,6...50,2	0,7...0,8	0,75	4,1...6,2	5,0	4,3...5,1	4,7
50,2...39,0	0,9...1,3	1,1	0,3...0,9	0,5	1,1...1,5	1,3
39,0...30,3	2,8...2,3	2,55	0,05...0,15	0,1	0,3...1,6	0,95
30,3...23,7	0,1...0	—	0,06...0,14	0,1	0,7...2,0	1,35
23,7...18,5	—	—	—	—	0,4...0,6	0,4
18,5...14,5	—	—	0,05...0,12	0,1	0,2...0,3	0,25
14,5...11,4	—	—	—	—	0,1...0,2	0,15
11,4...9,1	—	—	—	—	0,1...0,2	0,15



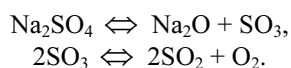
Рис. 3.1. Корундовая микросфера на поверхности алмазного круга на металлической связке. $\times 1500$

Корундовые микросферы как материал были созданы для теплозащиты, поэтому их введение в объемную структуру шлифовального круга может изменить его теплофизические характеристики.

Стекланные микросферы. Стекланные микросферы – это материал, который, в отличие от корундовых микросфер, широко используется для различных целей в судостроении, авиации, медицине, производстве взрывчатых веществ и т.д.

Получение стекланных микросфер основано на свойстве некоторых специально изготовленных стекол вспениваться при нагреве до температуры 850...1300 °С. Этот процесс протекает особенно эффективно, если стекло предварительно измельчено до частиц размером в несколько десятков микрон. Химический состав стекла может быть различным, но он обязательно содержит в объеме так называемый скрытый газообразователь – компонент шихты, который при варке стекла разлагается с образованием в расплаве химически растворенного газа.

В качестве такого газообразователя при получении стекланных микросфер обычно используют сульфат натрия. Через этот компонент в стеклannую массу при варке вводится серый ангидрид SO₃ как продукт термического разложения сульфата натрия по уравнениям:



Успешное проведение варки, т.е. получения стекла, пригодного для изготовления микросфер, обеспечивается с учетом известных в стеклоделии представлений о равновесном разложении Na₂SO₄ в силикатных расплавах. Так, уменьшение констант равновесия химических реакций при понижении температуры указывает на первое условие варки: температура в печи должна быть минимальной, но достаточной для полного завершения процесса стекловарения, включая гомогенизацию и создание структуры расплава. Второе ус-

ловие варки в соответствии с уравнением заключается в создании и сохранении над расплавом окислительной атмосферы, что обеспечивает сдвиг равновесия влево.

Система SiO₂ – Na₂O – CaO – B₂O – ZnO, выбранная для получения стекла, позволила получить составы, сочетающие низкую температуру размягчения, устойчивость к воздействию влаги, высокие механические характеристики, а также возможность регулирования в широких пределах содержания газообразователя в стекле и, следовательно, плотность изготовления микросфер.

Легкоплавкие стекла обеспечили возможность получения микросфер при температурах, не превышающих 1100 °С, что на 550...750 °С ниже, чем корундовых микросфер. Это позволяет использовать обычные газовые горелки с высокой тепловой мощностью.

Технологический процесс получения стекланных микросфер реализован в промышленном масштабе и включает пять последовательных стадий:

1. Варка стекла в печи непрерывного действия и выработка полученной массы на эрклезах.

2. Измельчение эрклеза в микропорошок стекла регулируемого гранулометрического состава. Эта технологическая операция выполняется на струйной мельнице, обеспечивающей совмещение помола и классификацию порошка по размеру.

3. Нагрев (сферолизация) микропорошка стекла в восходящем пламени горелок, работающих на смеси природный газ–воздух; при температурах 850...1100 °С микрочастицы стекла расплавляются и под действием продуктов термического разложения сульфата формируются в тонкостенные оболочки – микросферы.

4. Разделение продукта сферолизации по плотности на микросферы (70...90 %) и микрошарики (10...30 %).

5. Сушка микросфер и микрошариков.

Технологический процесс завершается упаковкой микросфер и возвратом

3.4. Химический состав стеклянных микросфер

Химический состав	Содержание, % по массе
SiO ₂	76...78
Na ₂ O	8...10
CaO	6...7
B ₂ O	3...4
ZnO	2

микрошариков на повторную сферолизацию или на варку стекла в качестве обратного боя.

Химический и гранулометрический составы стеклянных микросфер представлены в табл. 3.4 и 3.5.

Плотность стеклянных микросфер составляет: истинная – 0,21...0,40 г/см³, насыпная – 0,11...0,25 г/см³. Толщина стенок изменяется от 0,5 до 2 мкм, а температура размягчения – 700...750 °С.

Стеклянные микросферы в России выпускаются трех модификаций: МС-ВП-А9, МС-ВП-Г9 и МС-ВП-Д9, которые между собой отличаются плотностью (соответственно 0,3; 0,28 и 0,41 г/см³), прочностью на гидростатическое сжатие, которая для 10 %-ного уровня разрушения составляет соответственно 23; 60 и 140 и коэффициентом заполнения объема (соответственно 63, 65 и 60 %). Первые две модификации стеклянных микросфер производятся с аппретом 0,3 %, а третья – без аппрета.

3.5. Гранулометрический состав стеклянных микросфер

Фракция, мкм	Содержание, % по массе
80...112	2...5
63...80	10...20
50...63	25...40
40...50	25...35
Менее 40	10...20

3.6. Гранулометрический состав стеклянных микросфер

Фракция, мкм	Содержание, % по массе
160...260	7
112...160	12
4...112	17
64...84	23
50...60	20
39...50	11
30...39	9
Менее 30	1

За рубежом выпускаются полые стеклянные микросферы низкой плотности с характеристиками: истинная плотность составляет 0,22 г/см³; объемная (расчетная) плотность – 0,13...0,14 г/см³. Их гранулометрический состав приведен в табл. 3.6.

Анализируя физико-механические свойства, химический и гранулометрический составы стеклянных микросфер, их участие в процессе создания пористых структур шлифовальных кругов можно объяснить следующим образом. На этапе формирования абразивной массы стеклянные микросферы вместе с корундовыми выступают в роли порообразователя и упрочняющих элементов. При спекании абразивной массы до температуры 700...750 °С стеклянные микросферы продолжают сохранять роль порообразователя в формировании устойчивого каркаса из абразивных зерен, корундовых и стеклянных микросфер и керамической связки.

Сопоставление химического состава стеклянных микросфер и керамических связок (см. табл. 1.10) показывает наличие общих компонентов: SiO₂, CaO, B₂O₃ и CaO, а это как раз те компоненты, которые, по мнению авторов работы [55], входят в состав композиций, обеспечивающих наибольшую механическую проч-

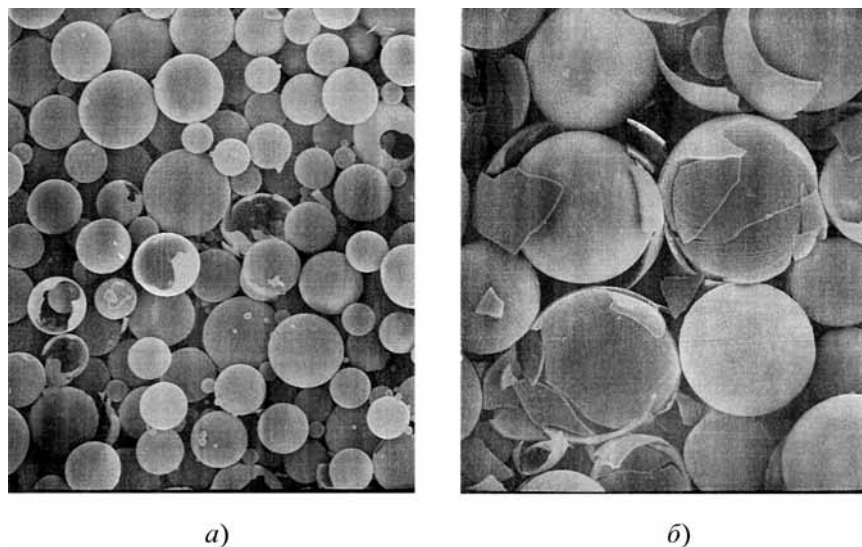


Рис. 3.2. Стекланные (а) и корундовые (б) микросферы. $\times 200$

ность и адгезию к абразивному зерну, а также к корундовым микросферам, которые имеют одинаковый состав на основе Al_2O_3 .

Таким образом, на завершающем этапе высокотемпературного спекания абразивного инструмента при температуре не менее 1250 ± 20 °С, необходимой для полного проплавления связки, и времени выдержки не менее 6...8 ч [3], происходит плавление и растворение стекланных микросфер в керамической связке, прочность которой изменяется в зависимости от количества вводимых стекланных микросфер.

В табл. 3.7 приведены характеристики полых стекланных микросфер отечественного производства.

В зарубежной практике для упрочнения шлифовальных кругов и соответственно повышения их рабочей скорости до 100...120 м/с в состав керамической связки дополнительно вводят специальный дисперсный связующий материал под названием "фрита". Фрита содержит SiO_2 , Al_2O_3 , B_2O_3 , Na_2O и K_2O , часть из этих

соединений содержится и в стекланных микросферах.

Как показал опыт применения высокопористых шлифовальных кругов с использованием стекланных микросфер, их оптимальное содержание до 5...7 % объема инструмента позволяет повысить разрывную прочность круга на 30 %. Стекланные микросферы, следовательно, могут быть конкурентоспособным аналогом фрита.

На рис. 3.2 показаны фотографии стекланных и корундовых микросфер при одинаковом увеличении. Заметно отличие их размеров при одинаковой сферической форме. Обращает внимание наличие расколотых корундовых микросфер, количество которых при использовании в качестве порообразователя может достигать 5 % от общего веса.

Силикатные микросферы. Алумосиликатные материалы широко распространены в природе. К ним относятся гранит, габбро, лабрадорит и другие декоративные камни, включая керамический гранит – искусственный строительный материал.

3.7. Характеристики полых стеклянных микросфер

Марка	Группа	Плотность, г/см ³		Размер, мкм		Минимальная прочность на сжатие, МПа	Максимальная температура применения, °С
		объемная	истинная	Диаметр	Медиана		
МС-В	1Л	0,17...0,20	0,09...0,13	9...140	50...80	1,2	650
	2Л	0,21...0,25	0,12...0,16	9...140	50...80	2,0	650
	3	0,26...0,30	0,14...0,20	7...112	40...80	4,0	650
МС-ВП	2	0,26...0,32	0,14...0,21	30...160	60...80	6,0	650
МС-ВП-А9*	1Л	0,21...0,25	0,13...0,17	30...160	60...80	4,0	150
	2	0,26...0,31	0,16...0,21	30...160	60...80	6,0	150
	3	0,26...0,31	0,16...0,21	30...140	60...80	9,0	150
	4	0,27...0,32	0,16...0,20	30...112	45...70	13,0	150
	5(НГ)	0,38...0,43	0,23...0,28	23...125	40...60	19,0	150
ВК	–	0,25...0,32	0,14...0,19	23...140	60...80	4,0	1100

* Микросферы аптретированы γ-аминопропилтриэтоксисиланом.

3.8. Химический состав силикатных микросфер Filite

Химический состав	Содержание, % по массе
Al_2O_3	27...33
SiO_2	55...65
Fe_2O_3	max 4

Алюмосиликатные или силикатные микросферы являются продуктом искусственного происхождения. Они образуются при сгорании измельченного в пыль каменного угля. Примеси в его составе в виде оксидов кремния, алюминия и других элементов при высокой температуре расплавляются и формируют сложные силикаты, в кристаллической структуре которых алюминий и кремний взаимно замещаются, образуя сложные алюмо-кремниевые соединения с катионами щелочных металлов. Под действием сил поверхностного натяжения микрокапли силикатного расплава принимают сферическую форму. Растворенные в силикатном расплаве газы раздувают микрошарики в полые микросферы, форма которых фиксируется при резком их охлаждении. После специальной технологической обработки с тщательной очисткой и расклассификацией они становятся пригодными в качестве невыгорающего порообразователя для производства абразивного инструмента.

В них отсутствуют вредные примеси, поэтому они считаются экологически безопасными продуктами. Стоимость их существенно ниже, чем стоимость корундовых микросфер и абразивных материалов, поэтому рациональное использование силикатных микросфер позволяет минимизировать себестоимость производства высокопористых шлифовальных кругов.

Силикатные микросферы, выпускаемые за рубежом, имеют две торговые марки Filite 52/7S и Filite PG, которые отличаются фракционным составом. Химический состав и основные характери-

стики указанных силикатных микросфер приведены в табл. 3.8 и 3.9.

Специальные исследования автора показали, что изготавливаемый в соответствии с рекламными данными под маркой Filite материал, представляет с морфологической точки зрения тонкостенные сферические оболочки, большая часть которых остеклована. Темный цвет оболочек связан с наличием оксидов железа, визуально наблюдаемых на поверхности оболочек. Толщина стенок микросфер составляет 2...5 мкм. Истинная плотность силикатных наполнителей – полых силикатных микросфер Filite, определенная методом гидростатического взвешивания, составляет 0,76 г/см³. Расчетная объемная плотность микросфер – 0,45 г/см³, экспериментальное значение объемной плотности составило 0,40...0,42 г/см³. Соотношение истинной и объемной плотностей указывает на их достаточно высокую герметичность.

3.9. Свойства силикатных микросфер Filite

Свойства	Значения
Плотность, г/см:	
истинная	0,6...0,8
насыпная	0,35...0,45
Твердость по Моосу	5
Размер микросфер, мкм	5...300
Толщина стенки	1/10 диаметра
Поверхностная влажность	max 0,2 %
Теплопроводность, Вт/(м·К)	0,09
Коэффициент термического расширения, 10 ⁻⁶ , °С	8
Температура плавления, °С	1200...1350

3.10. Гранулометрический состав микросфер Filite

Фракция, мкм	Содержание, % по массе
260...560	9
160...260	24
112...160	26
84...112	18
64...84	10
50...64	7

Гранулометрический состав микросфер Filite представлен в табл. 3.10.

Медианный размер этих микросфер составил 130 мкм, а диаметр, меньше которого имеют 90 % частиц, – 257 мкм. Механические свойства наполнителя Filite следует считать удовлетворительными: 10%-ный уровень гидростатической (объемной) прочности на сжатие составляет 51 МПа. Это обеспечивает введение наполнителя в абразивные массы для формования инструмента практически без его разрушения.

Для Filite 52/7 S количество микросфер с размерами менее 150 мкм составляет 55...75 %, а для марки Filite PG – 40...60 %.

Химический состав и свойства отечественного аналога силикатных микросфер представлен в табл. 3.11 и 3.12.

Информация в литературных источниках о применении силикатных микросфер в качестве порообразователя в производстве абразивного инструмента, включая высокопористый, отсутствует. В то же

время из сравнительного анализа физико-химических свойств и гранулометрического состава корундовых, стеклянных и силикатных микросфер можно ожидать, что силикатные микросферы могут быть также использованы для изготовления высокопористых абразивных кругов. Решающим фактором при их выборе является более низкая стоимость, чем корундовых микросфер.

По химическому составу силикатные микросферы близки к стеклянным микросферам и к керамическим связкам, используемым в производстве абразивного инструмента, в том числе высокопористого (см. табл. 1.10). Их температура плавления близка к температуре обжига абразивного инструмента на керамических связках – 1250 °С, но выше, чем у стеклянных микросфер. Они обладают большими размерами, чем стеклянные микросферы и близки по этому параметру к корундовым микросферам. Поэтому можно полагать, что по комплексу свойств, необходимых для невосгорающего порообразователя в высокопористых абразивных кругах, силикатные микросферы занимают промежуточное положение между корундовыми микросферами (наиболее удачный порообразователь) и стеклянными микросферами (порообразователь, упрочняющий керамическую связку).

К особенностям силикатных микросфер можно отнести их повышенную склонность к влагонасыщению как в исходном состоянии, так и при приготовлении высокопористой абразивной массы.

3.11. Химический состав отечественных силикатных микросфер

Состав	Содержание, % по массе	Рассеяние, %	Состав	Содержание, % по массе	Рассеяние, %
SiO ₂	58,0	± 5,0	CaO	0,8	± 0,1
Al ₂ O ₃	26,0	± 5,0	MgO	0,5	± 0,2
Fe ₂ O ₃	5,1	± 0,6	TiO ₂	0,4	± 0,3

3.12. Свойства отечественных силикатных микросфер

Свойства	Значения
Насыпная плотность сухого материала, г/см ³	0,35...0,45
Размер, мкм	10...500
Медианный размер, мкм	150
Твердость по Моосу	6 ± 1
Гидростатическая прочность, МПа	25...30
Теплопроводность Вт/(м ² · °С)	0,07 ± 0,003
Температура плавления, °С	1390
Влажность поставляемого материала, %	0,15...15

Среди представленной информации о химическом составе и свойствах силикатных микросфер есть настораживающий факт о достаточно большом содержании в них Fe₂O – до 5,5...5,7 %, что всегда являлось неблагоприятным фактором при изготовлении абразивного инструмента. Важным достоинством является отсутствие в их составе вредных химических компонент.

3.2. ВЛИЯНИЕ КОРУНДОВЫХ МИКРОСФЕР НА ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА ВЫСОКОПОРИСТЫХ ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ

Основной проблемой при изготовлении высокопористых шлифовальных кругов среди прочих является проблема улучшения технологических свойств абразивной массы. Технологические свойства или технологичность абразивной массы определяется ее механической прочностью, сыпучестью, формуемостью, кромокостойкостью формы при прессовании, склонностью к образованию комков, смешиваемостью и т.д. Не все указанные свойства можно объективно оценить или измерить, поэтому в работе исследовались свойства высокопористой абразивной массы, количественные оценки которой стандартизованы и поддаются измерению.

В данном разделе приведены результаты исследования влияния корундовых микросфер на прочностные свойства на образцах высокопористой абразивной массы различного состава как в сыром виде после формования, так и после высокотемпературного спекания.

Проанализированы также корреляционные связи между механической прочностью образцов высокопористой абразивной массы и их твердостью, измеренной методом Маккензена и акустическим методом. Твердость косвенно также относится к прочностным свойствам абразивного инструмента, являясь характеристикой прочности связи между абразивными зернами в объемной структуре шлифовального круга.

Исследования прочностных свойств выполнялись автором на ПО "Завод "Ильич" (г. Санкт-Петербург) и фирме Fag Kugelfischer Georg Schäfer KGaA (Германия) на их экспериментально-производственной базе. В результате совместной работы удалось не только выявить важные особенности использования корундовых микросфер в качестве порообразователя, но и сопоставить между собой отечественные и зарубежные рецептурные компоненты изготовления шлифовальных кругов. Интересно было также узнать,

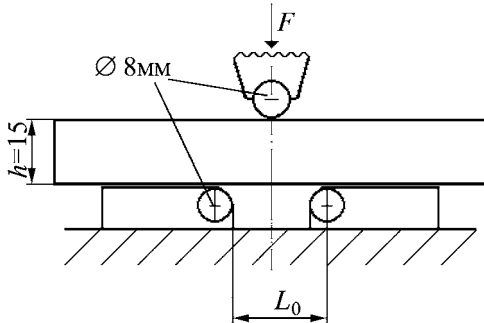


Рис. 3.3. Схема определения прочности на изгиб образцов из высокопористой абразивной массы

насколько новая технология универсальна и адаптивна к другим условиям абразивного производства.

Методика и условия проведения экспериментальных исследований. Рецептный состав высокопористой абразивной массы изменялся в широком диапазоне и включал в себя изменение относительного содержания абразивного зерна различной зернистости из электрокорунда белого марок 22А и 25А, корундовых микросфер и керамической связки марки К5, а также фирменных керамических связок V201, V1219 и V4014, свойства которых, включая температуру спекания, заметно отличались между собой.

На образцах и шлифовальных кругах исследовали следующие свойства.

Механическая прочность изучалась на сырце – образцах абразивной массы, приготовленной к формованию. Прочность сырца на излом измеряли с помощью прибора Ватти, принцип действия которого основан на измерении длины части бруска, сломавшегося под действием собственной массы при его консольном расположении. Прочность на излом вычисляли по следующей формуле:

$$\sigma_{\text{из}} = \frac{3\gamma l^2}{h} 10^2, \quad (3.1)$$

где γ – плотность (удельный вес) образцов, г/см³; l – длина отламывающихся частей бруска, мм; h – высота бруска, мм.

Размеры брусков составляли 35×13×245 мм. Эксперимент для оценки прочности повторяли не менее 3 раз.

Механическую прочность абразивной массы в сыром виде и после обжига определяли испытанием на изгиб, схема которого показана на рис. 3.3. Образцы во всех случаях имели одинаковые размеры 15×20,4×50 мм. Расчет прочности осуществлялся по формуле:

$$\sigma = 1,5 \frac{F L_0}{b h^2}, \quad (3.2)$$

где F – разрушающее усилие, L_0 – приведенная длина образца (см. рис. 3.3); b – ширина; h – высота прямоугольного образца.

Число повторений при испытании на прочность при изгибе составляло 12 раз на образцах из сырой абразивной массы и 20 раз на образцах из обожженной. Разрушающее усилие устанавливалось на приборе автоматически и изменялось в диапазоне: для сырых образцов $F = 20 \dots 98$ Н и для обожженных $F = 580 \dots 1860$ Н.

Навеска, смешивание, формование, сушка, обжиг и механическая обработка исследованных образцов и шлифовальных кругов производились по технологическому процессу и на оборудовании фирмы Fag.

Твердость. Измерение твердости образцов производили на пескоструйном приборе, действие которого основано на разрушении поверхности абразивного инструмента струей кварцевого песка, выбрасываемой сжатым воздухом из сопла указанного прибора. Глубину лунки измеряли имеющимся на приборе индикатором. Твердость абразивного инструмента оценивали по глубине, полученной на абразивном инструменте лунки, величина которой связана с размером абразивных зерен и давлением воздуха в воздушной камере. Измерение твердости осуществляли под давлением 0,08 МПа.

Модуль упругости. Фактический смысл оценки – распространение упругих

продольных колебаний в бесконечно длинном стержне. В основу его измерения заложена связь структурных характеристик абразивной массы (инструмента) и условий его изготовления с модулем нормальной упругости E и плотностью γ материала изделия.

В России акустическая оценка твердости инструмента приводится к величине звукового индекса ЗИ (см. раздел 1.1), а в Германии, Австрии и других странах эта оценка ограничивается собственно величиной E , называемой E -модулем.

Перед использованием метода акустического контроля были сомнения в его эффективности применительно к инструменту на основе микросфер. Полая корундовая микросфера по своей конструкции служит не только хорошим теплозащитным, но и звукопоглощающим средством. Однако как в данном исследовании, так и в целом по многолетнему опыту акустического контроля высокопористых шлифовальных кругов на основе различных невыгорающих порообразователей в виде микросфер, в том числе в комбинации с выгорающими фруктовыми косточками, можно констатировать, что эти сомнения не подтвердились.

В самых разнообразных использованных сочетаниях порообразования микросфера-фруктовые косточки наблюдается тесная корреляция между показателями акустического контроля и твердостью инструмента, измеренной по методу Маккензена. Наблюдаемая в отдельных случаях нестабильность показаний приборов акустического контроля (типа "Звук" отечественного производства, модели MKS "Industriel" фирмы Grindosonic и др.) имеет место не только для высокопористых кругов, но и для абразивного инструмента нормальных структур.

Статистическая обработка данных. Экспериментальные данные обрабатывались с целью получения исследуемого диапазона и математического ожидания исследуемой, как правило, случайной величины, ее среднеквадратичного отклонения и коэффициента вариации (КВ).

Разработка математических моделей и построение графических зависимостей производились по специальной программе многофакторного корреляционного и регрессионного анализов. В качестве критериев адекватности математической модели экспериментальным данным использовались коэффициент множественной корреляции (КМК) и критерий Фишера: F -критерий для КМК и F -критерий адекватности модели. Вид модели выбирался в соответствии с выбранными критериями по степени наибольшей адекватности экспериментальным данным.

Влияние состава абразивной массы на механическую прочность сырца. При изготовлении высокопористых шлифовальных кругов сложных форм и больших габаритов особое значение приобретает механическая прочность сырца. Это относится не только к устойчивости формы инструмента при прессовании, но, прежде всего, при его транспортировке, часто приводящей к браку (разрушению).

Предварительные испытания, проведенные на ПО "Завод "Ильич" для различных рецептов высокопористых кругов со структурой 12, состав которых изменялся по размеру зерна, твердости и содержанию корундовых микросфер, подтвердили принципиальную возможность и вскрыли технологические особенности их использования в абразивном инструменте. В табл. 3.13 приведены рецепты и технологические свойства исследованных кругов, состав которых представлен в весовых частях относительно содержания абразивного зерна.

Прочность сырца исследованных рецептов высокопористых кругов в 1,65... 2,2 раза превосходит прочность сырца на излом круга на основе перлита с характеристикой 25А 40П ВМ2 12 К5 П40-10 ($\sigma_{из} = 14,8$ кПа).

По каждому рецепту было изготовлено 3 шлифовальных круга, а в табл. 3.13 дан диапазон и средние значения свойств для каждого исследованного состава.

3.13. Состав и технологические свойства высокопористых шлифовальных кругов

Состав и свойства	Рецепт № 1	Рецепт № 2	Рецепт № 3	Рецепт № 4
	25А 10П ВМ2 12 К5 МС20	25А 10П М1 12 К5 МС10	25А 16П М2 12 К5 МС10	25А 25П М1 12 К5 МС15
Рецептурный состав кругов, весовые части				
Шлиф зерно	100	100	100	100
Микросферы	9,3	4,7	3,7	7,0
Связка	8,0	9,0	14,0	11,5
Жидкое стекло	5,5	5,5	5,3	5,3
Декстрин	2,0	2,0	2,0	2,0
Вода	0,5	0,5	0,5	0,5
Технологические свойства кругов				
Плотность, г/см ³	1,87	1,82	1,88	1,9
Усилие прессования, Н	80...100 (90)	50...80 (60)	35	25...40 (38,3)
Прочность на излом, кПа	24,4	—	27,6	32,9
Твердость круга по глубине лунки, мм	5,8...6,7 (6,3)	5,3...7,0 (6,1)	4,7...5,0 (4,8)	6,1...7,0 (6,5)
Степень твердости	ВМ2...М1	ВМ2...М2	М2...М3	ВМ2...М1
Примечание. В скобках приведено среднее значение параметра.				

3.14. Рецептурный состав исследованной абразивной массы

Номер структуры	Относительное объемное содержание		
	абразивного зерна	корундовых микросфер	керамической связки
14	0,34	0,20	0,09
14	0,34	0,30	0,105
14	0,34	0,30	0,12
11	0,40	0,20	0,07
11	0,40	0,20	0,08
11	0,40	0,20	0,09
6	0,50	—	0,05
12	0,38	0,20	0,08

Если внутри каждого рецепта возможен переход от одной степени твердости к другой, что обычно обусловлено температурным режимом обжига каждого отдельного круга, то в объеме одного инструмента зафиксирован высокий уровень стабильности твердости. Рассеяние глубины лунки составило от 0 до $\pm 0,15$ мм.

Стабилизация твердости в объеме шлифовального круга и повышение прочностных свойств сырца является характерной особенностью изготовления высокопористых кругов на основе корундовых микросфер. Например, для круга с характеристикой 25А 25П СМ2 14 К5 прочность сырца составила 37,8 кПа, что соответствует прочности сырца шлифовального круга из электрокорунда белого зернистостью 25П, твердостью СМ1...СМ2 со структурой 6.

Введение в формовочную массу полых невыгорающих корундовых микросфер при изготовлении высокопористых кругов позволяет обеспечить более равномерное распределение составляющих компонентов круга, что приводит к равномерному распределению пор в объеме круга, стабилизации физико-механических свойств круга. Кроме этого, повышаются формовочные свойства массы.

Очевидно, что правильная сферическая форма микросфер способствует обеспечению наилучших условий при смешивании формовочной массы. Каркас из абразивных зерен и оптимального количества микросфер равномерно окружается остальными компонентами, исключается комкуемость массы. Абразивная масса обладает лучшей сыпучестью, более однородна, перед формованием она равномерно укладывается в пресс-форме. Благодаря снижению трения, уменьшаются усилия прессования. Кроме того, форма микросфер и их однородное распределение в объеме абразивной массы приводит к снижению концентрации внутренних напряжений как в заформованном, так и в обожженном инструменте, что влияет на повышение его механической прочности.

Исследованное изменение относительного содержания абразивного зерна, корундовых микросфер и керамической связки представлено в табл. 3.14. Во всех рецептах данного исследования, а также в последующих разработках использовались корундовые микросферы без распада по варианту 1 табл. 3.3.

Данные приведены для абразивного зерна марки 22А зернистостью 46 (по

3.15. Изменение исследованных свойств высокопористой абразивной массы в сыром и обожженном виде

Характеристика абразивной массы	Значение
Относительное содержание, %:	
абразивного зерна	34...50
корундовых микросфер	0...40
керамической связки	5...10,5
Прочность на излом:	
сырца, кПа	3,4...27,1
его коэффициент вариации, %	2,8...10,1
после обжига, МПа	4,5...20,4
его коэффициент вариации, %	8,1...23,6
Удельный вес, г/см ³ :	
сырца	1,73...2,22
после обжига	1,64...2,16
Твердость:	
глубина лунки, мм	3,4...11,3
коэффициент вариации, %	1,56...17,02
Модуль упругости, ГПа:	9,6...36,9
его коэффициент вариации, %	0,82...6,36

спецификации FEPA) – отечественные аналоги соответственно 25A и 40.

В целом было исследовано 280 образцов при измерении механической прочности сырца абразивной массы и 500 образцов после обжига для измерения ее различных свойств (прочности, твердости, модуля упругости и др.) (табл. 3.15).

Введение корундовых микросфер в состав абразивной массы, как показали прямые эксперименты и статистическая обработка их результатов, оказывает большое влияние на механическую прочность образцов в сыром виде (сырец) как на прочность на излом, так и на прочность на изгиб. Увеличение относительного содержания корундовых микросфер в абразивной массе повышает ее механическую прочность на излом, причем это повышение взаимосвязано с размером абразивного зерна и относительным содержанием керамической связки в сырце.

Для постоянного содержания абразивного зерна в высокопористой абразивной массе, равной 38 % (структура 12), модель связи механической прочности сырца на излом с размером абразивного зерна A_z , относительным содержанием корундовых микросфер V_{mc} и керамической связки $V_{св}$ разработана в линейном виде (коэффициент множественной корреляции – 0,868):

$$\sigma_{из} = 0,123 - 0,655A_z + 0,542V_{mc} + 3,647V_{св} \quad (3.3)$$

Изменение механической прочности сырца на излом в зависимости от исследованных составляющих высокопористой абразивной массы показано на рис. 3.4–3.6. Из анализа экспериментальных данных следует, что увеличение зернистости абразивной массы с 10 до 40 при прочих равных условиях снижает механическую прочность сырца в 2,3...7,5 раз, а увели-

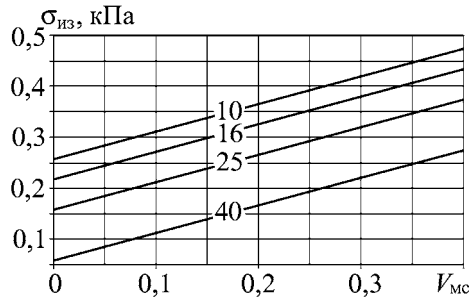


Рис. 3.4. Влияние относительного содержания корундовых микросфер и зернистости абразива на прочность сырца

чение относительного содержания керамической связки в абразивной массе с 3,5 до 6,5 % или в 1,86 раз повышает механическую прочность сырца до 3 раз.

Причина указанного изменения прочности сырца понятна, так как уменьшение зернистости и увеличение содержания связки создает предпосылки более прочной связи между компонентами высокопористой абразивной массы. При этом одновременно возрастает количество абразивных зерен в единице объема как элементов формируемого каркаса инструмента и объемное количество керамической связки.

В реальных условиях, однако, изготовление высокопористых шлифовальных кругов регламентировано заданными размером зерна и твердостью (соответственно содержанием связки). В этом случае введение в абразивную массу корундовых микросфер становится достаточно сильным компенсатором механической прочности сырца. При постоянном содержании керамической связки в абразивной массе и размера абразивного зерна в диапазоне 100...400 мкм за счет введения корундовых микросфер можно увеличить механическую прочность сырца на излом в 1,5...5,6 раза. При этом следует отметить, что наши исследования показали, что с увеличением относительного содержания корундовых микросфер в шлифовальном круге его твердость практически не уве-

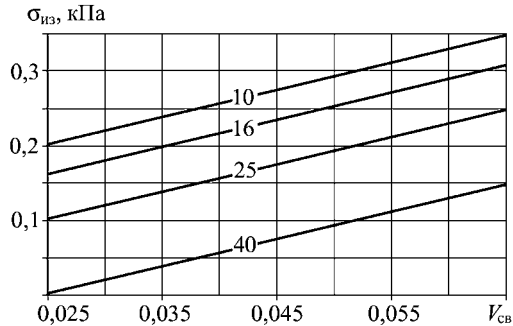


Рис. 3.5. Влияние относительного содержания керамической связки К5 и зернистости абразива на прочность сырца

личивается, зато стабильность твердости возрастает, а деформация при обжиге уменьшается.

Исследования механической прочности сырца на изгиб, в отличие от измерения прочности на излом на образцах абразивной массы с постоянным содержанием абразивного зерна ($V_z = 0,38$; структура 12), проводили с абразивной массой, в которой зерно было одного размера — 400 мкм. Основное достоинство этих исследований заключается в возможности оценить влияние керамической связки (ее состава) на механическую прочность, а также другие свойства абразивной массы как в сыром, так и в обожженном виде. Интересно также сравнить отечественную керамическую связку К5, наиболее распространенную в производстве абразивного инструмента в России, с некоторыми керамическими связками фирмы Fag.

Сглаженные модельные зависимости механической прочности на изгиб от состава абразивной массы в сыром и обожженном виде представлены на рис. 3.7 и рис. 3.8. Там же приведены экспериментальные значения и сглаженные графические зависимости коэффициентов вариации механической прочности на изгиб от состава абразивной массы на керамической связке V1219, с двумя вариациями:

1 — $V_z = 0,40$ (11 структура) и $V_{мс} = 0,20$;

2 — $V_z = 0,34$ (14 структура) и $V_{мс} = 0,30$.

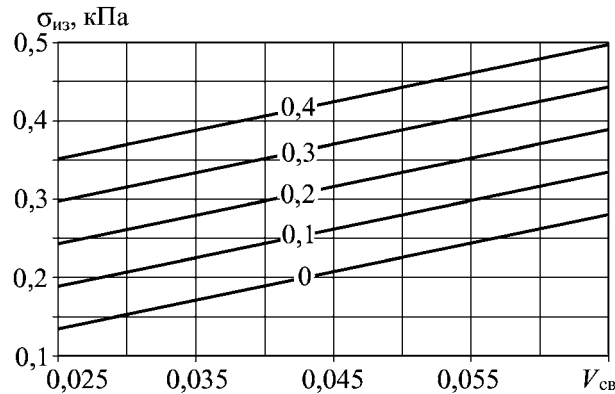


Рис. 3.6. Влияние содержания керамической связки К5 и корундовых микросфер на прочность сырца

Модели связи механической прочности сырых и обожженных образцов и их коэффициентов вариации от состава абразивной массы были разработаны для керамической связки V1219, содержание которой варьировалось в пределах 7...12 %. Выбор этой связки обоснован тем, что ее применение обеспечивает свойства абразивной массы, близкие к свойствам с керамической связкой К5.

Из анализа полученных экспериментальных значений механической прочности на изгиб и их сглаженных зависимо-

стей (см. рис. 3.7 и 3.8) можно сделать следующие выводы.

Механическая прочность на изгиб образцов высокопористой абразивной массы как в сыром, так и в обожженном виде растет с увеличением относительного содержания абразивного зерна (уменьшением номера структуры) и керамической связки. Таким образом, при различных схемах нагружения при измерении механической прочности на излом и изгиб закономерности их изменения от содержания в абразивной массе керамической

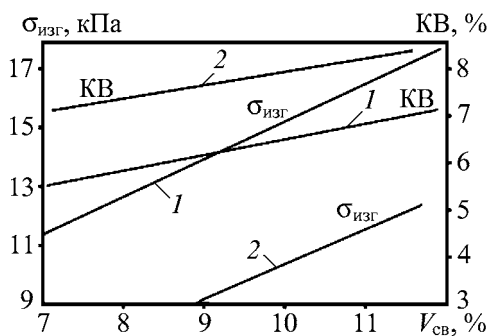


Рис. 3.7. Зависимость прочности на изгиб $\sigma_{изг}$ и ее коэффициента вариации (КВ) от состава абразивной массы в сыром виде:
1 — $V_3 = 0,40$; $V_{мс} = 0,20$; 2 — $V_3 = 0,34$;
 $V_{мс} = 0,30$

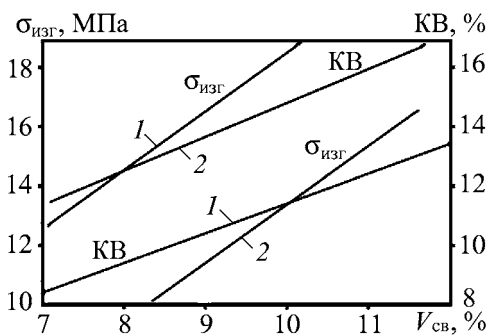


Рис. 3.8. Зависимость прочности на изгиб $\sigma_{изг}$ и ее коэффициента вариации (КВ) от состава абразивной массы в обожженном виде:
1 — $V_3 = 0,40$; $V_{мс} = 0,20$; 2 — $V_3 = 0,34$;
 $V_{мс} = 0,30$

3.16. Изменение механической прочности на изгиб сырых и обожженных образцов и их коэффициенты вариации

Характеристика	Керамическая связка			
	K5	V201	V1219	V4011
Прочность на изгиб: сырца, кПа	5,1...10,5	3,3...22,0	8,9...18,1	4,6...25,1
коэффициент вариации, %	5,5...9,4	2,8...9,5	3,7...9,3	8,7...10,1
после обжига, МПа	9,7...22,8	7,2...15,6	9,3...21,2	3,7...12,0
коэффициент вариации, %	11,8...17,4	8,1...18,9	8,1...19,8	13,6...23,6

связки и количества зерен (или от зернистости, либо от абсолютного изменения количества в зависимости от номера структуры) сохраняются одинаковыми. Это свидетельствует об одном и том же составе высокопористой абразивной массы.

Закономерности по рассеянию значений механической прочности у сырых и обожженных образцов характерны для всех исследованных керамических связок, которые одинаковым образом сопротивляются механическому разрушению.

Рассеяние значений механической прочности сырых и обожженных образцов абразивной массы по величине их коэффициента вариации пропорционально абсолютному значению прочности: чем выше прочность, тем больше ее относительное рассеяние. В соответствии с вскрытой закономерностью, изменение прочности в зависимости от рецептурного состава высокопористой абразивной массы аналогично изменению значения коэффициента вариации.

Влияние состава абразивной массы на ее технологические и эксплуатационные свойства. Наряду с механической прочностью высокопористой абразивной массы исследовались также: плотность в сыром и обожженном виде; твердость образцов после обжига; коэффициент вариации твердости; модуль упругости об-

разцов после обжига; коэффициент вариации модуля упругости в зависимости от относительного содержания абразивного зерна и керамических связок K5, V201, V1219 и V4011 в соответствии с рецептами (табл. 3.16).

В табл. 3.16 приведены значения исследованных характеристик абразивной массы со связками K5, V201, V1219 и V4011 для одного состава: $V_z = 0,34$ (структура 14), $V_{mc} = 0,30$ и $V_{св} = 0,105$.

Из сравнительного анализа полученных данных следует, что керамическая связка K5 при формовании абразивной массы дает на 20 % более низкую прочность на изгиб сырца, чем другие связки. Но по прочности образцов связка K5 после обжига находится на одном уровне с прочностью образцов на керамической связке V1219. Образцы на других связках менее прочны, а, следовательно, инструмент будет уступать и по рабочей скорости резания.

Связка K5 обеспечивает образцам абразивной массы более высокую плотность в сравнении с исследованными керамическими связками. Но при этом абразивная масса на связке K5 имеет очень важное для экологии преимущество: при обжиге она выгорает по весу только на 1,59 %, в то время как массы на других связках выгорают от 4,89 до 5,6 % своего веса или в 3...3,5 раз больше.

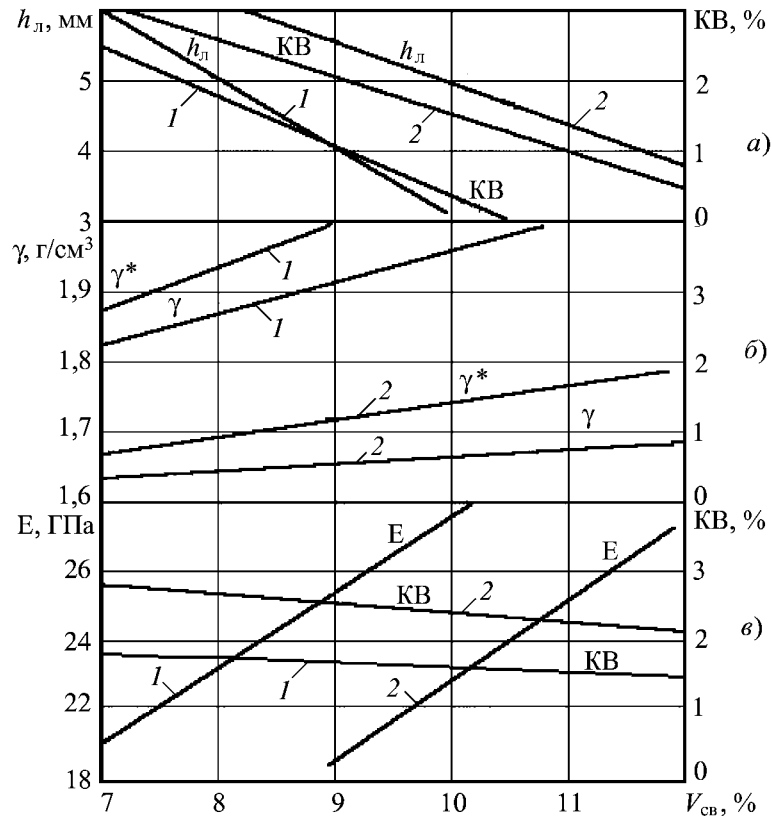


Рис. 3.9. Влияние состава абразивной массы на твердость (глубину лунки) h_L и ее коэффициент вариации (а); плотность сырых γ и обожженных γ^* образцов (б); модуль упругости E и его коэффициент вариации (в):
 1 – $V_3 = 0,40$; $V_{мс} = 0,20$; 2 – $V_3 = 0,34$; $V_{мс} = 0,30$

Этот важный вывод об экологической безопасности применения керамической связки К5 в производстве абразивного инструмента вытекает не только из анализа исследованного рецепта высокопористой абразивной массы, но и из других комбинаций ее составляющих. Так, при обжиге абразивных масс, приготовленных по рецептам на связке К5, выгорание составило соответственно 0,52 и 2,7 % массы образцов. Для всех исследованных рецептов абразивных масс на связках V201, V1219 и V4011 выгорание колебалось в пределах 4,15...5,78 % массы, т.е. во всех случаях более чем в 1,5...11,1 раз больше.

Помимо более высокой экологической безопасности отечественная керамическая связка К5 обеспечивает в сравнении с другими связками более высокую твердость (по глубине лунки) и более высокую ее стабильность по измерению коэффициента вариации на 20 образцах. Так, при одном и том же относительном содержании всех исследуемых керамических связок в 10,5 % объема абразивной массы твердость образцов составила (по ГОСТ 18118–79 (в ред. 1981 г.)):

- на связке К5 и V1219 – М3;
- на связке V201 – М2 (на 1 степень меньше);

- на связке V4011 – ВМ1 (на 3 степени меньше).

На основе экспериментальных данных изучения свойств различных абразивных масс на керамической связке V1219 выполнена их статистическая обработка, корреляционный и регрессионный анализы.

Графическая интерпретация разработанных математических моделей для абразивной массы с керамической связкой V1219 показана на рис. 3.9.

Результаты исследования подтверждают, что твердость высокопористой абразивной массы после обжига возрастает (соответственно глубина лунки уменьшается) с увеличением относительного содержания зерна и связки. Аналогично изменению твердости изменяется и ее рассеяние, определяемое коэффициентом вариации, т.е. с уменьшением твердости стабилизируются ее значения в объеме абразивной массы.

Формирование плотности образцов абразивной массы в сыром виде находится в прямой зависимости от плотности и содержания, входящих в нее компонентов.

Для справки ниже приводятся данные по насыпной массе компонентов, г/см³:

- абразивное зерно – 3,9...4,10;
- корундовые микросферы – 0,58...0,70;
- керамическая связка K5 – 2,48...2,52;
- керамическая связка V201 – 2,43...2,47;
- керамическая связка V1219, V4011 – 2,38...2,42.

При постоянном содержании абразивного зерна и корундовых микросфер в составе абразивной массы ее плотность возрастает с увеличением содержания керамической связки и ее плотности (см. рис. 3.9).

О причинах уменьшения плотности высокопористой абразивной массы после обжига было написано выше. На рис. 3.9, б видно, что характер изменения плотности абразивной массы от ее состава одинаков как в сыром, так и в обожженном виде.

Следовательно, это является дополнительным подтверждением выгорания компонентов керамической связки.

Изменение измеренного модуля упругости на исследованных образцах после обжига взаимосвязано с уменьшением их твердости и плотности: чем выше твердость и плотность образца, тем больше его модуль упругости. Коэффициент вариации, напротив, изменяется по другой закономерности. В отличие от механической прочности на изгиб и твердости, когда коэффициент вариации возрастает с ростом их значений, коэффициент вариации модуля упругости уменьшается при увеличении модуля упругости (рис. 3.9, в).

В целом можно отметить, что состав высокопористой абразивной массы оказывает большое влияние на исследованные ее технологические и эксплуатационные свойства. Особенно большое значение имеет состав и количество вводимой керамической связки. В этой связи исследования показали, что применяемая керамическая связка K5 вполне конкурентоспособна с зарубежными аналогами и обеспечивает высокий уровень свойств.

Взаимосвязь технологических и эксплуатационных свойств высокопористой абразивной массы. Достоинством проведенных исследований является взаимосвязанное изучение на одних и тех же составах высокопористой абразивной массы различных ее свойств как технологических, определяющих ее технологичность в изготовлении инструмента, так и эксплуатационных характеристик абразивного инструмента.

На рис. 3.10–3.15 приведены зависимости связи между прочностью, твердостью, модулем упругости и их коэффициентами вариации.

К главной особенности приведенных материалов можно отнести то, что на графиках представлено статистическое обобщение всех результатов исследований свойств абразивной массы без дифференциации этих данных в зависимости

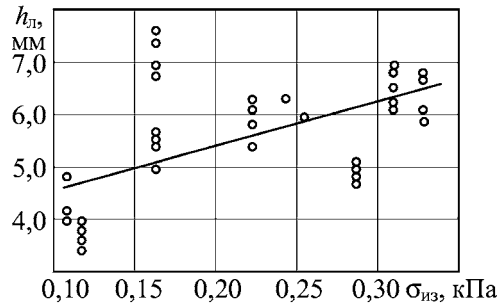


Рис. 3.10. Зависимость твердости абразивного инструмента после обжига от механической прочности сырца на излом

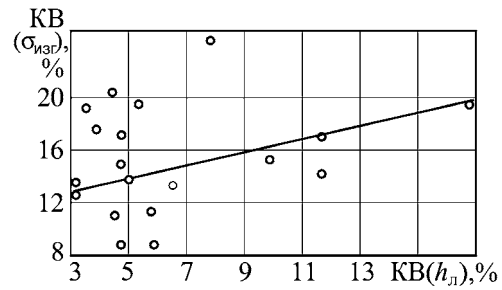


Рис. 3.11. Взаимосвязь нестабильности механической прочности на изгиб образцов после обжига с нестабильностью их твердости

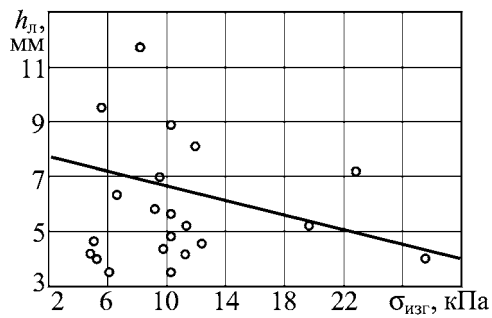


Рис. 3.12. Зависимость твердости образцов после обжига от прочности на изгиб сырца абразивной массы

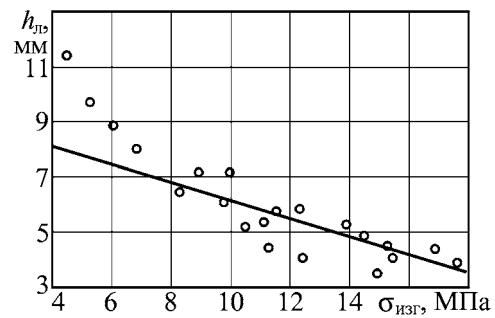


Рис. 3.13. Зависимость твердости от прочности на изгиб образца после обжига

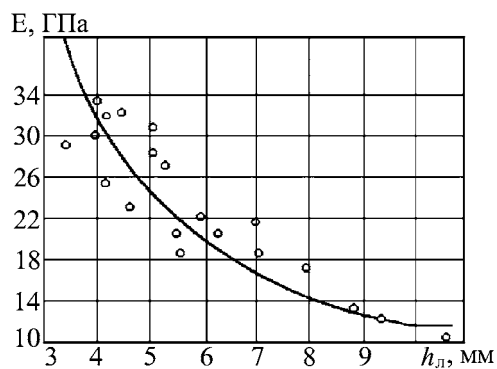


Рис. 3.14. Зависимость E -модуля от твердости абразивной массы

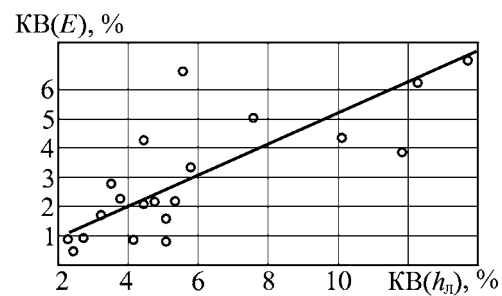


Рис. 3.15. Зависимость нестабильности E -модуля от нестабильности твердости абразивной массы

от состава, как это сделано в предыдущих разделах. В этой связи можно отметить, что статистическая связь твердости абразивной массы от прочности сырца на излом (рис. 3.10) отличается от аналогичной связи с прочностью сырца на изгиб (рис. 3.12). Правда, в случае исследования связи между твердостью и прочностью сырца на изгиб имеет место чрезвычайно слабая корреляционная зависимость, так как коэффициент парной корреляции равен только 0,067.

С другой стороны, связь твердости с прочностью образцов на изгиб после обжига имеет достаточно четкую зависимость (рис. 3.13). Соответственно, и математическая модель связи имеет высокий коэффициент парной корреляции – 0,675.

Модуль упругости, как известно, определяется с помощью неразрушающего метода контроля, поэтому установленная зависимость между модулем упругости и твердостью дает возможность оценивать качество изготовления инструмента без разрушения его поверхности. Это особенно важно для крупногабаритных шлифовальных кругов, которые зачастую изготавливаются в единичных экземплярах.

Разработанная модель связи модуля упругости и твердости (рис. 3.14) в виде

$$\ln E = 4,916 - 1,048 \ln h_d \quad (3.4)$$

статистически связывает данные измерения для всех 21 вариантов исследованных составов высокопористой абразивной массы и отличается высокой степенью корреляции – коэффициент парной корреляции равен 0,963.

Расчет показывает, что характеристики нестабильности твердости, прочности и модуля упругости имеют более слабую корреляционную и регрессионную связь, чем зависимости между их средними значениями.

Результаты комплексных исследований (табл. 3.17), приведенных в данной главе, дают возможность сделать в целом очень важные выводы. С одной стороны,

обоснована возможность улучшения технологических свойств высокопористой абразивной массы за счет введения корундовых микросфер и оптимизации ее состава. Установленная взаимосвязь механической прочности, плотности, твердости и модуля упругости, с другой стороны, позволяет на этапе разработки рецептуры высокопористого шлифовального круга и приготовления формовочной абразивной массы прогнозировать его эксплуатационные свойства и их стабильность в объеме одного и партии из нескольких инструментов.

По результатам исследования в целом можно констатировать, что введение в формовочную массу корундовых микросфер при изготовлении высокопористых шлифовальных кругов существенно увеличивает механическую прочность сырца, оптимальное содержание которой обеспечивает прочность формовочной массы до 2,2 раза больше, чем у аналогов высокопористого инструмента, например на перлите в качестве порообразователя. Уровень механической прочности соответствует прочности шлифовальных кругов нормальной структуры. Механическая прочность высокопористой абразивной массы как в сыром виде, так и в обожженном возрастает с увеличением относительного содержания зерна, корундовых микросфер и керамической связки и уменьшается с увеличением зернистости применяемого абразива.

Стабильность твердости в объеме инструмента. Твердость абразивного инструмента является одной из важнейших его характеристик, связанных с износостойкостью, интенсивностью теплообразования, качеством обработки и др. Применение высокопористого инструмента, у которого высокая пористость сочетается с высокой твердостью, становится эффективным средством решения многих проблем шлифования, когда необходимо повысить производительность и точность процесса при отсутствии дефектов шлифовочного характера.

3.17. Математические модели связи свойств высококористой абразивной массы в сыром и обожженном виде с ее рецептурным составом и качеством их адекватности

Исходная характеристика	Модель связи	Качество адекватности модели		
		КМК	F-критерий для КМК	F-критерий адекватности модели
Прочность сырка на излом	$\sigma_{из} = 0,123 - 0,655A_3 + 0,542V_{MC} + 3,647V_{CB}$	0,868	4,073	0,370
Прочность на изгиб:				
сырка	$\sigma_{изг}^* = 3,676 + 0,012V_3 - 0,586V_{MC} + 0,994V_{CB}$	0,688	1,026	0,573
коэффициент вариации	$KB^* = 1,271 - 1,435V_3 + 0,034V_{MC} + 0,309V_{CB}$	0,896	0,247	8,113
после обжига	$\sigma_{изг} = 7,924 + 2,360V_3 + 0,016V_{MC} + 1,214V_{CB}$	0,926	0,231	5,971
коэффициент вариации	$KB = 4,686 + 0,011V_3 + 0,152V_{MC} + 0,752V_{CB}$	0,429	1,276	0,226
Твердость:				
глубина лунки h_L	$h_L = 0,004V_3 + 0,436V_{MC} - 1,508V_{CB} - 1,231$	0,986	0,349	69,677
коэффициент вариации	$KB = 0,068V_{MC} - 1,467V_3 - 1,395V_{CB} - 3,318$	0,811	0,428	3,834
Удельный вес:				
сырка	$\gamma^* = 1,959 - 0,824V_3 + 0,003V_{MC} + 0,217V_{CB}$	0,982	0,433	55,699
после обжига	$\gamma = 2,034 + 0,956V_3 + 0,004V_{MC} + 0,208V_{CB}$	0,995	0,111	218,741
Модуль упругости	$E = 5,730 + 0,012V_3 - 0,730V_{MC} + 1,658V_{CB}$	0,972	0,699	33,747
коэффициент вариации	$KB = 0,019V_{MC} - 2,738V_3 - 0,472V_{CB} - 3,202$	0,453	0,993	0,517

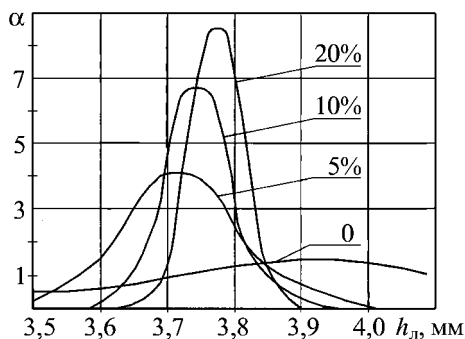


Рис. 3.16. Влияние содержания корундовых микросфер на плотность вероятности распределения твердости в шлифовальном круге

Введение, например, корундовых микросфер в абразивную массу при неизменном ее составе по другим компонентам практически не оказывает влияния на изменение твердости высокопористого шлифовального круга: возможные ее колебания находятся в пределах одной степени твердости. Более сильное влияние они оказывают на стабильность твердости, точнее на рассеяние ее показателя — глубины лунки по объему инструмента.

Статистическое обобщение экспериментальных данных по измерению твердости в различных частях объема шлифовальных кругов с размерами $200 \times 20 \times 76$ из электрокорунда белого 24А, зернистостью 16, структурой 12 при постоянном 10%-ном объемном содержании керамической связки К5 позволяет оценить степень и характер такого влияния. При введении корундовых микросфер в объеме от 5 до 20 % твердость высокопористого круга остается неизменной: средняя глубина лунки уменьшается с 3,92 мм до 3,78 мм или на 3,7 %, но при этом диапазон рассеяния глубины лунки снижается с 0,6 до 0,05 мм, а среднее квадратичное отклонение глубины лунки как параметра стабильности твердости существенно уменьшается: с 0,263 до 0,045 мм или в 5,8 раз.

На рис. 3.16 показан характер распределения твердости в шлифовальном круге при различном объемном содержа-

нии корундовых микросфер, смоделированный по результатам измерений.

Обычно рассеяние или дисперсия твердости в объеме шлифовального круга возрастает при увеличении его зернистости, номера структуры и уменьшении твердости. Введение в высокопористую абразивную массу порообразователей в виде микросфер в оптимальных для конкретной характеристики инструмента количествах дает возможность управлять стабильностью твердости и соответственно обеспечивать стабильность режущей способности на рабочей поверхности и в целом по объему шлифовального круга.

3.3. ОСОБЕННОСТИ МОЛОТЫХ ФРУКТОВЫХ КОСТОЧЕК КАК ПОРООБРАЗОВАТЕЛЯ

Молотые фруктовые косточки в настоящее время получили наибольшее распространение в производстве высокопористого абразивного инструмента. Их достоинства и недостатки как порообразователей проанализированы в разделе 1.2. Осталась неясной только причина, по которой применение фруктовых косточек приводит к разупрочнению шлифовальных кругов.

Чтобы выявить природу этого явления, было проведено специальное исследование содержания влаги и веществ, удаляемых при прокаливании, в соответствии с ГОСТ 6943.8–79 (в ред. 1985 г.). Выбрали два типа косточек: оливковые и персиковые. За рубежом эти два типа органических порообразователей пользуются наибольшим спросом, налажено их промышленное производство и поставка с классификацией по 6 группам размеров: менее 0,1 мм; 0,1...0,2 мм; 0,2...0,5 мм; 0,5...1,0 мм; 1,0...1,5 мм и более 1,5 мм.

Выгорание косточек. На первом этапе была выполнена сравнительная оценка потери массы при прокаливании серийно изготовленных оливковых и персиковых косточек, размолотых в размер 0,2...0,5 мм.

Предварительно была определена доля влаги в косточках массой 2 г, помещенных в платиновом тигле на просушивание при температуре 105 ± 2 °С в сушильный шкаф в течение часа с последующим охлаждением в эксикаторе, заполненном хлористым кальцием. Взвешиванием на аналитических весах с погрешностью $2 \cdot 10^{-4}$ г установлено влагосодержание в оливковых косточках 8,75 % исходной массы, в персиковых косточках – 5,45 %.

Высушенный материал в платиновом тигле прокаливали в муфельной печи при температурах от 200 до 1000 °С с интервалом 100 °С в течение часа при каждой исследованной температуре, за исключением температуры 1000 °С. При этой температуре материал прокаливался в течение 50 мин и 5 ч выдерживали. После каждой температуры охлажденный в эксикаторе материал взвешивался. По результатам взвешивания определяли потерю массы при прокаливании по отношению к массе высушенного материала.

Прокаливание косточек при температурном режиме 1250 °С в течение 3 часов, имитирующем завершающую стадию нагрева при обжиге электрокорундовых кругов на керамических связках, производили в трубчатой печи сопротивления.

Результаты прокаливании показали, что интенсивность потери массы в зависимости от температуры нагрева примерно одинакова для обоих типов выгорающих порообразователей: уже при температуре 300 °С персиковые косточки потеряли 51 % своей массы, а оливковые – 60 %. При температуре нагрева 600 °С процесс выгорания стабилизируется, достигнув потери массы, близкой к предельным значениям: 87,52 % для персиковых косточек и 98,18 % для оливковых косточек. Дальнейший нагрев до 1250 °С обеспечивает потерю массы порядка 0,17 % у персиковых косточек и 0,97 % у оливковых косточек.

Определяющим фактором выгорания исследованных косточек является температура нагрева, в меньшей степени – время выдержки. Так, при увеличении выдержки при температуре 1000 °С от 50 мин до 5 ч потеря массы персиковых косточек не изменилась, а у оливковых косточек увеличилась только на 0,12 % от исходной.

После прокаливании при температуре 1250 °С в тигле остался сплавленный стеклообразный материал, масса которого составила 12,31 % от исходной массы высушенных персиковых косточек, и 0,85 % от массы оливковых косточек. По степени выгорания оливковые косточки оказались более предпочтительными в качестве порообразователей, чем молотые персиковые.

Так как процесс выгорания фруктовых косточек и расплавления керамической связки при обжиге абразивного инструмента происходит одновременно, невыгоревший остаток порообразователя будет взаимодействовать с расплавленной связкой, изменяя ее химический состав и свойства.

Был изучен химический состав персиковых и оливковых косточек после прокаливании их при температуре 700 °С, а также промышленного образца керамической связки марки К5ПГ после прокаливании при температуре 800 °С. В табл. 3.18 приведены сведения по составу связки только по общим компонентам химического состава трех исследованных материалов.

Известно, что содержание SiO_2 и Al_2O_3 до определенных пределов повышает тугоплавкость и вязкость керамической связки, обеспечивает наиболее благоприятные условия стеклообразования и смачивания абразивных зерен (совместно с K_2O) и их закрепления в объемной структуре инструмента. При увеличении содержания SiO_2 более 55...62 % и Al_2O_3 более 16...20 % начинает активно проявляться склонность к крупной кристаллизации стекла, снижается однородность и прочность массы и, как следствие, прочность шлифовального круга.

3.18. Химический состав фруктовых косточек и керамической связки после прокаливания

Химический состав	Массовая доля, %		
	Персиковые косточки	Оливковые косточки	Связка К5ПГ
SiO ₂	33,74	40,0	63,88
TiO ₂	1,32	—	0,49
Al ₂ O ₃	35,25	14,27	20,66
Fe ₂ O ₃	2,16	1,23	0,58
CaO	2,08	37,73	0,47
MgO	3,07	6,74	2,61

Из анализа данных табл. 3.18 следует, что при использовании фруктовых косточек их невыгоревшие компоненты крайне негативно будут влиять на химический состав и свойства керамической связки, обеспечивая критические условия разупрочнения высокопористого абразивного инструмента.

На втором этапе исследования была изучена кинетика выгорания абразивной массы, составленной на основе зерна из электрокорунда белого марки 25А зернистостью 25П, керамической связки марки К5ПГ и оливковых косточек размером 0,2...0,5 мм в качестве порообразователя. Был подготовлен следующий состав абразивной массы: зерно – 73,3 %, связка – 10 %, косточки – 16,7 %.

Из 30 г абразивной массы после тщательного перемешивания была взята проба 3 г, которую высушивали в платиновом тигле (потеря массы составила 0,51 %), а затем прокаливали в муфельной печи. В интервале температур от 200 до 1250 °С, с выдержкой 1 час при каждой температуре и охлаждении в эксикаторе, определялась потеря массы исследуемого состава. Результаты прокаливания персиковых и оливковых косточек, а также высокопористой абразивной смеси сведены в таблицу (табл. 3.19) и график (рис. 3.17).

Потеря массы абразивной смеси при прокаливании стабилизируется уже при

температуре 500 °С, т.е. при температуре начала размягчения керамической связки (см. табл. 1.11). При дальнейшем повышении температуры нагрева происходит интенсивное образование жидкой фазы, которая не только взаимодействует с поверхностью абразивных зерен, но и с поверхностью фруктовых косточек, обволакивая их и препятствуя дальнейшему выгоранию.

В исследованной трехкомпонентной абразивной смеси, безусловно, не выгорает зерно из электрокорунда белого. Оксид алюминия относится к тугоплавким соединениям, температура плавления которого существенно выше, чем предельная температура нагрева в проведенных экспериментах.

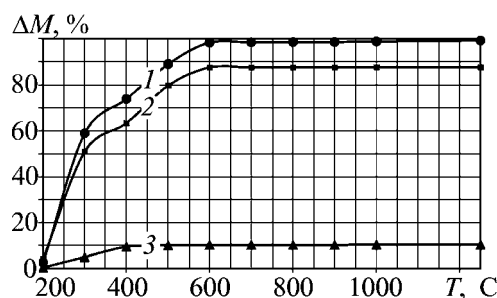


Рис. 3.17. Потеря массы при прокаливании оливковых (1) и персиковых (2) косточек и высокопористой абразивной смеси (3)

3.19. Потеря массы при прокаливании косточек и высокопористой абразивной смеси

Температура нагрева, °С	Потеря массы, %, исследуемого материала		
	Персиковые косточки	Оливковые косточки	Абразивная смесь
200	4,30	2,73	0,55
300	50,87	59,78	5,11
400	63,25	73,80	9,51
500	79,69	88,94	10,20
600	87,52	98,18	10,23
700	87,57	98,37	10,29
800	87,57	98,47	10,31
900	87,57	98,53	10,35
1000, выдержка:			
50 мин	87,64	98,59	—
1 ч	—	—	10,42
5 ч	87,64	98,71	—
1250, выдержка:			
1 ч	—	—	10,46
5 ч	87,69	99,15	10,46

Испытания показали, что исследованный состав керамической связки после прокаливании при температуре 800 °С теряет 4,47 % своей массы. Расчетная потеря массы керамической связки при обжиге абразивного инструмента принимается равной 5,6 % [55]. С учетом этих оценок доля выгорания связки в общей потере массы абразивной смеси составляет не более 5,3 %. Остальная потеря массы приходится на выгорание молотых оливковых косточек.

Таким образом, при прокаливании абразивной смеси, состоящей из зерна электрокорунда белого, керамической связки и оливковых косточек, в диапазоне температур от 200 до 1250 °С оливковые косточки выгорают не полностью, а только на 60 % содержания (по массе). Остав-

шиеся 40 % невыгоревших косточек переходят в состав керамической связки, изменяя ее физико-механические свойства.

Неполное выгорание фруктовых косточек оказывает заметное влияние на технологические и эксплуатационные свойства высокопористых шлифовальных кругов: прочность, объемную деформацию круга, степень выгорания абразивной массы, твердость и др. Эта особенность накладывается на механизм собственно порообразования, который обусловлен дисперсностью и формой вводимых косточек, их составом, рельефом поверхности и т.д.

Для ответа на вопрос, какой тип фруктовых косточек предпочтителен для промышленного производства высокопористого абразивного инструмента, были изготовлены по 3 шлифовальных круга размером 350×30×76 двух рецептурных

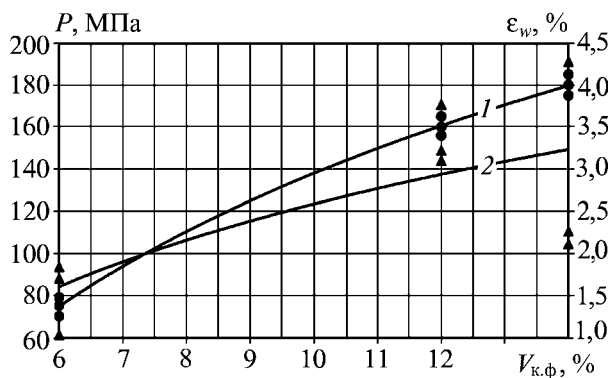


Рис. 3.18. Влияние содержания оливковых косточек на усилие прессования круга (1) зернистостью 16 и структурой 12 и его объемную деформацию (2)

составов, содержащими 14 % объема оливковых и персиковых косточек размером 0,2...0,5 мм. Расчетная характеристика круга по содержанию абразива и керамической связки 25А 16 М1 12 К (99ВА 80 Н 12)*.

В процессе изготовления кругов обеих составов были зафиксированы отличия: инструмент на основе оливковых косточек имел усилие прессования на 15 %, а объемную деформацию после обжига на 8 % больше при степени выгорания абразивной массы на 9,3 % меньше, чем у кругов на основе персиковых косточек. Но при этом введение персиковых

косточек уменьшило твердость инструмента на 1 степень (с М1 до ВМ2), а среднюю разрывную скорость по 3 кругам — с 87,1 до 82 м/с или на 6 % при сопутствующем повышении неуравновешенности масс с 11 до 17 г или более чем в 1,5 раза.

Влияние количества косточек. Для аналогичных условий по типоразмеру и характеристике круга было исследовано влияние объемного содержания оливковых косточек размером 0,2...0,5 мм от 6 до 14 % на условия изготовления высокопористого инструмента 12-й структуры (рис. 3.18 и 3.19).

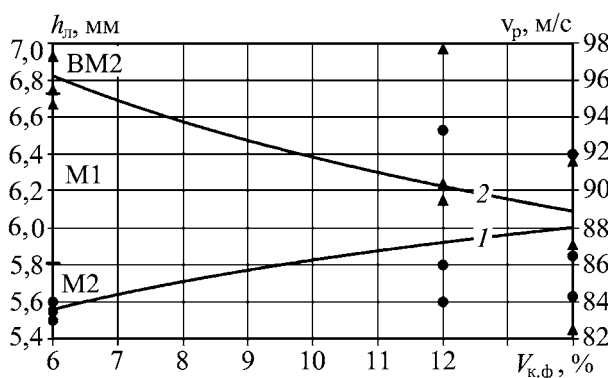


Рис. 3.19. Влияние содержания оливковых косточек на твердость (1) и разрывную скорость (2) круга зернистостью 16 и структурой 12

* Методика изготовления и тестирования высокопористых шлифовальных кругов представлена в главе 4.

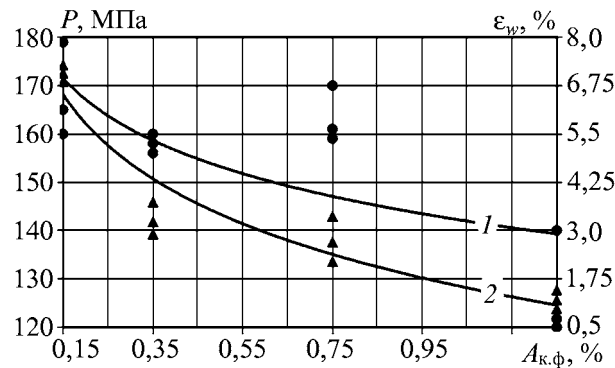


Рис. 3.20. Влияние размера оливковых косточек на усилие прессования (1) и объемную деформацию (2) круга зернистостью 16 и структурой 12

Пропорционально повышению содержания косточек растет сопротивление деформированию круга при его формовании и объемная деформация при высокотемпературном обжиге. С увеличением объемного содержания оливковых косточек в 2,33 раза степень их выгорания при обжиге возросла с 7,8 до 14,4 % или только в 1,85 раз. Возросшее количество невыгоревших косточек приводит к заметному разупрочнению керамической связки и шлифовального круга в целом: уменьшаются его твердость и разрывная скорость.

Влияние размера косточек. Размер выгорающего порообразователя также оказывает влияние на общую пористость абразивного инструмента и его прочностные свойства. На примере использования оливковых косточек было исследовано влияние следующего размерного ряда с диапазонами: 0,1...0,2; 0,2...0,5; 0,5...1,0; 1,0...1,5 мм на технологические и эксплуатационные свойства круга из электрокорунда белого зернистостью 16 и структурой 12 с постоянным объемным содержанием 12 % оливковых косточек и 8,5 % керамической связки с добавлением 1,7 % стеклянных микросфер.

С увеличением среднего размера косточек от 0,15 до 1,25 мм усилие прессования круга уменьшается на 26 %, а его

объемная деформация почти в 6 раз — с 7,09 % до 1,19 % (рис. 3.20). При этом потеря массы круга за счет преимущественного выгорания косточек возрастает с 8,9 до 13,4 % или в 1,5 раза. Следовательно, при увеличении размеров выгорающего порообразователя при постоянном его содержании повышается открытая пористость абразивного инструмента. Это явление, как уже отмечалось в разделе 1.2, связано, по-видимому, с увеличением площади выгорания косточек при повышении их крупности.

Из-за уменьшения невыгоревшего остатка оливковых косточек в меньшей степени проявляется эффект разупрочнения керамической связки. По этой причине с увеличением размеров косточек твердость круга изменяется в диапазоне от М1 до СМ1 (по глубине лунки от 5,3 до 3,9 мм). Увеличение размеров образовавшихся пор оказывает негативное влияние на разрывную скорость круга, которая, несмотря на повышенную твердость, заметно снижается — почти на 20 % (рис. 3.21).

Для расчетной оценки влияния размеров оливковых косточек $A_{к.ф}$ на твердость круга (по глубине лунки $h_{л}$) и его разрывную скорость v_p разработаны статистические модели связи:

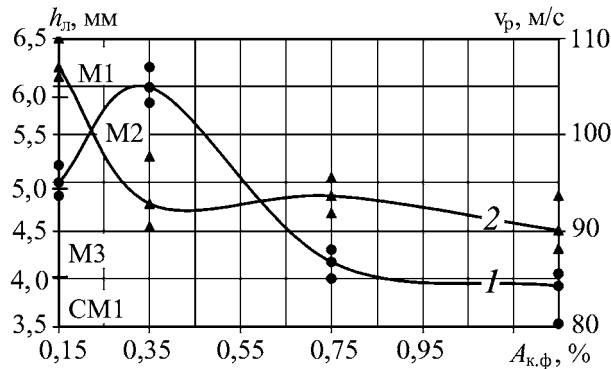


Рис. 3.21. Влияние размера оливковых косточек на твердость (1) и разрывную скорость (2) круга зернистостью 16 и структурой 12

$$h_{л} = 7,886 \cdot A_{к.ф}^{-0,088}, \quad (3.5)$$

$$v_p = 149,87 \cdot A_{к.ф}^{-0,079}. \quad (3.6)$$

Предложенные линеаризованные модели (3.5), (3.6) дают возможность на этапе проектирования рецептурного состава шлифовального круга определить степень воздействия размеров вводимых фруктовых косточек на изменение его твердости и разрывной скорости.

3.4. ОПТИМАЛЬНЫЕ КОМПОЗИЦИИ ИЗ НЕВЫГОРАЮЩИХ И ВЫГОРАЮЩИХ ПОРООБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Комплексный анализ морфологических, физико-механических и химических свойств невыгорающих порообразователей в виде полых микросфер показал, что каждый из них имеет вполне определенное назначение и оптимальную область применения в производстве высокопористого абразивного инструмента. Эффективность их использования как порообразователя, а, главное, как управляющего фактора воздействия на технологические и эксплуатационные свойства инструмента существенно возрастает, если вводить в абразивную массу не один, а композицию от двух до четырех порообразователей.

Если в качестве порообразователей высокопористого инструмента принять корундовые, силикатные и стеклянные микросферы и какой-либо один тип фруктовых косточек, то можно сформировать всего 15 возможных композиций, из них по 8 вариантов для каждого порообразователя. Из этого многообразия возможных композиций целесообразно выбрать базовые, на основе которых можно изготавливать высокопористые шлифовальные круги.

Критерием отбора оптимальной композиции является экономичность изготовления инструмента заданной характеристики по материалу абразива, его зернистости, твердости и номеру структуры, требуемых значений неуравновешенности массы и рабочей скорости, которая, в свою очередь, обусловлена технологическими свойствами высокопористой абразивной массы.

Было исследовано 8 различных вариантов, в которых сравнивались между собой в качестве порообразователей оливковые и персиковые косточки, корундовые и силикатные микросферы, а также их композиции.

Суммарное объемное содержание порообразователя во всех случаях составляло 14 %, необходимое для компенсации недостатка абразивного зерна в круге 12-й

структуры. Содержание 8,5 % керамической связки с добавлением 1,7 % стеклянных микросфер (20 % содержания связки), вводимое во всех случаях, должно было обеспечить характеристику круга 25A 16 M1 12 K. Размеры готового круга 350×30×76, по каждому рецепту изготовлялось по 3 круга.

Результаты тестирования инструмента приведены в табл. 3.20. Для некоторых исследованных параметров даны не только средние значения, но и их коэффициенты вариации, чтобы оценить стабильность обеспечения заданного параметра. Звуковой индекс твердости кругов для сравнения приведен не в виде целого числа, а с учетом измеренной конкретной частоты колебаний. В случае, если твердость по глубине лунки и акустическому контролю не совпадают, приводятся оба значения степени твердости.

Интересно сравнить действие корундовых и силикатных микросфер, основных и конкурентных порообразователей на формирование технологических и эксплуатационных свойств шлифовального круга (составы 3 и 4). При одинаковом усилии прессования деформация круга с корундовыми микросферами после обжига почти в 4 раза меньше, чем у инструмента на основе силикатных микросфер, но при большом значении ее коэффициента вариации. При введении в абразивную массу силикатных микросфер прочность связи зерен с керамической связкой возрастает и соответственно увеличивается твердость круга, но его прочность в целом заметно, почти на 20 % по разрывной скорости в соответствии с формулой (1.3), уменьшается.

При дополнительном введении в качестве выгорающих порообразователей молотых оливковых и персиковых косточек положительное влияние корундовых микросфер на прочность высокопористого круга сохраняется. Во всех случаях применения корундовых микросфер (составы 3, 5 и 6) разрывная скорость круга всегда больше, чем у кругов на основе силикатных микросфер.

Необходимость использования выгорающих порообразователей в производстве высокопористого абразивного инструмента диктуется требованиями процесса шлифования с большими площадями контакта и глубинами обработки. Для этих условий наличие открытой пористости круга с развитой объемной структурой порового пространства обеспечивает наиболее благоприятные предпосылки бесприжоговой обработки.

Основываясь на результатах анализа, который дан в разделе 3.3, и материалах табл. 3.20, можно сделать следующее заключение. Введение молотых фруктовых косточек всегда приводит к разупрочнению керамической связки и шлифовального круга в целом. Процесс их выгорания при высокотемпературном обжиге инструмента приводит к созданию гетерогенного распределения в его объеме зерен, связки, пор и невыгорающих порообразователей, которые проявляются в анизотропности свойств в объеме. Увеличивается нестабильность твердости, возрастает неуравновешенность масс и ее коэффициент вариации, уменьшается разрывная, а, следовательно, и рабочая скорость шлифовального круга. Чем больше объемное содержание выгорающих порообразователей в виде фруктовых косточек в инструменте, тем сильнее проявляются отмеченные негативные последствия.

Из двух изученных вариантов по типам фруктовых косточек предпочтение следует отдать оливковым молотым косточкам, назначать содержание и размеры которых необходимо с учетом требований процесса шлифования.

Самый важный вывод из анализа данных табл. 3.20: введение невыгорающих и выгорающих порообразователей в абразивную массу как по отдельности, так и в различных их сочетаниях даст хорошую возможность управлять технологическими и эксплуатационными свойствами высокопористого инструмента. Сравнительная оценка приведенных данных

3.20. Технологические и эксплуатационные свойства высокопористых кругов различных композиций

Параметры	Значения параметров для различных составов							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Усилие прессования, МПа	180	153	20	20	73,3	51,7	76,7	63,3
Объемная деформация $\epsilon_{\text{об}}$, %	2,88	2,65	0,78	2,85	2,13	2,38	5,89	2,42
Коэффициент вариации $\epsilon_{\text{вс}}$, %	34,5	14,7	31,1	4,2	2,9	19,1	29	5,8
Потеря массы при обжиге, %	14,4	16,8	4,0	2,6	8,7	9,3	10,5	10,8
Твердость по глубине лунки $h_{\text{лс}}$, мм	6,0	6,6	5,7	4,4	5,2	6,8	5,8	6,6
Коэффициент вариации $h_{\text{лс}}$, %	8,4	8,1	8,4	6,9	9,3	11,3	8,5	10
Звуковой индекс ЗИ	35,8	33,8	43,6	43,2	39,7	36,8	39,8	36,7
Степень твердости	M1	M1/BM2	M2	M3/M2	M2	BM2/M1	M1/M2	M1
Неуравновешенность масс m_D , г	11	17	18	17	18	12	7	23
Коэффициент вариации m_D , %	97,3	34,1	20,5	56,5	56,7	49,2	31,4	30
Разрывная скорость v_p , м/с	87,1	82,0	110,5	101,4	98,3	95,5	95,8	56,8
Коэффициент вариации v_p , %	5,2	2,8	4,1	2,2	1,7	1,6	1,8	2,6

Примечание. В составе № 1 объемное содержание оливковых косточек 14 %; в составе № 2 – персиковых косточек 14 %; в составе № 3 – корундовых микросфер 14 %; в составе № 4 – силикатных микросфер 14 %; в составе № 5 – корундовых микросфер 7 %, оливковых косточек 7 %; в составе № 6 – корундовых микросфер 7 %, персиковых косточек 7 %; в составе № 7 – силикатных микросфер 7 %, оливковых косточек 7 %; в составе № 8 – силикатных микросфер 7 %, персиковых косточек 7 %.

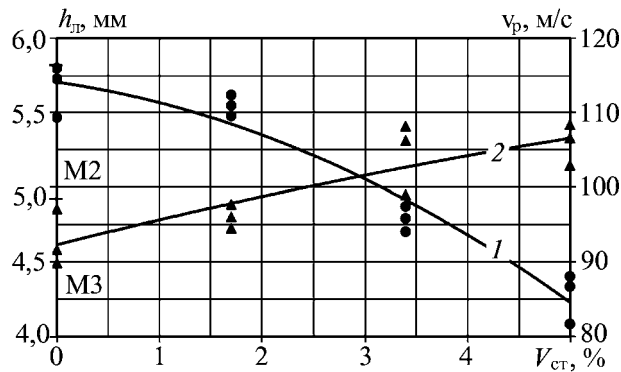


Рис. 3.22. Влияние объемного содержания стеклянных микросфер на твердость (1) и разрывную скорость (2) круга зернистостью 16 и структурой 12

свидетельствует, что усилие прессования может изменяться до 9 раз, объемная деформация круга – до 7,5 раз, твердость – на 3 степени, неуравновешенность массы – до 3 раз, разрывная скорость – на 35 %.

Этот диапазон свойств установлен при постоянном содержании керамической связки и стеклянных микросфер, которые оказывают также существенное влияние на технологичность изготовления и работоспособность абразивного инструмента.

Влияние стеклянных микросфер.

Стекло является составной частью керамической связки, поэтому дополнительное введение в ее состав стеклянных микросфер может повлиять на свойства высокопористых кругов.

В результате сложных физико-механических преобразований, происходящих во время термической обработки абразивного инструмента, керамическая связка, представляющая собой сначала смесь сыпучих материалов, полностью или частично расплавляется [55]. В основе этих преобразований лежат дегидратация, удаление механически введенной и кристаллизационной воды; расплавление легкоплавких компонентов и разрушение органических связующих; расплавление

основного стеклообразующего компонента связки с взаимодействием этого расплава с абразивным материалом и материалов корундовых и стеклянных микросфер. При этом связка превращается в стекло сложного химического состава.

При нагреве корундовых систем, образованных на основе керамических связок, содержащих щелочи, уже при температуре 650 °С происходит интенсивное образование жидкой фазы, частично растворяющей поверхность зерен абразивного материала и компоненты связки. При достижении температуры 1200 °С и выше наряду с этим происходит минералообразование с общим повышением вязкости стекла, так как с поверхности зерна в расплав переходит до 8 % Al_2O_3 .

Уже было отмечено, что составы керамических связок для шлифовальных кругов и стеклянных микросфер имеют общие компоненты, которые улучшают адгезию связки к абразивным зернам из электрокорунда и соответственно повышают механическую прочность инструмента. Эти предположения подтверждаются прямым экспериментом.

На рис. 3.22 показано изменение твердости круга по глубине лунки и его разрывной скорости при увеличении объемного содержания стеклянных микросфер.

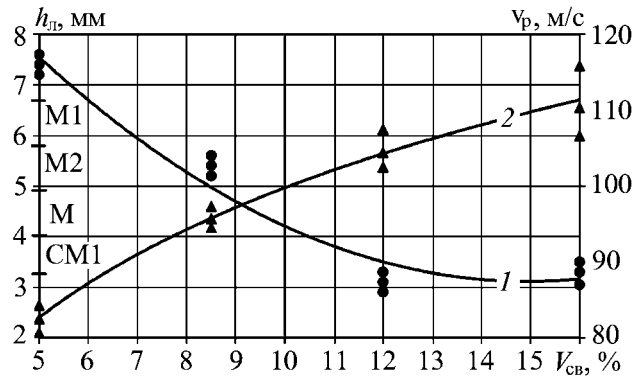


Рис. 3.23. Влияние содержания керамической связки на твердость (1) и разрывную скорость (2) круга зернистостью 16 и структурой 12

сфер марки МС-ВП от 0 до 5,1 % при постоянном содержании 8,5 % связки и 6 % оливковых косточек в электрокорундовом круге зернистостью 16 и структурой 12. По существу содержание стеклянных микросфер $V_{ст}$ возрастает от 0 до 60 % объемного содержания керамической связки. Для принятых условий математические модели изменения твердости круга и его разрывной скорости при высоком уровне адекватности экспериментальным данным (коэффициенты множественной корреляции 0,779 и 0,883 соответственно) имеют следующий вид:

$$h_{л1} = 5,119V_{ст}^{-0,058}, \quad (3.7)$$

$$v_p = 98,834V_{ст}^{0,032}. \quad (3.8)$$

Введение стеклянных микросфер в состав круга повысило его твердость с М2 до М3, а среднюю разрывную скорость с 92,8 до 106 м/с или на 14 %. При этом усилие формования инструмента возрастает в 2 раза, а его деформация при обжиге – на 20 %.

Если сравнить темп изменения твердости и разрывной скорости круга от количества стеклянных микросфер (см. рис. 3.22) и керамической связки (рис. 3.23), то

преимущество будет за керамической связкой. Это можно видеть и по обобщенной модели связи глубины лунки $h_{л1}$ и разрывной скорости круга с содержанием стеклянных микросфер $V_{ст}$ и керамической связки $V_{св}$:

$$h_{л1} = 25,587V_{ст}^{-0,058}V_{св}^{-0,751}, \quad (3.9)$$

$$v_p = 62,741V_{ст}^{0,029}V_{св}^{0,20}. \quad (3.10)$$

Поэтому стеклянные микросферы можно рассматривать как своеобразный порообразователь, обладающий эффектом упрочнения керамической связки. Его введение в состав высокопористой абразивной массы дает возможность получить степень твердости инструмента, которую нельзя обеспечить только керамической связкой, даже применяя ее в больших количествах. При определенном содержании связки достигается насыщение объема инструмента и твердость стабилизируется (см. рис. 3.23), и для этого случая стеклянные микросферы становятся дополнительным фактором улучшения эксплуатационных свойств высокопористых шлифовальных кругов.

3.5. ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ С ВЫГОРАЮЩИМИ И НЕВЫГОРАЮЩИМИ ПОРООБРАЗОВАТЕЛЯМИ

Механизм формирования пористых структур. Основными конструктивными компонентами абразивного инструмента служат абразивные зерна и связка. Их общее количество и количественные пропорции между собой в объеме инструмента почти однозначно определяют его технологические и эксплуатационные свойства. Чем больше абразивных зерен в объеме инструмента, тем легче обеспечить их прочное соединение между собой и тем устойчивее их объемная конфигурация к деформациям и разрушению как в процессе изготовления (формование, обжиг), так и при эксплуатации.

Наиболее благоприятным, с точки зрения технологичности производства абразивного инструмента, является объемное содержание абразивного зерна от 46 до 62 %, т.е. со структурами 8–1 при общем содержании абразива, связки, увлажняющих и клеящих добавок не более 68...74 %. Оставшаяся часть – естественная пористость, объем которой обусловлен плотностью укладки абразивных зерен. Он будет тем больше, чем больше размер абразива.

В связи с необходимостью безусловного выполнения соотношения (1.5) возникают ограничения по изготовлению мелкозернистого инструмента и инструмента с плотными структурами с повышенной твердостью. С увеличением объемного содержания абразивного зерна, а также с уменьшением его зернистости необходимо вводить больше связки, чтобы обеспечить высокую прочность соединения зерен.

Для анализа особенностей внутреннего строения абразивного инструмента на микроуровне, выявления природы связей между зернами и причин флуктуаций компонентов его состава может быть полезна элементная модель.

Элементная модель строения абразивного инструмента. Абразивный инструмент как совокупность однородно распределенных в объеме зерен можно рассматривать в виде упорядоченного множества, состоящего из конечного числа счетных подмножеств (элементов). Каждый такой элемент в миниатюре отображает все свойства и связи абразивного инструмента в целом.

Такой элемент объемного строения из n зерен должен отображать в себе характеристики статистического распределения абразивных зерен с учетом их размеров и количества. Упорядоченной структурой из n зерен, равноудаленных друг от друга на расстояние l_v , может быть сфера с радиусом l_v . В центре сферы находится абразивное зерно, а на ее поверхности по расчету располагается еще 12 зерен. В итоге 13 зерен, занимая объем W_z , равноудалены друг от друга. Число 13 инвариантно для любой зернистости абразива и его содержания в инструменте, а объем, в котором находится это количество зерен, наоборот, зависит от их размеров и количества.

Объем подмножества определяется как объем сферы с радиусом, равным среднему шагу между зернами l_v плюс средний размер зерна A , или

$$W_z = \frac{4}{3} \pi (l_v + 0,71A)^3 = 1,5 \frac{A^3}{V_3} \left(1,613 + \sqrt[3]{V_3} \right)^3. \quad (3.11)$$

Из (3.11) следует, что объем подмножества W_z будет тем меньше, чем меньше размер абразивного зерна и расстояние между ними.

Таким образом, объемная структура в виде сферы с 13 равноудаленными друг от друга абразивными зернами представляет собой упорядоченное подмножество, которое является взаимно однозначным отображением или эквивалентна множеству, идентифицирующему весь абразивный инструмент. В соответствии с теорией множеств отношение эквивалентности

множеств обладает свойствами рефлексивности, симметричности и транзитивности.

Если быть более точным, то рассматриваемое подмножество необходимо представить как 14-гранную призму, вписанную в сферу радиусом l_v . Каждая грань призмы – это правильный треугольник.

В предложенном элементарном подмножестве из 13 зерен неповторяющихся и непересекающихся связей без учета контакта периферийных зерен на сфере с зернами, принадлежащих соседним подмножествам, будет 42 или в среднем 3,2 мостика связи на каждое зерно подмножества.

Упорядоченное подмножество объемом W_z из 13 абразивных зерен с 42 мостиками связи между ними может рассматриваться как эквивалентное отображение или микроэквивалент объемного строения абразивного инструмента различной зернистости и структуры.

Элементная модель удобна для исследований на микроуровне формирования флуктуаций, например, плотности массы инструмента за счет отклонений в равномерном распределении абразивных зерен в его объеме. Действительно, если по расчетам в 1 см^3 абразивного инструмента зернистостью от 6 до 40 и номером структуры от 6 до 16 может находиться от $5,2 \cdot 10^3$ до $1,5 \cdot 10^6$ зерен, то каким образом можно выявить все многообразие связей между ними и механизм взаимодействия между компонентами рецептурного состава?

Рассмотрим, например, формирование неуравновешенности масс у абразивного инструмента двух разных зернистостей. Ее величина определяется как произведение значения неуравновешенной массы на плечо ее действия. Для простоты возьмем систему из двух подмножеств с объемами W_{z1} и W_{z2} , каждый из которых соответствует размеру зерна A_1 и A_2 . Тогда неуравновешенность массы для системы из двух подмножеств равна $W_z \gamma l_v$.

Под действием объемной деформации ε_w в процессе высокотемпературного обжига и вследствие ее неоднородного проявления в различных локальных зонах происходит увеличение плотности

$$\gamma^* = \frac{\gamma}{1 - \varepsilon_w}.$$

Тогда в первом приближении, учитывая формулы для расчета W_z (3.11) и l_v (2.5), можно получить соотношение для неуравновешенных масс m_D инструментов с зернистостью A_1 и A_2 и объемным содержанием абразивного зерна V_{31} и V_{32} в следующем виде:

$$\frac{m_{D1}}{m_{D2}} = \frac{\gamma_1}{\gamma_2} \left(\frac{A_1}{A_2} \right)^4 \left(\frac{V_{32}}{V_{31}} \right)^{1/3}. \quad (3.12)$$

Анализируя (3.12), можно прийти к выводу, что неуравновешенность масс зависит от зернистости и номера структуры шлифовального круга, а также от степени влияния этих параметров на его объемную деформацию, которая, в свою очередь, влияет на плотность массы рассматриваемого подмножества.

Наличие связки в абразивном инструменте. Содержание связки и характер ее распределения в объеме абразивного инструмента является другим необходимым условием его изготовления с заданными эксплуатационными характеристиками и, прежде всего, твердостью и прочностью. Эти две характеристики взаимосвязаны между собой, так как под твердостью понимается сопротивление связки вырыванию абразивных зерен с поверхности инструмента под действием внешней нагрузки. По этой причине твердость и прочность абразивного инструмента обычно коррелированы между собой: чем больше твердость инструмента, тем выше его, например разрывная прочность.

Практика показывает, что содержание связки в абразивном инструменте, необходимое для получения заданной твердости, зависит от размера зерен и их

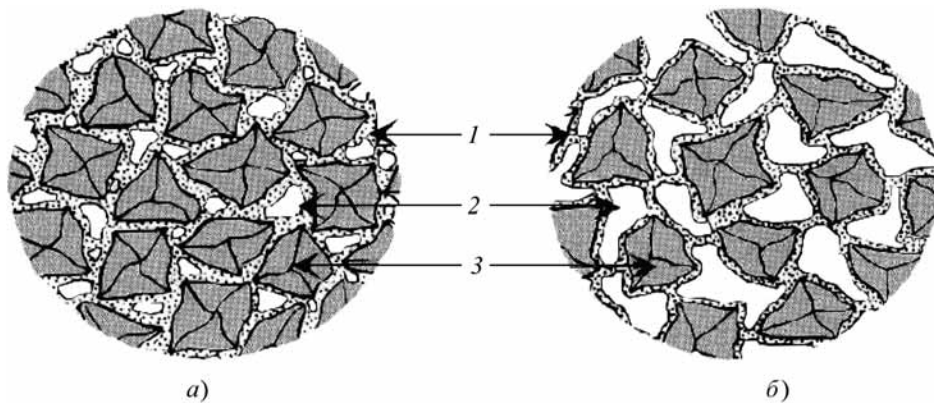


Рис. 3.24. Модель строения абразивного инструмента:
а – с нормальной структурой; *б* – с повышенной пористостью;
 1 – мостики связки; 2 – поры; 3 – абразивное зерно

количества в единице объема. Причем очевидно, что чем меньше размеры зерен и меньше их объемное содержание, тем больше требуется связки, чтобы сохранить заданную твердость. Количественная связь между содержанием связки, с одной стороны, и твердостью, размерами абразивных зерен и номером структуры инструмента, с другой стороны, устанавливается опытным путем и конкретизируется для определенных условий изготовления по материалу абразива, связки и порообразователя.

Для расчетного моделирования необходимо установить механизм связи между абразивными зернами в объеме инструмента. Скрепление зерен с керамической связкой возможно двумя способами: с образованием переходного слоя между зерном и связкой и последующим созданием мостиков связи между соседними зернами (рис. 3.24) или путем заклинивания зерен в объеме связки.

Более эффективное скрепление зерен связкой обеспечивается при первом способе, и он характерен для изготовления абразивного инструмента на керамических связках и особенно для высоких номеров структур с большими расстояниями между соседними зернами.

По первому механизму часть связки остается на поверхности абразивных зерен, обволакивая их в виде переходного слоя толщиной Δ , а оставшаяся часть формирует мостики связи между поверхностями соседних зерен. Наличие переходной или так называемой "реакционной" зоны для создания прочной, адгезионной связи между абразивными зернами показано в работах [51, 55].

Для модели из двух зерен с площадью поверхности S_z и одним мостиком связи между ними с площадью сечения S_m , необходимое объемное количество связки можно определить по формуле

$$V_{cb} = \Delta S_z + S_m l_m, \quad (3.13)$$

где l_m – длина мостика связи между соседними абразивными зернами.

Для произвольного числа зерен n_z и мостиков n_m между ними объем связки рассчитывается как

$$V_{cb} = \Delta n_z S_z + n_m S_m l_m. \quad (3.14)$$

На рис. 3.25 показана расчетная схема определения объемного содержания связки на модели из двух абразивных зерен.

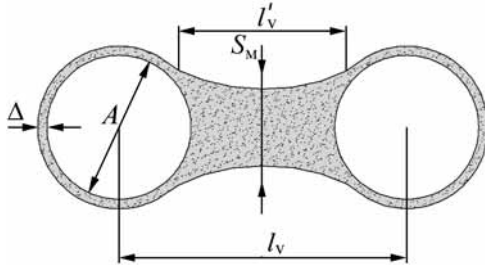


Рис. 3.25. Расчетная схема определения количества связки

Минимальное расстояние между двумя соседними зернами будет равно

$$l'_v = l_v - 1,42A_3 = \frac{1,42A_3}{\sqrt[3]{V_3}} \left(0,806 - \sqrt[3]{V_3} \right). \quad (3.15)$$

Из (3.15) следует, что зерна при их условном представлении в виде сфер начнут касаться друг друга при их объемном содержании $V_3 \geq 0,524$. При структуре 5 и выше между поверхностями зерен всегда будет пространство, которое необходимо заполнить связкой для их скрепления. Этот вывод всегда справедлив при моделировании зерен в виде сфер, независимо от их диаметра.

Следовательно, для инструмента со структурами 5 и менее действуют оба механизма скрепления зерен керамической связкой, а для структур более 5 для инструмента из электрокорунда зерна скрепляются между собой в основном мостиками связки.

Толщина пленки связки, которая обволакивает зерно, не может превышать размер:

$$\Delta \leq 0,5l'_v. \quad (3.16)$$

А сечение мостика связки S_m в предельном случае не может быть более площади сечения зерна сферы:

$$S_m \leq F_3 = 1,58A_3^2. \quad (3.17)$$

Площадь поверхности зерна с учетом (3.16) будет равна

$$S_3 = 6,33A_3^2. \quad (3.18)$$

Из практики изготовления абразивного инструмента на керамических связках известно, что чем меньше размер зерен, тем больше требуется связки для сохранения исходной твердости. Это может быть объяснено только тем, что больше связки расходуется на обволакивание зерен, так как их удельная поверхность, отнесенная к единице занимаемого ими объема, существенно возрастает с уменьшением размера зерна. Так, при уменьшении зернистости с 40 до 6 при структуре абразивного инструмента, равной 6, удельная поверхность зерен возрастает с 0,203 до 32,92 мм²/мм³.

Количество связки, необходимое для обволакивания абразивных зерен, равно

$$V'_{св} = 82,29\Delta A_3^3.$$

Прочность связи двух абразивных зерен будет определяться сечением мостика связки через соотношение:

$$S_m = k_m F_3, \quad (3.19)$$

в котором величина коэффициента $k_m \leq 1$ зависит от твердости абразивного инструмента – чем больше твердость, тем ближе величина k_m к 1.

Составляющая необходимого содержания керамической связки, которая затрачивается на соединение 42 зерен элементного подмножества в соответствии с принятой расчетной схемой равна:

$$V''_{св} = 42k_m F_3 l_v - 42W_3 \quad (3.20)$$

или

$$V''_{св} = 76k_m \frac{A_3^3}{\sqrt[3]{V_3}} - 63A_3^3. \quad (3.21)$$

По предложенным формулам (3.20) и (3.21) прочность связи абразивных зерен зависит только от площади сечения мостика связки без учета длины этого мостика.

При разработке рецептурного состава абразивного инструмента обычно на-

значается объемное содержание связки, которое затем приводится при расчете навески абразивной массы к 100 весовым частям абразивного зерна. Относительное содержание связки в элементном подмножестве определяется через соотношение объема связки, необходимого для обволакивания зерен $V'_{\text{св}}$ и их скрепления мостиками связки $V''_{\text{св}}$, к объему подмножества W_z :

$$V_{\text{св}} = \frac{V'_{\text{св}} + V''_{\text{св}}}{W_z}. \quad (3.22)$$

Из анализа формул, описывающих расчетную модель определения количества керамической связки в абразивном инструменте, следуют выводы, подтверждаемые практикой его изготовления. Для повышения твердости абразивного инструмента на керамической связке необходимо увеличивать ее объемное содержание и тем больше, чем меньше зернистость абразива и выше номер структуры. Но уменьшение размеров абразивных зерен требует больше связки, чем уменьшение их объемного содержания в инструменте. Поэтому при переходе от 6-й к 12-й структуре шлифовального круга при одной и той же зернистости необходимо примерно в 2 раза меньше связки, чем при уменьшении, например, зернистости от 40 до 6 при одинаковом номере структуры.

Формирование пористых структур в абразивном инструменте. При разработке рецептурного состава высокопористого шлифовального круга задается его номер структуры, а в соответствии с требуемой зернистостью и твердостью назначается содержание керамической связки.

Уменьшение объемного содержания абразивных зерен дает некоторый резерв для увеличения количества связки, необходимого для компенсации увеличения среднего расстояния между зернами и соответственно размеров мостиков связки. Но сочетание более ажурного каркаса из

абразивных зерен, расстояние между которыми увеличивается по уравнению (3.15) обратно пропорционально их содержанию, с повышенным содержанием связки таит реальную опасность не получить ожидаемого результата из-за слабой устойчивости к всестороннему сжатию при обжиге инструмента. Чем больше связки в объеме инструмента и меньше абразивных зерен, тем больше вероятность их "стягивания" затвердевающей при остывании связкой на заключительном этапе обжига.

Недостающий абразив, который обеспечивает устойчивую объемную структуру, должен компенсироваться каким-либо твердым наполнителем, чтобы сохранить при формировании инструмента необходимый объем рецептурных составляющих в 68...74 % (без учета естественной пористости).

Достоинства и недостатки такой компенсации за счет выгорающего порообразователя выше были подробно рассмотрены. Также рассмотрены преимущества и особенности использования молодых фруктовых косточек и невыгорающих микросфер в качестве порообразователей при формировании пористых структур абразивного инструмента.

Чтобы научиться составлять оптимальные композиции из выгорающих и невыгорающих порообразователей (по составу и количеству), необходимо понять механизм их действия в процессе изготовления высокопористых шлифовальных кругов и, прежде всего, при их высокотемпературном обжиге.

В табл. 3.21 приведены расчетные оценки количества основных компонентов высокопористого инструмента: керамической связки дисперсностью 50 мкм, корундовых и стеклянных микросфер со средним размером 100 и 46 мкм, фруктовых косточек размером 220 мкм, которые приходятся на одно абразивное зерно в круге со структурой 12 в зависимости от его зернистости.

3.21. Количество компонентов рецептурного состава инструмента со структурой 12, приходящееся на одно абразивное зерно

Компоненты состава	Количество при зернистости			
	12	16	25	40
Керамическая связка	10,4	24,7	94,4	387
Корундовые микросферы	1,3	3,1	11,8	48,4
Стеклянные микросферы	13,4	31,8	121,2	497,1
Фруктовые косточки	0,12	0,29	1,1	4,5
Общая пористость, мм ³	0,0036	0,0084	0,032	0,132
Открытая пористость, мм ³	0,0025	0,0060	0,023	0,094

В табл. 3.21 также даны расчетные данные по общей пористости, которая включает наличие закрытого объема внутри микросфер, и открытую пористость. Расчеты выполнены применительно к твердости М2...М3 с постоянным объемным содержанием всех составляющих компонентов рецептуры круга.

Приведенные соотношения дают важную информацию о возможной степени влияния порообразователей на формирование пористой структуры. Предполагалось, что введение корундовых микросфер обеспечивает устойчивость к деформации во время спекания каркаса из абразивных зерен. Однако относительно небольшое объемное их содержание в сочетании с малыми размерами (в среднем 100 мкм), и в том числе в сравнении с размерами абразивных зерен, заставляет предположить наличие дополнительного действия другого механизма формообразования устойчивой высокопористой структуры.

Возможно, что из-за малых размеров микросферы в процессе спекания обволакиваются керамической связкой. В процессе остывания шлифовального круга они становятся центрами кристаллизации связки, являясь катализатором ускоренного формообразования прочных мостиков связки в объеме инструмента, в то время

как основная масса керамической связки еще находится в расплавленном состоянии. Равномерно распределенные по объему высокопористой абразивной массы такие островки затвердевшей связки вместе с абразивными зернами становятся основой объемного каркаса абразивсвязка и фактором, уменьшающим объемную деформацию инструмента. В пользу рассматриваемой модели свидетельствуют результаты применения алюмосиликатных микросфер в качестве наполнителя высокопористой абразивной массы: при температуре спекания они размягчаются и частично расплавляются, и действовать как основа каркаса, по всей видимости, не могут, но катализатором ускоренного охлаждения керамической связки, с которой они активно взаимодействуют при нагреве и упрочняют ее, вполне могут быть.

Так как отсутствует изоморфизм в размерах, составе и свойствах вводимых порообразователей, то механизмы их взаимодействия со связкой и между собой заметно отличаются друг от друга.

Как показали прямые эксперименты, в процессе обжига фруктовые косточки выгорают лишь частично. Их выгорание начинается с поверхности инструмента, по мере его прогрева в этот процесс вовлекается все большее число дисперсных

частиц из более глубоких слоев абразивной массы. Одновременно протекают процессы размягчения и плавления керамической связки и стеклянных микросфер. Образующаяся жидкая фаза взаимодействует с абразивными зернами и корундовыми (или стеклянными) микросферами с образованием адгезионных связей и частичным растворением корунда. Происходит коалесценция пузырьков от выгоревших косточек и расплавившихся стеклянных микросфер с коацервацией жидкой фазы в виде повышенной концентрации растворенных в ней элементов. Жидкая фаза обволакивает невыгоревшие частицы фруктовых косточек, препятствуя их дальнейшему выгоранию. Взаимодействие приводит к новым, в основном неблагоприятным, изменениям в составе керамической связки.

Сложная многокомпонентная и полиморфная структура из абразивных зерен и невыгорающих порообразователей также обволакивается жидкой фазой сложного гетерогенного состава. Ее постепенное остывание и затвердевание приводит к появлению больших внутренних напряжений, интенсивность и направление действия которых меняется во времени. При этом по объему инструмента происходит перераспределение твердых компонентов под действием напряжений, интенсивность которых зависит от устойчивости к деформации формирующейся пористой структурой.

Однако именно многокомпонентность и изоморфность размеров, составов и свойств вводимых порообразователей при условии их равномерного распределения по объему инструмента становится главным фактором создания статистически гомогенной пористой структуры. При этом введение выгорающих фруктовых косточек создает разветвленное поровое пространство в объеме инструмента, необходимое для его охлаждения при шлифовании. Они разупрочняют круг, поэтому целесообразно использовать фруктовые косточки по объему не более 5...10%.

Стеклянные и силикатные микросферы упрочняют связку, обеспечивая более надежное ее соединение с абразивными зернами за счет эффекта коацервации. Но при использовании силикатных микросфер происходит незначительное разупрочнение круга в целом, вследствие чего нельзя обеспечить рабочие скорости более 80 м/с. Стеклянные же микросферы, напротив, являются эффективным средством повышения рабочих скоростей до 100...140 м/с. В композициях с фруктовыми косточками эти порообразователи могут компенсировать негативное влияние косточек на разупрочнение керамической связки.

Несмотря на то, что в объем инструмента вводится достаточно большое количество невыгорающих порообразователей в виде микросфер – до 20...40 %, у него формируется в конечном итоге открытая пористость, аналогичная инструменту, изготовленному на основе только фруктовых косточек. Например, у высокопористого круга 25А 10П СМ2 12 К5, содержащего 20 % по объему корундовых микросфер, объемная пористость, измеренная прибором ПКП-1, составила 45...50 %. Это соответствует пористости круга на фруктовых косточках, но с твердостью ВМ2, т.е. на 5 степеней мягче, и с содержанием керамической связки примерно на 8 % меньше.

3.6. ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ РЕЛЬЕФА РЕЖУЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ВЫСОКОПОРИСТЫХ ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ

Чтобы выявить особенности строения рабочей поверхности высокопористых кругов, изготовленных на основе корундовых микросфер, фруктовых косточек и их комбинации, в работе [25] было проведено специальное изучение рельефа круга (рис. 3.26).

Из известных способов исследования геометрии рельефа режущей поверхности

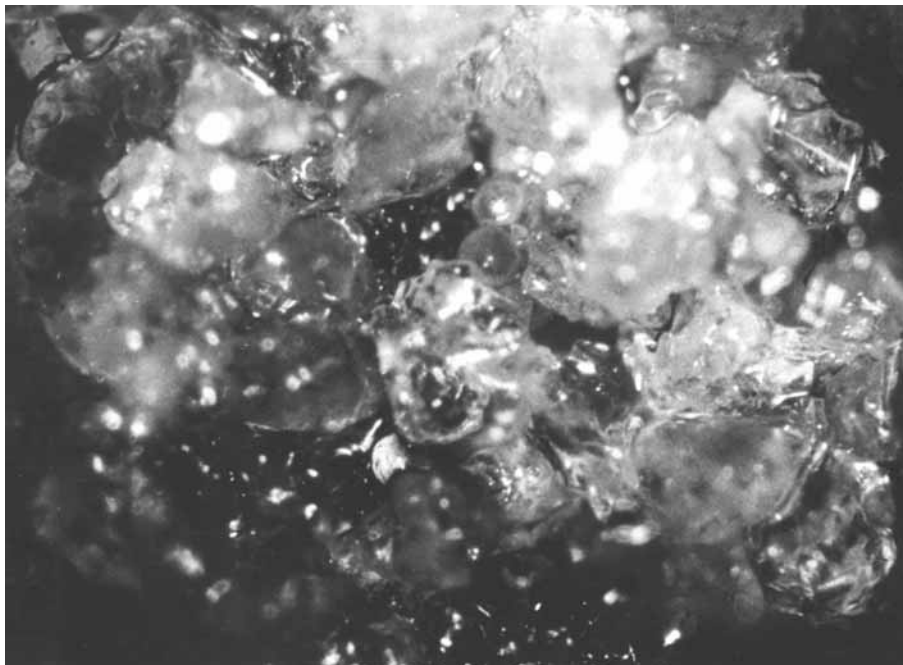


Рис. 3.26. Рабочая поверхность высокопористого круга на основе корундовых микросфер и оливковых косточек. $\times 500$

шлифовальных кругов метод профилографирования выгодно отличается тем, что позволяет комплексно оценивать форму вершины режущих кромок, количество режущих кромок, приходящихся на единицу поверхности, и расстояние между абразивными зернами и др. Реализация данного метода стала возможной благодаря двум свойствам, присущим режущей поверхности шлифовальных кругов, а именно – стационарности и эргодичности. Стационарность режущего профиля позволяет исследовать его независимо от местоположения на абразивной поверхности, а свойство эргодичности – определять статистические характеристики измеряемых случайных величин по одной достаточно протяженной реализации.

Для получения профилограмм рабочей или режущей поверхности инструментов была подготовлена специальная

установка (рис. 3.27), аналогичная описанной в [59]. Принцип работы установки заключается в следующем. Шлифовальный круг 1 в конической оправке 2 устанавливается на роликовом балансирующем устройстве и приводится во вращение от резинового ролика 3, обеспечивающего скорость круга $v_{\text{кр}} = 2$ мм/мин при $D_{\text{кр}} = 250$ мм. Ощупывающий элемент в виде иглы с алмазным наконечником 5 закреплен на одном из концов коромысла 4, совершающем свободное колебание относительно оси вращения. Для исключения возможности поломки иглы на противоположном конце коромысла подвешены противовесы 6, позволяющие обеспечивать нагрузку на иглу с учетом давления подпружиненного щупа индукционного датчика 8 не более 10 г. Плавный подвод ощупывающего элемента, осуществляемый приводом вертикального перемещения стола вертикально-фрезерного станка,

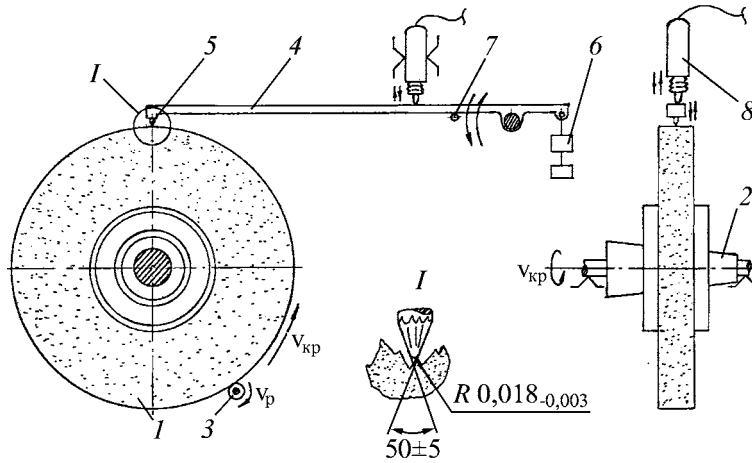


Рис. 3.27. Экспериментальная установка для записи рельефа рабочей поверхности шлифовального круга

на базе которого собрана установка, позволяет регулировать глубину записи рельефа от условной линии максимально выступающих зерен (она составляет примерно 50 мкм), а ограничитель 7 исключает "западание" иглы в крупные поры на поверхности круга, чем оберегает ее от поломок. С индукционного датчика и блока его управления сигнал через делительное устройство поступает на осциллограф, где происходит запись на ультрафиолетовую бумагу с горизонтальным увеличением $\times 27$ и вертикальным $\times 800$.

В качестве оценочных параметров рельефа были приняты следующие (рис. 3.28 и 3.29):

относительная опорная длина профиля, характеризующая контактную поверхность круга с деталью, мкм/мм:

$$tp = \frac{\sum_{i=1}^n b_{pi}}{l},$$

где $\sum_{i=1}^n b_{pi}$ – суммарная длина отрезков профиля на фиксированном уровне (p) в

пределах базовой длины (l), n – число выступов на базовой длине;

средний шаг (среднее расстояние) между выступами, мм:

$$S_p = l / Z_p,$$

где Z_p – среднее число выступов на фиксированном уровне в пределах базовой длины;

средняя длина отрезков выступов, мкм:

$$b_p = \frac{\sum_{i=1}^n b_{pi}}{Z_p} = tp S_p;$$

процентное соотношение одно-, двух- и многовершинных участков профиля, рассчитанное по количественным соотношениям соответствующих выступов в промежутке уровней от 0 до 30 мкм.

Основные изменения в процессе правки и шлифования происходят на глубине до 30 мкм от вершин наиболее выступающих зерен. Поэтому перечисленные параметры фиксировались на различных уровнях относительно линии макси-

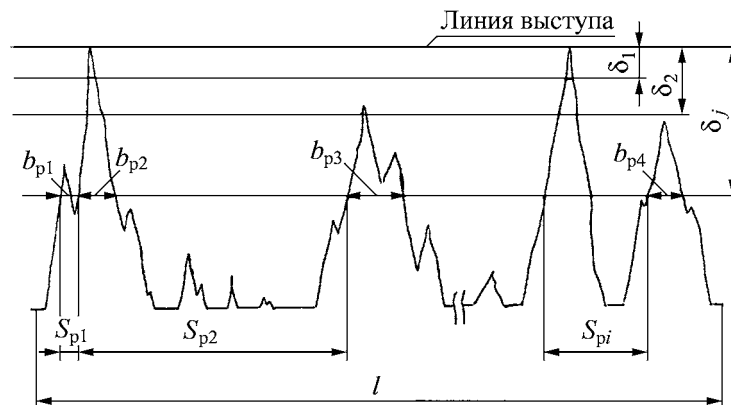


Рис. 3.28. Оценочные параметры геометрии рельефа рабочей поверхности круга

мально выступающих зерен в интервале от 0 до 30 мкм. Линию выступов проводили по базовой длине как касательную не менее чем к 3 наивысшим выступам. Из рассмотрения были исключены случайные вершины, значительно превосходящие уровень большинства выступов. У каждого из исследуемых кругов записывалось не менее трех профилограмм различных участков по периметру круга. Параметры определялись как среднее арифметическое по трем базовым длинам, которые составляли не менее 30 мм.

Запись профилограмм проводилась как после правки круга, так и после его работы (снятия 55 мм^3 материала на 1 мм ширины круга). Правку кругов осуществляли алмазным правящим роликом на следующих режимах: $v_{кр} = 27 \text{ м/с}$; $v_p = 20 \text{ м/с}$; $S = 1,0 \text{ мм/мкм}$; $t = 0,1 \text{ мм}$; направление вращения ролика – попутное. В качестве обрабатываемого материала был принят жаропрочный никелевый сплав ХН77ТЮР, обработку которого проводили по глубинной схеме на следующих режимах: $v_{кр} = 27 \text{ м/с}$; $v_d = 100 \text{ мм/мин}$; $t = 0,1 \text{ мм}$; схема шлифования – попутная.

По результатам проведенных исследований и последующей обработки про-

филограмм были получены параметры в зависимости от факторов характеристики абразивного инструмента. Оценка влияния факторов характеристики инструмента на процентное соотношение выступов в интервале уровней от 0 до 30 мкм дана в табл. 3.22 – 3.25. Запись профилограмм режущей поверхности кругов как после их правки, так и после определенного периода работы круга, позволила фиксировать изменения геометрии рельефа, что позволяет судить об условиях работы инструмента. На рис. 3.30 приведен пример графической интерпретации параметров рельефа рабочей поверхности круга в зависимости от его зернистости после правки и шлифования.

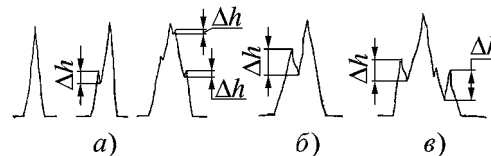


Рис. 3.29. Различные выступы:

а – одновершинные ($\Delta h \leq 5 \text{ мкм}$); б – двухвершинные ($\Delta h > 5 \text{ мкм}$); в – многовершинные ($\Delta h > 5 \text{ мкм}$)

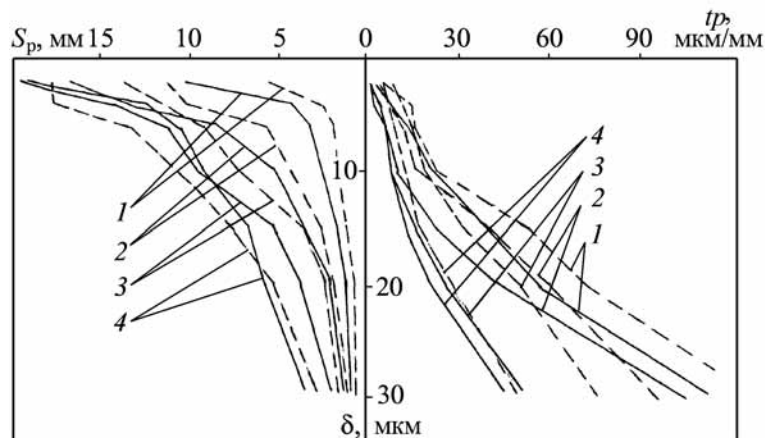


Рис. 3.30. Зависимость параметров рельефа от зернистости инструмента:
 1 – 10, 2 – 12, 3 – 16, 4 – 25;
 — — после правки, ---- — после шлифования

3.22. Количество выступов в интервале от 0 до 30 мкм после правки и работы круга в зависимости от его зернистости

Запись рельефа круга	Число вершин	Количество выступов, %, при зернистости круга			
		10	12	16	25
После правки	1	83,3	80,3	79,2	78,9
	2	10,0	11,5	17,0	15,8
	<i>n</i>	6,7	8,2	3,8	5,3
После шлифования	1	82,4	79,2	77,4	69,6
	2	9,8	17,0	14,5	26,1
	<i>n</i>	7,8	3,8	8,1	4,3

3.23. Количество выступов в интервале от 0 до 30 мкм после правки и работы круга в зависимости от его твердости

Запись рельефа круга	Число вершин	Количество выступов, %, при степени твердости		
		ЧМ...ВМ1	ВМ2...М1	М2...М3
После правки	1	82,7	82,5	77,4
	2	11,5	12,7	14,5
	<i>n</i>	5,8	4,8	8,1

Продолжение табл. 3.23

Запись рельефа круга	Число вершин	Количество выступов, %, при степени твердости		
		ЧМ...ВМ1	ВМ2...М1	М2...М3
После шлифования	1	86,9	82,5	71,9
	2	9,8	7,9	18,2
	<i>n</i>	3,9	9,6	9,9

3.24. Количество выступов в интервале от 0 до 30 мкм после правки и работы круга в зависимости от номера его структуры

Запись рельефа круга	Число вершин	Количество выступов, %, в зависимости от номера структуры		
		10	12	14
После правки	1	79,4	82,5	86,1
	2	14,3	12,7	8,8
	<i>n</i>	6,3	4,8	5,1
После шлифования	1	76,0	82,5	86,5
	2	8,4	7,9	7,4
	<i>n</i>	15,6	9,6	6,1

3.25. Количество выступов в интервале от 0 до 30 мкм после правки и работы круга в зависимости от размера выгорающего наполнителя

Запись рельефа круга	Количество вершин	Количество выступов, %, при размерах фруктовых косточек, мкм		
		160...200	250...315	400...500
После правки	1	86,5	83,5	82,5
	2	5,1	10,2	12,7
	<i>n</i>	8,1	6,3	4,8
После шлифования	1	84,2	82,3	82,5
	2	6,7	9,9	7,9
	<i>n</i>	9,1	7,8	9,6

Размер невыгорающего порообразующего наполнителя, объемного содержания наполнителей обеих типов и изменение номера структуры инструмента при постоянстве значения его степени твердости оказывают незначительное влияние на изменение среднего расстояния между выступами и относительной опорной длины профиля. Поэтому из-за отсутствия наглядности, данные графические зависимости не представлены. Тем не менее, в табл. 3.26 приведены значения указанных параметров рельефа, измеренные на высоте 10 мкм от линии выступов, и процентное соотношение выступов, что позволяет составить представление о степени влияния данных факторов характеристики инструмента на показатели рельефа с учетом записи его после правки и работы круга.

Исследования [59] показали, что для улучшения режущей способности кругов, равно как и для снижения температур в зоне резания, необходимо стремиться к:

- уменьшению относительной опорной длины профиля, что уменьшает поверхность контакта инструмента и заготовки;
- увеличению среднего расстояния между выступами, что увеличивает расстояние между тепловыми источниками;
- уменьшению средней длины отрезков выступов, что уменьшает производящую работу сил трения.

Анализ полученных зависимостей параметров рельефа от факторов их характеристики показал, что наибольшее влияние, с учетом принятых пределов варьирования, на состояние режущей поверхности круга оказывают зернистость, номер структуры при постоянном значении процентного содержания связки и степень твердости инструмента. Однако если уменьшение твердости инструмента до чрезвычайно мягкой (ЧМ) оказывает положительное влияние на все без исключения параметры рельефа (см. табл. 3.23) и даже создает предпосылки для работы круга в режиме самозатачивания, о чем свидетельствует уменьшение tp , увеличе-

ние S_p и доли одновременных выступов после работы круга, то характер влияния других факторов характеристики неоднозначен.

Так, увеличение зернистости с 10 до 25 приводит к увеличению S_p и уменьшению tp , в то время как доля одновременных выступов значительно снижается, что еще более характерно после наработки кругом определенного периода времени (см. табл. 3.22). Увеличение номера структуры с 10 по 14 при постоянном процентном содержании связки в объеме кругов благоприятствует повышению режущей способности круга (см. табл. 3.24), но приводит к значительному разбросу значений выходных параметров после шлифования, чего нельзя сказать о кругах 12-го номера структуры. Интересно также отметить, что изменение номера структуры при постоянной степени твердости круга оказывает меньшее влияние на параметры рельефа (см. табл. 3.26). Компенсация потери зерна в объеме инструмента связкой уменьшает степень рассматриваемого влияния, но не изменяет его характера.

Введение в состав круга порообразователей двух разнородных типов и варьирование их размерами и процентным содержанием в объеме инструмента позволили значительно расширить пределы регулирования геометрии рабочей поверхности инструмента. В то же время их влияние на параметры рельефа, по сравнению с традиционными факторами характеристики инструмента, носит менее выраженный характер.

Различие во влиянии размера выгорающего наполнителя на принятые параметры рельефа (см. табл. 3.25) говорит о существовании оптимального значения $A_{к.ф.}$, что согласуется с исследованиями, описанными в работе [59].

Выполненный экспериментальный анализ состояния рабочей поверхности высокопористых кругов на основе выгорающих и невыгорающих порообразователей дает основание считать, что законо-

3.26. Влияние факторов характеристики абразивного инструмента
(номера структуры при постоянной степени твердости, размера МС, объемного содержания МС и КФ)
на параметры рельефа рабочей поверхности круга

Характеристика абразивного инструмента	Переменные параметры состава круга	Параметры рельефа рабочей поверхности круга				
		t_{10} , мкм/мм	S_{10} , мм	Соотношение выступов, %		
				1	2	n
24А 10П ВМ2...М1 12 К5 МС10/100 КФ5/400	—	11,58/17,88	4,0/3,42	82,5/82,5	12,7/7,9	4,8/9,6
24А 10П ВМ2...М1 К5 МС10/100 КФ5/400	Структура 10, $V_3 = 42\%$	12,07/16,91	3,61/3,81	80,6/76,9	10,2/10,6	9,2/12,5
	Структура 14, $V_3 = 34\%$	10,38/13,26	4,75/3,69	84,1/83,2	9,2/10,5	6,7/6,3
24А 10П ВМ2...М1 12 К5 МС10/100 КФ5/400	$A_{\text{мс}} = 40 \dots 80$ мкм	12,78/19,14	3,14/2,29	81,6/80,0	9,2/7,1	9,2/12,9
	$A_{\text{мс}} = 120 \dots 160$ мкм	7,23/7,64	5,12/5,23	83,7/83,4	9,7/5,8	6,6/10,8
24А 10П ВМ2...М1 12 К5 МС10/100 КФ5/400	$V_{\text{мс}} = 0$	13,29/16,03	4,24/2,47	82,1/81,4	10,3/9,1	7,6/9,5
	$V_{\text{мс}} = 20\%$	12,07/15,36	3,25/3,12	83,5/83,0	11,0/12,3	5,5/4,7
24А 10П ВМ2...М1 12 К5 МС10/100 КФ5/400	$V_{\text{к.ф}} = 0$	13,81/17,91	3,18/2,83	83,1/83,6	10,8/9,2	6,1/7,2
	$V_{\text{к.ф}} = 20\%$	9,13/12,80	4,40/3,99	79,3/77,1	10,0/9,7	10,7/13,2

Примечание. В испытании приведено значение параметра после правки круга, в знаменателе — после его работы в условиях шлифования.

мерности формирования режущего рельефа в этом случае аналогичны высокопористому инструменту, изготовленному на основе только выгорающих порообразователей. Соответственно сохраняются все преимущества благоприятного с точки зрения процесса шлифования режущего рельефа кругов [59] (см. также раздел 1.2).

Проведенные исследования позволили создать предпосылки для управления рельефом режущей поверхности шлифовального круга путем изменения его характеристики, что оказывает непосредственное влияние на условия протекания процесса резания. Так снижению тепло-

напряженности обработки, связанной с улучшением условий работы круга, способствует использование кругов с повышенной зернистостью, наиболее мягких по твердости и с высокими номерами структур. Применение в рецептурном составе высокопористого абразивного инструмента оптимального объемного содержания невыгорающего наполнителя максимально возможного размера, а также увеличение объемного содержания выгорающего наполнителя определенного размера способствует дополнительному снижению температур в зоне шлифования.

Глава 4

ТЕХНОЛОГИЧНОСТЬ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ВЫСОКОПОРИСТЫХ ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ

Технологической особенностью изготовления высокопористых абразивных кругов на керамических связках с номерами структур от 10 до 22 и выше, по сравнению с инструментом нормальной структуры (5...8), являются более низкие значения плотности абразивной массы – до 2 раз и усилия прессования – до 10 раз при высокой степени деформации после обжига – до 25 раз.

Такое сочетание технологических свойств предопределяет определенные трудности при изготовлении высокопористого инструмента, которые связаны с большой вероятностью его разрушения на всех этапах технологического цикла и большим объемом механической обработки. Так как технология изготовления высокопористых кругов и кругов с нормальной структурой практически не отличаются друг от друга, то единственной возможностью обеспечить экономичность и высокое качество высокопористого абразивного инструмента становится управление их рецептурным составом, т.е. оптимальным подбором исходных компонентов абразивной массы как по свойствам, так и по количественному содержанию.

Современный высокопористый круг для экстремальных условий глубинного или высокоскоростного шлифования представляет собой сложную композицию из абразивных зерен, связки и порообразователей, различных по своему химическому составу, физико-механическим и морфологическим свойствам. Подбор оптимальных композиций по составу позволяет улучшить не только технологические свойства абразивного инструмента этого класса, но также повысить и его эксплуатационные характеристики – стабиль-

ность распределения твердости в объеме, неуравновешенность масс и разрывную скорость.

Технологические свойства абразивного инструмента проявляются на всех этапах его изготовления. В этой связи ниже рассматривается технология изготовления шлифовальных кругов на основе электрокорунда и карбида кремния – последовательность основных операций и их содержание. Подробно описаны особенности производства высокопористых шлифовальных кругов, обусловленные, в частности, их повышенной деформацией при прессовании и обжиге, различными композиционными составами высокопористой абразивной массы, механизмами ее смешивания, экологичностью изготовления и др.

На всех этапах изготовления абразивного инструмента проявляется негативное влияние случайных факторов производства, поэтому ниже приведены рекомендации по уменьшению их влияния.

4.1. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ВЫСОКОПОРИСТЫХ АБРАЗИВНЫХ КРУГОВ

Последовательность и режимы выполнения операций, применяемое оборудование и оснастка определяются многими факторами, среди которых основную роль играют материал связки, форма и размер инструмента, серийность производства.

Технологический процесс изготовления шлифовальных кругов на керамических связках, в том числе высокопористых, включает следующие основные операции: подготовка исходных материалов, получение абразивной массы смешиванием

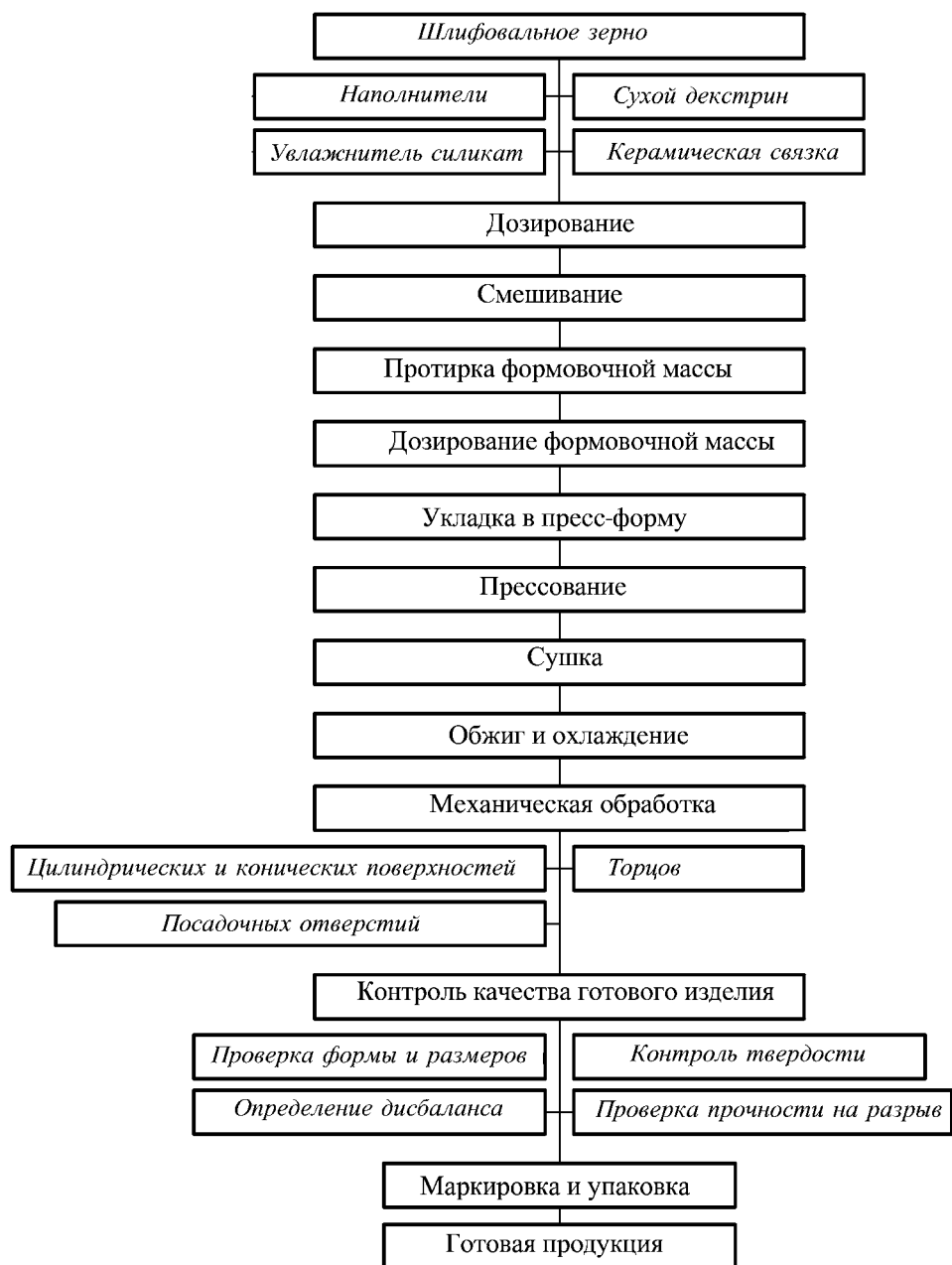


Рис. 4.1. Схема технологического процесса изготовления высокопористых абразивных кругов

исходных материалов, формование абразивных кругов, термическая обработка (сушка, обжиг), механическая обработка, контроль, маркировка и упаковка (рис. 4.1).

Из анализа технологического процесса следует, что все факторы, которые повышают однородность формовочной массы и равномерность ее распределения в объеме круга, повышают качество шлифовальных кругов.

Неоднородный состав и неравномерное распределение формовочной массы в объеме круга приводит к значительной и неравномерной деформации круга при спекании, отклонению от заданной степени твердости и увеличению ее нестабильности, увеличению неуравновешенности масс в объеме круга, уменьшению разрывной скорости и, следовательно, рабочей скорости высокопористого абразивного круга.

К факторам, влияющим на однородность состава формовочной массы, относятся:

- порядок смешивания компонентов в смесительной машине;
- метод засыпки компонентов формовочной массы в смесительную машину (порциями или все требуемое количество одновременно);
- время смешивания формовочной массы в смесительной машине;
- качество протирки формовочной массы через сетку;
- способ и равномерность укладки формовочной массы в пресс-форме при формовании;
- метод формования и применяемое при этом технологическое оборудование.

Отклонение от технических требований термической обработки приводит к увеличению деформации при спекании и, как следствие, необеспечению требуемой точности размеров и формы кругов, заданной структуры (пористости), а также к увеличению нестабильности твердости и неуравновешенности масс.

Изготовление формовочной массы.

Цель этого этапа – получение однородной по составу и плотности смеси всех компонентов. Процесс приготовления абразивных формовочных масс включает дозирование компонентов, смешивание и протирку.

Формовочная высокопористая масса состоит из смеси компонентов: керамической связки, абразивных зерен, выгорающих и невыгорающих порообразователей, а также увлажняющих и клеящих веществ. Дозирование компонентов при изготовлении абразивной массы производится строго по определенным весовым соотношениям, в зависимости от рассчитанной рецептуры высокопористого круга. Объемное содержание абразивного зерна в объеме круга обусловлено заданной структурой круга, а объемное содержание связки для определенной структуры характеризует твердость круга.

Для установления необходимого весового содержания зерна и связки через их объемное содержание при изготовлении круга заданных размеров, структуры, степени твердости используют следующие выражения:

$$P_z = V_z V_{кр} \gamma_z,$$

$$P_{св} = V_{св} V_{кр} \gamma_{св},$$

где V_k – объем круга (с учетом припуска на мехобработку); $\gamma_z, \gamma_{св}$ – удельный вес соответственно зерна и связки, $V_z, V_{св}$ – объемная доля соответственно зерна и связки.

При расчетах содержания связки в круге следует учитывать, что для обеспечения его работоспособности, объемное содержание связки в нем должно быть не менее 0,5 %.

От точности дозирования зависит во многом качество инструмента. Например, изменение количественного содержания керамической связки на 1...1,5 % может изменить твердость высокопористого круга на одну-две степени в зависимости от

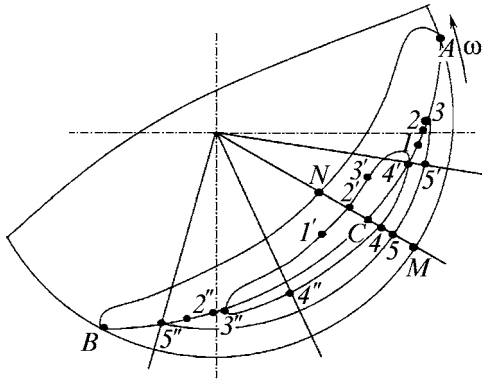


Рис. 4.2. Схема движения частиц в поперечном сечении барабана

его зернистости и номера структуры. Компоненты формовочной массы, как правило, должны дозироваться с точностью не более $\pm 0,5\%$ по массе.

Высокопористая абразивная масса представляет собой сложную многокомпонентную и полиморфную композицию, в состав которой может входить до 10...12 компонентов в качестве абразива, порообразователей и связующих, различных по своему химическому составу, плотности, форме, размерам и электростатическим свойствам. Например, плотность входящих в высокопористую абразивную массу компонентов может изменяться от 0,3 до 4 г/см³, т.е. более чем в 10 раз, а дисперсность — от 0,01 до 0,5 мм и более. Чтобы изготовить в этих условиях однородную абразивную массу без разрушения в процессе перемешивания порообразователей в виде тонкостенных микросфер, необходимо было разработать особую последовательность смешивания компонентов, выбрать время перемешивания в зависимости от состава абразивной массы и конструкции мешалки. Смешивание компонентов формовочной массы осуществляется в мешалках с планетарным вращением лопастей.

Несмотря на внешнюю простоту и широкую распространенность, процесс смешивания, особенно многокомпонентных смесей, исследован не до такой сте-

пени, чтобы иметь о нем ясное представление и получать четкие рекомендации по его рациональной организации.

В этой связи полезно будет обсудить процесс приготовления формовочной массы на основе современных воззрений о его физической природе.

Для приготовления абразивной массы обычно используют мешалки периодического действия в виде цилиндрической емкости смесителя с вращающимися лопастями. По механизму перемешивания компонентов абразивной массы их можно отнести к циркуляционным, для которых характерно движение основного потока смешиваемого материала по замкнутому контуру.

Механизм смешивания компонентов абразивной массы можно представить следующим образом. При оптимальной загрузке емкости смесителя она заполняется только на часть своего объема. Под действием центробежных сил от вращающихся лопастей массы перемещаются к периферии емкости с образованием поднимающегося слоя. Частицы массы в нем движутся по концентрическим окружностям с центром, совпадающим с осью вращения лопастей. В этом слое перемешивания компонентов массы не происходит.

Одновременно формируется так называемый скатывающийся слой, который периодически смещается в образующуюся воронку по оси вращения лопастей. По достижении верхней границы слоев AC (рис. 4.2) частицы массы переходят из поднимающегося в скатывающийся слой, где движутся по криволинейным траекториям. При движении в скатывающемся слое, вследствие его рыхлой структуры, частицы могут перемещаться по направлению к центру циркуляции или, напротив, в периферийные слои смесителя.

В скатывающемся слое на разных радиусах частицы массы перемещаются в осевом направлении на разные расстояния. Максимальное осевое перемещение имеют частицы, движущиеся по открытой

поверхности скатывающегося слоя, т.е. те, которые в поднимающемся слое находились на периферии емкости, а минимальное – частицы, расположенные вблизи центра циркуляции. Смешивание в поперечном сечении цилиндра смесителя происходит значительно быстрее, чем в продольном, т.е. по оси вращения лопастей.

От интенсивности осевого смешивания зависит "сглаживающая" способность смесителя, другими словами, степень однородности абразивной массы. Сглаживающая способность смесителя определяется объемом загрузки смешиваемых компонентов и характером их движения при перемешивании.

По достижении нижней границы раздела слоев CB частицы вновь переходят из скатывающегося в поднимающийся слой. Таким образом, перемешиваемая абразивная масса движется по замкнутому циркуляционному контуру. Процессы смешивания поднимающегося и скатывающегося слоев обеспечивают стохастический характер движения частиц смешиваемых компонентов в емкости смесителя.

При полном заполнении емкости смесителя превалирует детерминированная составляющая в движении частиц абразивной массы, и обеспечить их равномерное перемешивание становится сложнее.

На рис. 4.2 показано поперечное сечение емкости, частично заполненной сыпучим материалом [68]. Можно считать, что смешивание материала в поперечном сечении происходит за счет перемещения частиц в радиальном и угловом направлениях. Перемещение в радиальном направлении происходит, в основном, за счет того, что толщина скатывающегося слоя (отрезок CN) меньше толщины поднимающегося слоя (отрезок CM), и поэтому несколько частиц (1, 2, 3), находящихся на разных радиусах в поднимающемся слое, попадают в один скатывающийся слой. При повторном попадании в поднимающийся слой частицы могут изменить свое взаимное расположение

на 1', 2', 3'. Очевидно, что чем меньше отношение CN к CM , тем существеннее частица может изменить свое положение за один оборот вокруг центра циркуляции.

Угловое смещение частиц происходит за счет того, что частицы 4, 5, первоначально находящиеся в одном радиальном сечении поднимающегося слоя, не одновременно переходят в скатывающийся слой (положение 4', 5'), в результате чего после скатывания они попадают в разные радиальные сечения поднимающегося слоя (4'', 5'').

Таким образом, в скатывающемся слое реализуются одновременно оба механизма смешивания, поэтому они могут как усиливать друг друга, так и ослаблять. При движении в скатывающемся слое частицы соударяются друг с другом, а их траектории изменяются. Поскольку соударения носят случайный характер, то и изменения траекторий также случайны. Таким образом, процесс смешивания сыпучих материалов в поперечном сечении барабана следует рассматривать как детерминировано-стохастический. Если частицы смешиваемых компонентов отличаются по размерам или удельной плотности, то в результате длительного смешивания более мелкие или тяжелые частицы сконцентрируются вокруг центра циркуляции (рис. 4.2, т. С), независимо от характера первоначальной загрузки компонентов, т.е. произойдет сегрегация частиц по размерам или по удельным плотностям. Это явление можно объяснить тем, что при движении в скатывающемся слое мелкие или тяжелые частицы "проваливаются" или "тонут" в зазоры между нижележащими частицами, так как в скатывающемся слое материал разрыхляется.

Теория процесса смешивания более или менее разработана для двухкомпонентных смесей, описательные модели предложены для трехкомпонентных составов (см. например [68]).

Для формализации смешивания обычно проводится аналогия со случайным процессом марковского типа (или

процессом без последствия) и используется математический аппарат случайных марковских цепей.

Идея разделить процедуру смешивания на два составляющих процесса – образование и взаимодействие двух слоев – оказалась весьма плодотворной для осмысления этого сложного механизма и для его формализации. Механизм смешивания в такой трактовке одинаков для процессов, происходящих в смесителях периодического и непрерывного действия с различными технологическими схемами смешивания.

Для приготовления формовочных высокопористых масс эффективны смесители с неподвижным барабаном, где смешивание происходит за счет вращения двух параллельных винтообразных лопастей роторного типа со встречным направлением.

Для многокомпонентных полидисперсных систем, каковыми являются высокопористые абразивные массы, какие-либо теоретические представления отсутствуют, и соответственно нет научно обоснованных рекомендаций по оптимальному регламенту загрузки компонентов, режимам смешивания, конструкциям смесителей и т.д.

Основываясь на известных публикациях и практическом опыте, можно сформулировать некоторые особенности смешивания высокопористых абразивных масс. Процесс их смешивания складывается из трех элементарных процессов, протекающих одновременно:

- перемещения группы смежных частиц из одного места смеси в другое внедрением и скольжением слоев (конвективное смешивание);
- постепенного перераспределения частиц различных компонентов через свежее образованную границу их раздела (условно можно назвать диффузионным смешиванием);
- дислоцирования частиц, имеющих одинаковую массу, в соответствующих объемах смесителя под действием инер-

ционных или гравитационных сил (эффект сегрегации).

Приготовление абразивной массы включает в себя введение на определенных этапах увлажнителей – воды и жидкого стекла. В этом случае смешивание влажной абразивной массы представляется как результат ее вязкопластического течения с преобладанием механизмов конвективного и диффузионного смешивания.

Получение высококачественных абразивных смесей в циркуляционных смесителях в некоторых случаях проблематично. Это связано с тем, что при приготовлении многокомпонентных смесей (абразив, связка, декстрин, порообразователь и др.) одновременная загрузка смешиваемых материалов, как это иногда практикуется, приводит к появлению ядра сегрегации с повышенным содержанием наиболее склонных к сегрегации ключевых компонентов (например, абразивного зерна).

Для получения однородной массы необходимо загружать все ее исходные компоненты не одновременно или симультанно, а только в определенной последовательности. В процессе смешивания в смеситель могут догружаться, и даже в достаточно больших порциях, некоторые компоненты массы. Их попадание в смеситель полностью меняет как конфигурацию слоя, так и разделение его на подслои. Может изменяться также концентрация смешиваемых компонентов в подслоях.

При приготовлении многокомпонентных абразивных масс, составляющие которых отличаются физико-химическими и морфологическими свойствами (размером, формой, плотностью и т.д.), движущей силой процесса смешивания является целенаправленное движение отдельных компонентов в определенные зоны смесителя. Указанный механизм обусловлен склонностью компонентов к сегрегации, а степень однородности получаемой массы является результатом сегрегации компонентов.

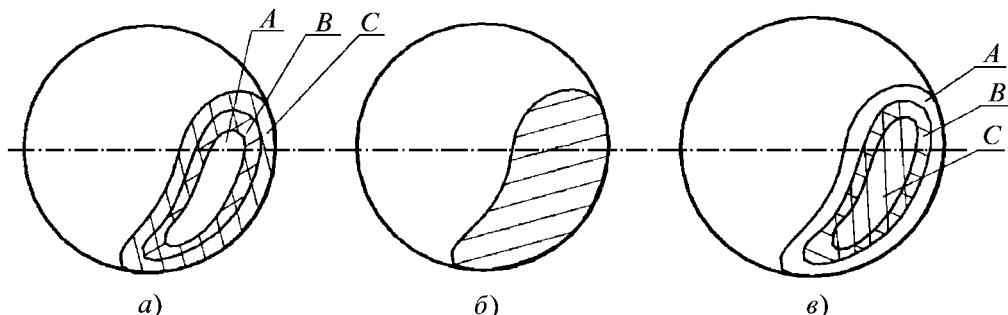


Рис. 4.3. Распределение трех компонентов, имеющих разную склонность к сегрегации, в поперечном сечении смесителя

По мнению авторов работы [68] сегрегация может не препятствовать, а, наоборот, способствовать получению высококачественных смесей. Это связано с тем, что в циркуляционных смесителях имеет место упорядоченный или детерминированный характер движения рабочих элементов, и зоны сегрегированного состояния смеси легко прогнозируемы. Для того чтобы явление сегрегации превратилось из отрицательного в положительный фактор смешивания, необходимо назначать рациональный регламент загрузки компонентов и управлять режимом процесса.

Эффект сегрегации можно использовать для дополнительной детерминации процесса смешивания. При этом появляется определенная направленность движения тех или иных компонентов, например, в результате длительного смешивания нескольких компонентов, имеющих разную склонность к сегрегации, вокруг центра циркуляции будет расположен компонент, наиболее к ней склонный. В нашем случае это будет компонент *C*, затем будет расположен компонент *B* и на периферии, в поперечном сечении барабана, расположится компонент *A*, как показано на рис. 4.3, *в*. Следует отметить, что данное конечное распределение компонентов в поперечном сечении барабана не зависит от их первоначальной загрузки.

Загрузку ключевых компонентов необходимо осуществлять в диаметрально противоположных областях смесительной камеры, для того чтобы их частицы проникали между частицами основного компонента. При наибольшей склонности к сегрегации компонента *C*, он за определенный промежуток времени пройдет больший путь от периферийных слоев к центру циркуляции, чем компонент *B*. Следовательно, загрузка компонентов в смеситель должна быть организована в порядке, указанном на рис. 4.3, *а*, т.е. компонент *A*, затем компонент *B* и только после этого компонент *C*.

Процесс смешивания необходимо остановить в тот момент, когда смесь наиболее качественна (рис. 4.3, *б*). Это промежуточное состояние между первоначальной загрузкой (рис. 4.3, *а*) и полной сегрегацией смеси (рис. 4.3, *в*), когда частицы компонента *C* уже достигли центра циркуляции, но еще не ушли с периферии сечения. Частицы компонента *B* достигли периферии в результате вытеснения их из средних слоев компонентом *C*, а также уже достигли центра циркуляции в результате вытеснения ими оттуда компонента *A*.

Процесс смешивания компонентов, имеющих одинаковые свойства, которые могут каким-либо образом влиять на сегрегацию, носит стохастический характер

и, как следствие, происходит очень медленно. При этом целесообразна одновременная параллельная загрузка компонентов с одинаковой производительностью их подачи в емкость смесителя. Тогда минимизируются перемещения частиц отдельных компонентов, и при сохранении стохастического характера смешивания возрастает вероятность равномерного распределения компонентов по рабочему объему смесителя.

Для приготовления качественных смесей из компонентов с различной склонностью к сегрегации обязательна организация неодновременной их загрузки с последовательностью и временем смешивания, которые должны учитывать эту склонность.

Соответствующие рекомендации сводятся к следующему:

- компоненты загружаются в смеситель последовательно в порядке возрастания их склонности к сегрегации;
- загрузка компонентов осуществляется в зоны, максимально удаленные от центров сегрегации;
- время пребывания компонентов в смесителе обратно пропорционально их склонности к сегрегации;
- при смешивании компонентов, не склонных к сегрегации, их загрузку необходимо производить одновременно, равномерно и параллельными потоками.

Для улучшения размешивания и предотвращения образования комков в формовочной массе связку, невыгорающие и выгорающие наполнители, декстрины и другие клеящие вещества следует засыпать в смесительную машину небольшими порциями.

Для обеспечения повышенного качества высокопористых кругов необходимо смешивать компоненты формовочной массы не менее 12...14 мин. Как экспериментально установлено, время смешивания формовочной массы зависит от размера абразивного зерна, относительного

содержания невыгорающих микросфер, абразивного зерна (структуры) и массы формовочной смеси.

Увеличение относительного содержания корундовых и стеклянных микросфер при уменьшении относительного содержания абразивного зерна (увеличение номера структуры) уменьшает время смешивания. Чем оптимальнее относительное содержание компонентов высокопористого круга, тем меньше время смешивания.

Увеличение времени смешивания массы для абразивных кругов, как правило, приводит к повышению качества инструмента, но при этом пропорционально увеличивается себестоимость его изготовления. Длительное перемешивание высокопористой абразивной массы может привести к разрушению тонкостенных микросфер.

Время смешивания формовочной массы должно быть оптимальным, обеспечивающим получение заданного качества абразивных кругов и экономичность их изготовления, в том числе высокопористых. На основе проведенных экспериментальных исследований можно рекомендовать время смешивания в смесительной машине типа СМ в зависимости от номера зернистости, номера структуры и суммарного содержания корундовых и стеклянных микросфер, показанное в табл. 4.1. При использовании в качестве порообразователя фруктовых косточек рекомендуется увеличить время смешивания на 2...5 мин.

Для формовочной массы абразивное зерно является ключевым компонентом, и эту роль оно сохраняет в высокопористых смесях, несмотря на значительное уменьшение объемного содержания в составе (но не по массе). Поэтому смешивание всегда начинается с загрузки абразива, а затем последовательно добавляются остальные компоненты. Временной интервал смешивания между загрузками обычно составляет 4...6 мин в зависимости от

4.1. Рекомендуемое время смешивания 10 кг формовочной массы для высокопористого круга закрытой структуры в смесительных машинах типа СМ

Зернистость круга	Номер структуры круга	Содержание корундовых и стеклянных микросфер в круге, %	Время смешивания, мин
8...12	10...14	0,5...8	14...20
	14...16	8...20	16...22
	16...20	20...38	18...24
	20...24	38...60	20...26
16...25	10...14	0,5...8	12...18
	14...16	8...20	14...20
	16...20	20...38	16...22
	20...24	38...60	18...24
32...40	10...14	0,5...8	10...14
	14...16	8...20	12...16
	16...20	20...38	14...18
	20...24	38...60	16...20

объема. Для 400 кг девятикомпонентной высокопористой массы общее время смешивания достигает 40...50 мин и зависит от зернистости абразива и других факторов.

Оптимальной объемной конструкцией высокопористого (и не только) шлифовального круга является такая, у которой вокруг каждого отдельного зерна в межзеренном пространстве равномерно и равноудаленно располагаются частицы связки и порообразователи. Зерна и микросферы должны быть покрыты влажной клеящей оболочкой.

В действительности формирование абразивной массы происходит не так, как хотелось бы.

Траектория перемещения частицы в смешиваемой абразивной массе определяется вектором движущей силы, направление и величина которого зависит от центробежной силы и силы тяжести. При прочих равных условиях частица с большей массой будет быстрее перемещаться к периферии смесителя, вытесняя частицы

с меньшей массой. Поэтому более тяжелые компоненты абразивной массы будут группироваться на периферии смешиваемого объема, а более легкие – ближе к центру циркуляции. При достаточно большом времени смешивания будет отчетливо проявляться послойное распределение компонентов в зависимости от их размеров и плотности. Поэтому продолжительность смешивания многокомпонентных смесей – скорее негативный фактор, чем позитивный.

Безусловно, время смешивания отражается на себестоимости производства абразивного инструмента. Поэтому наблюдается тенденция на ускорение этой процедуры, например, за счет применения высокоскоростных мешалок планетарного типа. В этом случае сокращение времени смешивания вступает в противоречие с его качеством, так как при приготовлении многокомпонентных высокопористых масс большие центробежные силы приведут к их быстрому расслоению по плотности.

Готовая формовочная масса обязательно проверяется на формовочные свойства вручную: масса должна быть рыхлой и сыпучей, а при сжатии ее в руке должна уплотняться и сохранять приданную ей форму при разжатии руки.

В массе не должно быть комков и местных уплотнений, она должна иметь равномерную окраску как на поверхности, так и в толще. Если в массе имеются включения неразмешанных компонентов, смешивание необходимо продолжать. При слишком сухой формовочной массе необходимо добавить в нее воду. Общее количество вводимой в массу воды зависит от зернистости шлифовального материала, количества связки и порообразователей. Практика показала, что при введении фруктовых косточек и силикатных микросфер воды приходится добавлять больше, чем при введении корундовых микросфер. При получении слишком влажной формовочной массы надо просушить ее на воздухе в течение 1...2 ч, затем протереть через сито.

Просеивание абразивной массы. Формовочную массу просеивают через сетки:

- смесь зернистости 40 через сетку № 2,5–0,5;
- смесь зернистости 25...16 через сетку № 1,2–0,32... № 2–0,4;
- смесь зернистости 10...12 через сетку № 0,5–0,2... № 1,2–0,32.

Готовую формовочную смесь можно хранить не более 8 часов, при этом она должна быть плотно накрыта влажной тряпкой.

Контроль качества приготовления массы необходимо производить в течение всего технологического цикла. Это необходимо для предотвращения брака, выявляемого иногда лишь на окончательных операциях механической обработки. Особое внимание следует обращать на химический состав исходного сырья, точность дозирования, отсутствие загрязнений и тщательность соблюдения технологических режимов смешивания.

Прессование заготовки шлифовального круга. Прессование или формование абразивной массы в заготовку шлифовального круга заданного типоразмера включает следующие операции: дозирование формовочной массы, засыпку и выравнивание формовочной смеси, прессование, извлечение изделий, укладку на плиты для сушки.

Пресс должен быть оснащен механическим дозатором абразивной смеси (обычно применяется транспортер ленточного типа). Дозирование массы может также производиться либо на автоматических весах с последующей укладкой массы в пресс-форму, либо объемным методом одновременно с укладкой. Первый способ обеспечивает большую точность, второй – более производителен. Допускаемое отклонение навески для высокопористых кругов – не более $\pm 0,5\%$.

Большое значение для получения шлифовальных кругов с равномерной плотностью имеет тщательная укладка массы в пресс-форму. Наиболее равномерное распределение плотности достигается при применении послойной укладки массы и ее выравнивании при вращении (рис. 4.4).

Прессованием получают заготовки кругов, близкие по форме и размерам к готовому изделию с равномерной плотностью по всему объему. При прессовании предусматривают припуски на механическую обработку после обжига.

Прессование абразивного круга производится двумя способами: до заданного объема или "по давлению". При формовании круга до заданного объема прессование ведут "до упора", т.е. до соприкосновения плунжера прессы с торцом кольца пресс-формы. Необходимая высота формируемого изделия получается подбором подкладочных колец. При этом способе формования абразивную массу необходимо изготавливать с большой точностью, иначе круг при заданной высоте не будет иметь нужной плотности. Изменение



Рис. 4.4. Тележка с вращающейся пресс-формой $\varnothing 500$ мм для пресса с усилием 500 т

плотности влечет за собой изменение твердости и структуры заформованного круга. Для устранения влияния высоты круга на его твердость, необходимо подбирать подкладочные кольца с отклонением от заданной высоты не более чем на 0,5 мм.

Этого недостатка лишена схема прессования "по давлению". В этом случае заранее опытным путем определяют давление, при котором обеспечивается заданная высота, а, следовательно, и плотность круга. По известному давлению определяют силу прессования. При прессовании на гидравлических прессах, снабженных устройствами для регулирования силы, процесс прессования прекращают по достижении ранее рассчитанной силы. Высота круга должна соответствовать расчетной.

Для получения абразивных кругов однородной плотности, прессование сле-

дует производить с двух сторон. Двустороннее прессование осуществляется последовательно. Сначала при низком давлении для постепенного удаления воздуха во избежание расслоения круга. Затем дают выдержку 2...3 с, после удаления прокладок продолжают прессование при более высоком давлении для получения равномерно спрессованного абразивного круга. Скорость прессования составляет 0,3...3 см/с.

Для повышения равномерности плотности в объеме инструмента при формировании круга по давлению применяют гидроплиту. Под действием гидроплиты давление пресса распределяется равномерно. На поверхности заготовки остаются все неровности, связанные с неоднородной плотностью распределения массы в процессе ее укладки, которые затем удаляют при механической обработке.

Извлечение заготовки из пресс-формы производится с помощью гидравлического выталкивателя. Круги диаметром до 200 мм переносятся на сушильную плиту обычно вручную. Круги диаметром более 200 мм целесообразно переносить на сушильную плиту только с помощью пневматического захвата, вакуум-съемника или другого приспособления, применяемого в производстве для этой цели.

Рабочее место прессовщика оснащается механическим устройством для обтачивания отформованного изделия на вращающейся плите в заданный типоразмер шлифовального круга, если он отличается от типоразмера пресс-формы.

После формования для обеспечения равномерного распределения влаги в кругах изделия выдерживают на воздухе в течение 12...48 ч.

Сушка и высокотемпературный обжиг. Прочность круга значительно увеличивается после термической обработки в результате физических, химических и структурных изменений, происходящих при нагреве. Процесс термической обработки производится в два этапа: сушка и

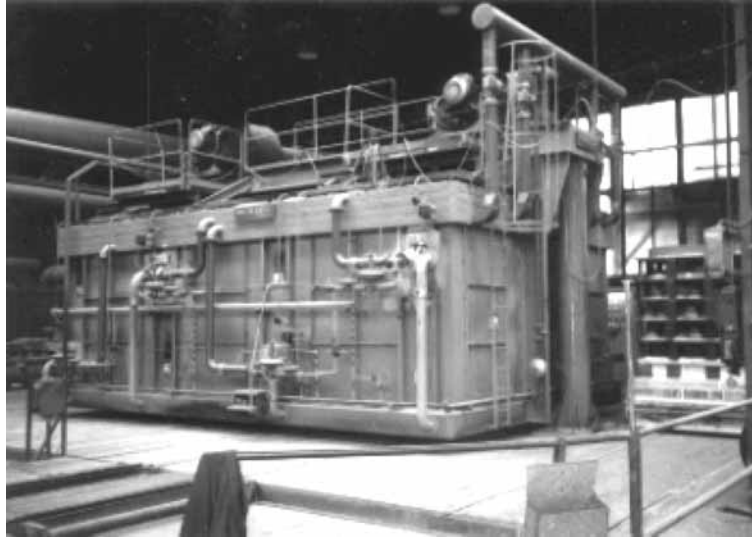


Рис. 4.5. Печь "Биклей" с рабочим объемом 40 м³

обжиг. Во время сушки удаляется несвязанная вода, и изделие приобретает прочность, достаточную для укладки на вагонетки, на которых производится обжиг кругов. Обжиг придает изделию окончательные физико-механические свойства.

Перед загрузкой в печь шлифовальные круги комплектуют пакетами (стопками) по 2–3 и более круга, укладывая их друг на друга. Для высокопористых кругов такая укладка не допустима. Обусловлено это возможным воздействием дополнительной массы на увеличение усадки высокопористого инструмента при его термической обработке и, как следствие, его механического разрушения.

Сушка происходит в сушильных шкафах камерного или туннельного типа. Шлифовальные круги нагревают до температуры 90...120 °С и выдерживают при этой температуре. Время сушки зависит от размера круга и составляет 2...30 ч (для кругов диаметром 100...1100 мм). После сушки круги охлаждают в шкафу до температуры 60...70 °С, а затем на воздухе до комнатной температуры. При сушке в сушильных шкафах для предотвращения растрескивания круга скорость подъема температуры должна быть не

более 30 °С/ч. Влажность высушенных заготовок должна быть не более 0,7 %.

Контроль качества кругов после сушки производится внешним осмотром или соответствующими приборами. При контроле отбраковываются изделия повышенной влажности, с трещинами, сколами и др. Если круги при простукивании издают глухой звук, их сушат вторично.

На абразивных заводах, как правило, продукция проходит в основном через туннельные печи, которые обеспечивают непрерывный и стабильный обжиг по принятой схеме нагрев–охлаждение. Цикл обжига в зависимости от длины печи и температурного режима может занимать от 2 до 5 дней.

Камерные печи работают по предельным циклам с регулированием заданного температурного режима в зависимости от материала абразива, типа и марки связки и т.д. (рис. 4.5).

Обжиг абразивных кругов является операцией, завершающей процесс образования прочного абразивного круга с равномерно распределенными по всему объему и прочно удерживаемыми зернами абразива. Обжиг производится в пламенных туннельных или электрических щеле-

вых печах при температуре 1250...1350 °С по специальным циклам нагрев–выдержка–охлаждение, которая зависит от типа используемой связки.

Для обеспечения повышенного качества высокопористых кругов необходимо использовать электрические печи, так как они обеспечивают высокую точность поддержания теплового режима.

Правильный подбор цикла термообработки является гарантией получения инструмента высокого качества, так как на стадии обжига появляется наибольшее количество его брака. Отклонение от температуры и изменение времени выдержки при обжиге ведет к изменению твердости круга (до 1...3 степеней). Тщательный пооперационный контроль обжига может существенно снизить количество брака из-за несоответствия твердости.

При изготовлении крупногабаритного инструмента, особенно высокопористого, требования к каждой из технологических операций ужесточаются. Это связано с необходимостью обеспечить высокую однородность по объему абразивной массы и равномерность ее прогрева при термической обработке.

В этой связи интересен опыт ведущих зарубежных фирм по производству абразивного инструмента. Дозирование всех компонентов абразивной массы производится с точностью до 1 г независимо от объема навески. Хорошее качество прессования гарантируют специализированные прессы фирмы Automated Equipment Ltd (Канада), которые обеспечивают высокую однородность абразивной массы в объеме инструмента за счет ее послойного нанесения в пресс-форму и двойной подпрессовки. Качественное изготовление абразивного инструмента обеспечивают также прессы фирмы Rypdyckerhoss Lubek (Германия).

Для высокотемпературного обжига высокопористого крупногабаритного инструмента используются камерные печи периодического действия с рабочим объемом 10 м³ указанной выше канадской

фирмы или германской фирмы Rieo-hammer. Эти печи гарантируют колебание температуры в рабочем пространстве печи $\pm 5^\circ$, в то время как отечественные печи обеспечивают разброс температуры не менее $\pm (20...30)^\circ\text{C}$.

Однако несмотря на жесткое соблюдение технологической дисциплины, шлифовальные круги зарубежных фирм так же, как и отечественные, не всегда отличаются стабильностью своих эксплуатационных свойств, а для высокопористых кругов процесс их изготовления к тому же сопровождается большим процентом брака из-за разрушения на стадиях формования и термической обработки.

Механическая обработка шлифовального круга. После термической обработки абразивные круги механически обрабатывают по торцам, отверстию и наружному диаметру для обеспечения заданной точности, формы и размеров. В некоторых случаях механическую обработку шлифовальных кругов, особенно крупногабаритных, осуществляют после формования заготовки (рис. 4.6).

Полностью исключить операцию механической обработки из технологического процесса до настоящего времени не удалось. Это связано с тем, что при изготовлении абразивного инструмента факторы, влияющие на геометрические размеры, носят случайный характер, обусловленный производством абразивного инструмента. Их численная оценка затруднена. К таким факторам относятся: точность взвешивания компонентов формовочной массы, качество их смешивания, качество протирки формовочной массы, процесс обжига кругов, толщина оплавленного слоя поверхности круга после обжига и др.

Во время операции обжига происходят сложные физико-химические процессы, которые связаны с изменением структурно-фазового состава и агрегатного состояния связки и других компонентов круга. Это ведет к тому, что происходит



Рис. 4.6. Предварительное обтачивание заформованной заготовки шлифовального круга

деформация (усадка) абразивного инструмента, величину которой можно прогнозировать с некоторой погрешностью.

Припуск, назначаемый на механическую обработку кругов, зависит от толщины оплавленного слоя и деформации абразивного инструмента.

В общем виде суммарный наименьший припуск на наружный диаметр абразивного круга можно представить в следующем виде:

$$Z_D^{\text{нм}} = \Pi + \Phi + t + Y + \varepsilon_D^{\text{нм}}, \quad (4.1)$$

где Π – суммарная погрешность относительного положения поверхностей круга после прессования и термической обработки; Φ – суммарная погрешность формы круга после прессования и термической обработки; t – суммарная толщина дефектного слоя после термической обработки; Y – суммарная погрешность установки круга при обработке наружного диаметра; $\varepsilon_D^{\text{нм}}$ – наименьшая теоретическая деформация по наружному диаметру.

Из формулы (4.1) следует, что для обеспечения наименьшего припуска необ-

ходимо, чтобы наименьшая деформация по наружному диаметру стремилась к нулю:

$$\varepsilon_D^{\text{нм}} \rightarrow 0, \quad (4.2)$$

но минимальное значение $\varepsilon_D^{\text{нм}}$ ограничено технологическими возможностями.

Наибольший суммарный припуск на наружный диаметр можно представить в виде

$$Z_D^{\text{нб}} = T_{\text{мп}} + Z_D^{\text{нм}} + T_0 + \varepsilon_D^{\text{нб}}, \quad (4.3)$$

где $T_{\text{мп}}$ – допуск на механообработку и прессование, T_0 – допуск на абразивный круг, $\varepsilon_D^{\text{нб}}$ – наибольшая теоретическая деформация.

Для обеспечения минимальной себестоимости изготовления абразивного круга необходимо, чтобы величина $\varepsilon_D^{\text{нб}}$ стремилась к $\varepsilon_D^{\text{нм}}$:

$$\varepsilon_D^{\text{нб}} \rightarrow \varepsilon_D^{\text{нм}}. \quad (4.4)$$

На практике необходимо, чтобы выполнялось условие:

$$\varepsilon_{\Phi}^{\text{нб}} < \varepsilon_{\Gamma}^{\text{нб}}. \quad (4.5)$$



Рис. 4.7. Механическая обработка периферии круга двумя конусами одновременно

Если фактическая деформация превысит теоретическое значение, то получим неисправимый брак из-за необеспечения заданной точности наружного диаметра шлифовального круга.

По аналогичным формулам рассчитывается припуск на отверстие и высоту абразивного круга.

В формулах (4.1) и (4.3) при назначении припуска первоначально неизвестно значение деформации. Величина деформации при спекании определяется экспериментальным методом для каждого конкретного случая, так как она зависит от многих факторов, характеризующих как состав круга, так и технологический процесс изготовления шлифовальных кругов.

Шлифовальные круги обрабатывают на токарных, плоскошлифовальных, торцешлифовальных, сверлильных и других станках с применением несвязанного чугунного и абразивного зерна, конических резцов из инструментальной стали, шлифовальных крупнозернистых абразивных кругов и алмазных инструментов (рис. 4.7).

Для обеспечения высокой точности посадочного отверстия применяют калибровку специальной быстротвердеющей массой, при этом получают высокую точность посадочного отверстия.

Значение припуска на механическую обработку устанавливается в зависимости от толщины оплавленного слоя на поверхности круга и с учетом усадки круга после обжига. Чем больше припуск, снимаемый с круга, тем, соответственно, больше экономические потери вследствие дополнительных затрат на абразивный материал, порообразователь, связку и т.д. Особо эти потери заметны при изготовлении шлифовальных кругов больших диаметров.

Экономически целесообразные припуски на наружный диаметр, высоту и диаметр посадочного отверстия при пресовании, обеспечивающие изготовление высокопористых кругов закрытой структуры с требуемой пористостью, заданной геометрической формой и размерами по классу точности АА, представлены в табл. 4.2–4.4.

4.2. Рекомендуемые припуски на наружный диаметр высокопористого круга закрытой структуры

Наружный диаметр D , мм	Предельные отклонения для класса точности АА	Номер структуры	Припуск, мм
50...80	$\pm 1,0$	10...14	0,3...0,4
		14...16	0,4...0,5
		16...20	0,5...0,7
		20...24	0,7...0,9
80...180	$\pm 1,2$	10...14	0,5...0,7
		14...16	0,7...0,9
		16...20	0,9...1,4
		20...24	1,4...2,0
180...260	$\pm 1,5$	10...14	0,9...1,2
		14...16	1,2...1,5
		16...20	1,5...1,9
		20...24	1,9...2,5
260...500	$\pm 2,0$	10...14	2,0...2,5
		14...16	2,5...2,9
		16...20	2,9...3,6
		20...24	3,6...4,5

4.3. Рекомендуемые припуски на высоту высокопористого круга закрытой структуры

Высота H , мм	Предельные отклонения для класса точности АА	Номер структуры	Припуск, мм
6...10	$\pm 0,2$	10...14	0,03...0,05
		14...16	0,05...0,07
		16...20	0,07...0,09
		20...24	0,09...0,12
10...16	$\pm 0,2$	10...14	0,07...0,10
		14...16	0,10...0,14
		16...20	0,14...0,18
		20...24	0,18...0,23

Продолжение табл. 4.3

Высота H , мм	Предельные отклонения для класса точности АА	Номер структуры	Припуск, мм
16...40	$\pm 0,2$	10...14	0,14...0,19
		14...16	0,19...0,23
		16...20	0,23...0,28
		20...24	0,28...0,34
40...100	$\pm 0,25$	10...14	0,28...0,35
		14...16	0,35...0,6
		16...20	0,6...0,9
		20...24	0,9...1,5

**4.4. Рекомендуемые припуски на диаметр посадочного отверстия
высокопористого круга закрытой структуры**

Диаметр посадочного отверстия d , мм	Предельные отклонения для класса точности АА	Номер структуры	Припуск, мм
18...50	$+ 0,1$	10...14	0,02...0,03
		14...16	0,03...0,05
		16...20	0,05...0,08
		20...24	0,08...0,11
50...80	$+ 0,2$	10...14	0,05...0,09
		14...16	0,09...0,13
		16...20	0,13...0,18
		20...24	0,18...0,23
80...120	$+ 0,2$	10...14	0,14...0,18
		14...16	0,18...0,23
		16...20	0,23...0,29
		20...24	0,29...0,34
120...180	$+0,2$	10...14	0,23...0,28
		14...16	0,28...0,34
		16...20	0,34...0,40
		20...24	0,40...0,45

Все типоразмеры шлифовальных кругов хорошо известны и в подавляющем большинстве стандартизованы. По своей конфигурации, точности формы, взаимного расположения и размеров поверхностей они не представляют технологических трудностей для механической обработки. Возможные способы обработки поверхностей шлифовальных кругов описаны, например, в работе [55].

При изготовлении инструмента нормальной структуры механической обработке обычно подвергаются круги диаметром от 80...100 мм. У высокопористых кругов больше усадка при обжиге, поэтому необходимость механической обработки возникает уже при изготовлении шлифовальных кругов диаметром 40 мм и более. Для этого класса абразивного инструмента необходимо предусматривать большие припуски на рабочие поверхности, чем для кругов нормальной структуры. Припуски и трудоемкость механообработки возрастают с увеличением номера структуры и зернистости кругов.

При механической обработке шлифовальных кругов в настоящее время наметилась тенденция перехода от технологического принципа дифференциации операций к принципу их концентрации или их совмещения за один-два установка заготовки.

Ранее за каждый отдельный установ заготовки последовательно на разных станках обрабатывались торцы, наружный и внутренний диаметры, выточки и т.д. Теперь современное оборудование позволяет по программе обработать все поверхности шлифовального круга с одной переустановкой. Например, на станке токарно-револьверного типа с многоинструментальной головкой обеспечивается не только высокопроизводительная обработка всех поверхностей кругов с наружными диаметрами от 80 до 400 мм, но и высокая точность формы, размеров и, что наиболее важно, относительного расположения поверхностей. Обработка на этом станке ведется резцами с алмазными вставками.

Механическая обработка в производстве шлифовальных кругов – достаточно трудоемкая и ответственная операция. Являясь завершающим этапом в технологическом цикле изготовления абразивного инструмента, она определяет конечный выход готовой продукции, ее качество, точность и товарный вид.

Шлифовальный круг – это, в общем то, простое тело вращения, обеспечить точность которого по классам точности А или АА с технологической точки зрения несложно. Необходимо только правильно построить маршрут обработки, придерживаясь принципа единства баз, и на станке повышенной жесткости назначить рациональные условия резания, обеспечивающие минимальный расход инструмента и его отжатие в пределах допуска на обрабатываемый размер.

Условия резания должны варьироваться в зависимости от характеристики круга (прежде всего, материала и зернистости абразива, твердости) и его размеров, от которых зависит путь резания и соответственно размерный износ инструмента.

При механической обработке шлифовальных кругов проявляются общие закономерности теории резания: связь стойкости инструмента с параметрами режима обработки, формирование случайных и систематических погрешностей от жесткости технологической системы станок–инструмент–круг, нестабильности свойств режущего и обрабатываемого материалов, температурных деформаций и т.д. Имеется аналогия между закономерностями и особенностями обработки резанием лезвийным инструментом абразивных кругов и их профилирования и правки алмазными карандашами.

Вместе с тем, необходимо отметить, что систематизированные и научно-обоснованные рекомендации по механической обработке шлифовальных кругов с учетом их возможных характеристик в литературе отсутствуют.

Особенности изготовления специального инструмента. К специальному инструменту можно отнести, например, составные шлифовальные круги и круги на основе микрокристаллического корунда, изготовленного по золь-гелиевой (SG) технологии.

Составные круги. Составные или сборные круги представляют собой два прочно соединенных между собой кольца.

Составные шлифовальные круги изготавливают с использованием дорогостоящих абразивных материалов (кубический нитрид бора, микрокристаллический корунд SG и др.), а также с упрочнением внутреннего отверстия кругов с высокой рабочей скоростью. Такой круг состоит из внешнего рабочего слоя высотой обычно 0,25...0,35 радиуса круга и внутреннего (или упрочняющего) кольца. Рабочий слой формируется в соответствии с заданной технической характеристикой на шлифовальный круг. Функциональное назначение внутреннего кольца состоит в прочном скреплении с рабочим слоем круга и, при необходимости, в повышении прочности зоны вокруг отверстия, откуда обычно начинается разрушение инструмента при действии центробежных сил.

Из-за разности составов абразивной массы физико-механические и теплофизические свойства внутреннего и внешнего колец круга отличаются друг от друга. Деформация внутреннего отверстия внешнего рабочего слоя и наружного диаметра внутреннего кольца при высокотемпературном обжиге направлена в разные стороны. Учитывая, что коэффициенты линейного расширения этих двух частей шлифовального круга также отличаются, то имеется большая вероятность их расслоения по поверхности стыка. Чтобы избежать этого, необходимо рецептурный состав абразивной массы внутреннего кольца разрабатывать с учетом его минимально возможной деформации при обжиге. Для чего рекомендуется уменьшить размеры абразивных зерен, номер структуры и увеличить содержание связки. Эти

рекомендации помимо уменьшения деформации способствуют также повышению прочностных свойств шлифовального круга.

Рассмотрим в качестве примера технологию изготовления составного высокопористого круга прямого профиля размером 600×50×203, у которого рабочий слой имеет характеристику 25A 16 CM1 12 K. В пресс-форму диаметром 607 мм с отверстием диаметром 200 мм устанавливается кольцо диаметром 350 мм и толщиной 3 мм с базированием относительно отверстия с помощью диска-заглушки Ø 607×200 мм.

Во внутреннее кольцо засыпается абразивная масса, разрыхляется и выравнивается. Рецептурный состав абразивной массы соответствует характеристике 25A 10 C2 8 K. В ней, так же, как и в рабочем слое, содержатся корундовые микросферы. После удаления диска-заглушки абразивная масса засыпается в наружное кольцо шлифовального круга, затем разрыхляется и выравнивается.

Формование производится "по давлению", причем необходимое усилие составляет на 19,2 % больше, чем при пресовании сплошного высокопористого круга с аналогичной характеристикой с 12-й структурой.

Из-за разности плотностей формируемых абразивных масс, равных 2,49 г/см³ во внутреннем кольце и 2,28 г/см³ в наружном кольце, после формования образуется разность высот круга с нарастанием высоты от отверстия к наружному диаметру в 1 мм.

Круги из микрокристаллического корунда. Микрокристаллический корунд как абразивный материал по своим режущим свойствам находится между кубическим нитридом бора и электрокорундом белым. По стоимости он на порядок выше, чем электрокорунд, но значительно дешевле эльбора.

В отличие от алмазных или эльборовых кругов инструмент на основе микро-

кристаллического корунда не всегда делают составным. Обычно круги изготовляют сплошными, но из-за высокой стоимости состав является композиционным. Выпускаются такие круги двух составов с соответствующей маркировкой: 1) с равными долями абразива из электрокорунда белого и микрокристаллического корунда (по 50 % от общего объема); 2) 70 % электрокорунда и 30 % микрокристаллического корунда. Например, для круга с 14-й структурой (34 % абразива в объеме круга) делается навеска из электрокорунда белого и микрокристаллического корунда по 17 % формуемого объема шлифовального круга, для второго варианта пропорция составляет соответственно 23,8 и 10,2 %.

Другой особенностью технологии производства кругов на основе микрокристаллического корунда является более низкая температура их обжига – 950 °С и использование специальных керамических связок.

При изготовлении шлифовальных кругов на основе микрокристаллического корунда больших размеров (обычно более 350...400 мм) экономичней применять составную конструкцию.

Дефекты изготовления высокопористых шлифовальных кругов. При изготовлении высокопористых шлифовальных кругов могут выявляться дефекты, присущие вообще абразивному инструменту. К ним можно отнести различие в твердости как в объеме одного и того же круга, так и в партии инструмента, изготовленного по одному рецепту. Такое различие в твердости достигает 1...2 степеней и более и может заметно сказаться при эксплуатации инструмента. Колебания по твердости трудно выявить при контроле пескоструйным методом и невозможно – при акустическом контроле.

Особенности технологии изготовления высокопористых абразивных кругов предопределяют и некоторые характерные дефекты качества. Например, в случае

попадания в абразивную массу более крупных фракций выгорающего порообразователя, в объеме круга могут сформироваться пустотелые камеры, которые на поверхности наблюдаются как раковины значительных размеров. При низкой прочности абразивного сырца круг может разрушиться при кантовании или транспортировке.

Трещины на периферийной и внутренней частях кругов возникают при нагреве и охлаждении из-за термических напряжений. Растягивающие напряжения, к которым наиболее чувствительны абразивные круги на керамической связке, на периферии круга возникают при охлаждении, а в центре – при нагреве. При образовании трещин на периферии изделий следует скорректировать режим охлаждения, в центре – режим нагрева. Сквозные диаметрально расположенные трещины объясняются несоответствием фактической скорости охлаждения заданной.

Характерной особенностью для высокопористых кругов с большой высотой 80...200 мм и со структурами более 12 является большая деформация при высокотемпературном обжиге, усугубляемая деформацией от собственной массы инструмента. В результате круг после обжига выглядит как усеченная пирамида с увеличением диаметра ее основания до 20 %.

После прессования и особенно после обжига высокопористых кругов с мелким зерном (менее 10...12) и большой твердостью (более СМ2) на их поверхности могут наблюдаться отдельные трещины или сетка трещин, начинающихся от отверстия.

Три четверти всего брака в производстве абразивного инструмента происходит в процессе его термической обработки. Самые распространенные виды брака и его причины указаны в табл. 4.5 [55].

При изготовлении высокопористого абразивного инструмента сложного состава, который используется, например для

4.5. Виды и причины брака абразивных изделий на керамической связке

Вид брака	Причина брака
Трещины, идущие от отверстия, и радиальные	Превышение скорости нагрева
Трещины, идущие от периферии	Превышение скорости охлаждения
Рваные и мелкие трещины, находящиеся на расстоянии от отверстия	Нарушение режима сушки
Деформации и разрушение (рваные трещины по всему кругу)	Нарушение правил установки изделий, превышение температуры обжига (выдержки)
Черные пятна (зауглероженность)	Воздействие восстановительной среды
Сколы, трещины, изломы и т.п.	Небрежность в установке и транспортировании изделий

крупногабаритных кругов, обычно применяют многоступенчатые схемы нагрева и охлаждения при обжиге. Если температурный режим обжига таких кругов не соответствует оптимальному, то спекания круга не происходит, а на подложке остается сыпучий конгломерат из смеси зерна, связки и наполнителей.

Дополнительно к указанным в табл. 4.5 дефектам абразивного инструмента можно отнести визуально наблюдаемые остатки невыгоревших порообразователей, например, фруктовых косточек.

Контроль качества и упаковка – завершающие операции изготовления абразивных кругов. Качество кругов контролируется по следующим параметрам: точность геометрических форм и размеров, твердость, дисбаланс, прочность и др.

Качество высокопористых шлифовальных кругов контролируется теми же методами и средствами, что и кругов нормальных структур. Исключение составляют только величины некоторых параметров характеристики, которые различны в зависимости от номера структуры шлифовального круга. По ГОСТ 3060–86 значения допустимых неуравновешенных масс шлифовальных кругов регла-

ментированы классом неуравновешенности и принадлежностью к номеру структуры. Для кругов 9-й структуры и выше ее значения меньше, чем для инструмента до 8-й структуры.

Некоторые зарубежные фирмы уязвляют также твердость и разрывную прочность абразивного инструмента с его пористостью.

В соответствии с ГОСТ 2424–83 (в ред. 2005 г.) "Круги шлифовальные. Технические условия" приемочному контролю на наличие трещин должны подвергаться все шлифовальные круги. На соответствие размерам и их предельным отклонениям, заданным значениям твердости и классу неуравновешенности масс, а также по внешнему виду на повреждения кромок, наличие инородных включений и раковин круги проверяются выборочно. Объем контрольной выборки должен составлять 0,5 % от партии, но не менее 10 штук для кругов диаметром до 63 мм, увеличиваясь до 15 % от партии (также не менее 10 штук) для шлифовальных кругов диаметром свыше 250 мм.

Механическая прочность кругов с рабочей скоростью до 80 м/с должна контролироваться на объеме выборки 0,2 %

от партии, но не менее 10 штук для кругов диаметром до 200 мм с соответствующим возрастанием объема испытаний до 1,5 % от партии, но не менее 5 штук для кругов диаметром свыше 750 мм.

Испытания на механическую прочность шлифовальных кругов по ГОСТ 30513–97 "Инструмент абразивный и алмазный. Методы испытаний на безопасность" должны проводиться вращением на стендах моделей СИП-40, СИП-80, СИП-350 и др. Допускается применение других стендов, соответствующих требованиям ГОСТ 12.3.023 и ГОСТ 12.3.028.

Механическая прочность шлифовальных кругов по ГОСТ 12.3.028–82 (в ред. 2001 г.) "Процессы обработки абразивным и эльборовым инструментом. Требования безопасности" должны контролироваться при испытательной скорости, в 1,5 раза превышающей рабочую скорость для кругов на керамической и органической связках с диаметром > 150 м/с при шлифовании на скорости < 40 м/с, а также для кругов диаметром > 30 мм для рабочей скорости свыше 40 и до 80 м/с. Коэффициент запаса прочности понижается до 1,4 при испытании кругов с диаметром > 30 мм на рабочую скорость свыше 80 и до 120 м/с.

В отличие от приемочных испытаний на заводе-изготовителе каждый инструмент по ГОСТ 12.3.028–82 (в ред. 2001 г.) перед установкой на станок должен быть испытан потребителем при испытательной скорости. Перед началом работы шлифовальный круг должен быть подвергнут вращению вхолостую с рабочей скоростью в течение времени не менее 1 мин для кругов диаметром до 150 мм, 2 мин – для кругов диаметром свыше 150 до 400 мм и 5 мин – для кругов диаметром свыше 400 мм. Необходимое время вращения вхолостую для эльборовых кругов на органической и металлической связке составляет не менее 2 мин.

Маркировка кругов производится вручную или на маркировочных машинах. Упаковывают круги в деревянные или

бумажные коробки, пакеты с пересыпкой (или без нее) стружкой.

В современных условиях при наличии большого количества производителей абразивного инструмента, выпускающих однотипную продукцию, качество ее маркировки и упаковки приобретает не меньшее значение, чем потребительские свойства. К сожалению, эта составляющая технологического цикла изготовления шлифовальных кругов на отечественных заводах оставляет желать лучшего.

В качестве варианта улучшения, например, маркировки шлифовальных кругов можно рекомендовать специальные принтеры фирмы Image (Франция). Фирма предлагает две серии каплеструйных принтеров 8 моделей с размерами букв и цифр от 1,2 до 20 мм. Опыт их применения свидетельствует о том, что программное обеспечение позволяет быстро и легко перестраиваться на маркировку, содержащую любую информацию о шлифовальном круге.

Требования к маркировке шлифовальных кругов изложены в ГОСТ 2424–83 (в ред. 2005 г.), другие требования – в ГОСТ 27595–88 (в ред. 1990 г.) "Материалы шлифовальные и инструменты абразивные. Упаковка, маркировка, транспортирование и хранение".

4.2. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ И КРИТЕРИИ ИХ ОЦЕНКИ

Анализируя технологический процесс изготовления шлифовальных кругов, в том числе высокопористых, можно прийти к выводу, что к их технологическим свойствам относятся те свойства, которые проявляются в процессе производства абразивного инструмента и прямым образом влияют на качество готового продукта и эффективность изготовления. Эффективность изготовления шлифовальных кругов при этом подразумевает снижение всех затрат – энергетических и матери-

альных за счет уменьшения усилия формообразования, объемов механической обработки, доли бракованной продукции и т.д. В этой связи наиболее важными и значимыми для технологичности изготовления абразивного инструмента являются следующие свойства:

- плотность или удельный вес насыпной абразивной массы;
- сопротивление деформированию абразивной массы или усилие прессования;
- прочность сырца после прессования;
- деформация шлифовального круга на этапах формования, сушки и высокотемпературного обжига;
- потеря веса (массы) или степень выгорания абразивной массы;
- обрабатываемость резанием (шлифованием) или сопротивление формообразованию рабочих поверхностей инструмента при его механической обработке.

Все приведенные технологические свойства зависят в той или иной степени от рецептурного состава абразивной массы шлифовального круга.

Плотность или удельный вес насыпной абразивной массы определяется ее рецептурным составом и влияет на смешивание и формование шлифовального круга.

При стабильном технологическом процессе изготовления высокопористых шлифовальных кругов с выдерживанием на всех его этапах необходимых требований по точности и качеству выполняемых операций (точность дозирования, порядок и время смешивания, температура и время выдержки и т.д.), главным фактором технологичности изготовления абразивного инструмента становится рецептурный состав высокопористой абразивной массы. Именно ее состояние и реакция на внешнее воздействие проявляется через технологические свойства.

Сопротивление деформированию абразивной массы или усилие прессования показывает, какое усилие потребуется при прессовании абразивной массы на заданный размер для соприкосновения плунжера пресса с торцом кольца пресс-формы. Очевидно, что оно зависит от свойств массы: чем плотнее масса, тем больше усилие нужно к ней приложить, чтобы сдвинуть до необходимой высоты. Кроме того, часто при прессовании до упора высокопористых кругов абразивная масса дополнительно "проседает" после окончания движения плунжера вниз. В литературе имеется мало информации о степени влияния компонентов абразивной массы на ее сопротивляемость деформированию при прессовании, поэтому в данной работе этот вопрос рассмотрен подробно.

Прочность сырца после прессования имеет особое значение при изготовлении кругов сложных форм и больших габаритов. Это связано с возможным браком (разрушением) при транспортировке сырца от участка прессования до сушильной установки.

В разделе 3.2 подробно описаны экспериментальные исследования влияния рецептурного состава высокопористой абразивной массы на механическую прочность круга. Так, для образцов с одинаковым номером структуры $N = 11$ увеличение связки с 7 до 9 % объема приводит к увеличению прочности сырца примерно в 2 раза в зависимости от марки керамической связки.

Также стоит отметить, что увеличение относительного содержания зерна в объеме круга (уменьшение номера структуры) приводит к повышению плотности абразивной массы и, соответственно, к повышению прочности сырца на изгиб. При увеличении доли зерна в объеме с 0,34 до 0,4 прочность на изгиб повышается от 1,7 до 4,5 раз в зависимости от состава керамической связки.

Таким образом, можно сделать вывод, что состав высокопористой абразив-

ной массы оказывает большое влияние на ее прочность после прессования.

Деформация шлифовального круга. О деформации на этапе формования упоминалось ранее. Она имеет место и на дальнейших этапах его изготовления. При сушке круга происходит его незначительная объемная деформация (усадка), за счет испарения воды, которая входит в состав абразивного круга. Значительно большая объемная деформация происходит с кругом во время высокотемпературного обжига. Под действием высоких температур выгорающие порообразователи и клеящие добавки практически полностью выгорают, а также выгорает часть связки (5...8 %). Газообразные продукты не только создают сквозные поры в теле инструмента, но и деформируют объем круга, образуя искажения его формы.

Склонность круга к деформированию на этапах формования, сушки и высокотемпературного обжига также зависит от состава круга. Чтобы уменьшить деформацию, а следовательно, повысить качество шлифовальных кругов и уменьшить объем механообработки на последнем этапе, необходимо найти наиболее оптимальный рецептурный состав абразивной массы.

Потерю массы или степень выгорания абразивной смеси можно оценить как разницу массы смеси до термической обработки с ее массой после термической обработки (сушки, обжига):

$$\Delta M = \frac{M_0 - M}{M_0},$$

где M_0 , M – масса абразивной смеси до и после обжига.

По существу, эта характеристика дает представление об экологичности изготовления абразивного инструмента, так как очевидно, что все летучие продукты выгорания попадают в атмосферу. Но, с другой стороны, процесс выгорания массы обусловлен формированием внутренних искусственных пор в объеме шлифовального круга, и этот процесс, безус-

ловно, влияет на технологичность изготовления шлифовальных кругов. В результате может происходить образование трещин и растрескивание инструмента в целом, меняется фактическая твердость, отличная от расчетной за счет разрушения мостиков связки, меняется удельный вес и происходит объемная деформация круга.

Обрабатываемость резанием (шлифованием) или сопротивление формообразованию рабочих поверхностей инструмента при его механической обработке. Процесс механической обработки шлифовального круга представляет собой достаточно сложный физический процесс. Сложность заключается в том, что сопротивление формообразованию зависит от многих факторов, которые носят вероятностный характер. Построить модель этого процесса, чтобы оценить количественно его закономерности, трудно. По этой причине до настоящего времени не предложены достоверные модели обрабатываемости абразивного инструмента резанием.

4.3. МЕТОДИКА И УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ СОСТАВА И СВОЙСТВ ВЫСОКОПОРИСТЫХ КРУГОВ

Несмотря на относительно большое количество публикаций, посвященных высокопористым шлифовальным кругам и описанных в главе 1, систематизированные сведения об их составах и соответствующем влиянии на эксплуатационные свойства в известной литературе отсутствуют. Необходимость в такой информации очевидна, так как без ясного представления о возможном диапазоне технологических и эксплуатационных свойств высокопористого инструмента трудно планировать их эффективное использование в процессах шлифования.

По аналогии со структурной моделью процесса резания, предложенной автором работы [80], процесс изготовления абразивного инструмента, и высокопорис-

тых шлифовальных кругов в том числе, можно представить в виде структурно-функциональной модели. Безусловно, что превращения, которые происходят с абразивной массой при ее смешивании, прессовании, обжиге и механической обработке, имеют сложную физико-химическую природу. Ее формализация в виде уравнений связи при современном уровне представлений о происходящих процессах даже в приближенном виде не представляется возможным. Остается только один путь – это статистическое стационарное моделирование в виде полиномов связи входных и выходных параметров изготовления абразивного инструмента.

К входным параметрам можно отнести определяющие, управляемые и возмущающие. Определяющие или обязательные параметры – это заданные требования к инструменту: его типоразмер, параметры точности и характеристика по материалу абразива, зернистости, твердости, номеру структуры, прочности. Требуемая характеристика инструмента обеспечивается управляемым подбором рецептурного состава и контролируемыми параметрами технологического процесса на всех этапах изготовления.

Превращение абразивной массы из сыпучего состояния в твердое тело можно условно характеризовать функциональными параметрами, с помощью которых оценивается состояние абразивного инструмента на различных этапах изготовления. Выбор таких параметров, к сожалению, невелик и к ним можно отнести, например, усилие прессования, деформацию (усадку) при формообразовании и высокотемпературном обжиге, его температурный режим.

Особенностью абразивного производства является чрезвычайно большое влияние возмущающих факторов на точность и качество готового инструмента. Чаще возмущения имеют случайную природу, так как обусловлены случайными колебаниями точности навески абразивной массы, характера ее смешивания,

температурного режима сушки и обжига, точности позиционирования заготовок и рабочих перемещений инструмента при прессовании и механической обработке и т.д. К этому можно добавить нестабильное качество компонентов рецептурного состава и множество других факторов, которые могут проявиться за время длительного (от недели до 2–3 месяцев) изготовления абразивного инструмента до момента его поставки потребителю.

Выходные параметры – это фактические параметры точности и качества готового инструмента по степени соответствия или приближения к заданным параметрам точности формы, взаимного расположения поверхностей и их размеров, характеристики инструмента (прежде всего твердости, ее стабильности в объеме и фактической структурности), а также неуровновешенности массы и разрывной скорости.

С фирмой Carborundum Electrite (Чехия) было выполнено совместное комплексное исследование технологических и эксплуатационных свойств высокопористых шлифовальных кругов различных составов. Были изготовлены абразивные круги прямого профиля с размерами 350×32×76 мм и с характеристиками: по материалу абразивного зерна – электрокорунд белый 25А (по обозначению фирмы Carborundum Electrite – 99ВА), нормальный 15А (96А) и хромтитанистый 92А (98А), карбид кремния зеленый 64С (49С) и черный 54С (48С), поликристаллический абразив типа SG; по зернистости от 10 (120) до 40 (46), по номеру структуры от 6 до 22. При изготовлении кругов использовались керамические связки трех типов, а для высокопористых кругов различный по составу, свойствам и в различных комбинациях порообразующий наполнитель: корундовые, силикатные и стеклянные микросферы, а также фруктовые косточки двух видов размером от 0,1 до 1,5 мм.

Технология в общепринятом смысле – это методы и процедура изменения

свойств, формы, размеров и т.п. некоторого исходного объекта (материала) в другой объект (материал) с новыми свойствами, формой, размерами и т.д.

В технологии изготовления высокопористого абразивного инструмента в отличие от общепринятой трактовки определяющим фактором становится состав абразивной массы, от оптимальности и экономичности которого зависят технологичность ее трансформации в шлифовальный круг.

Обычно достижение требуемой комбинации значений твердости и структуры при заданном материале абразива и его зернистости является решением многовариантной задачи подбора и оптимизации компонентов состава абразивной массы. Правильно подобранный ее состав становится гарантией эффективного изготовления высокопористого абразивного инструмента с требуемыми эксплуатационными характеристиками. Именно в составе высокопористой абразивной массы заключается эксклюзивность технологии изготовления высокопористых шлифовальных кругов.

Изучали 4 группы оригинальных рецептурных составов высокопористых кругов на основе электрокорунда белого – карбида кремния зеленого с выгорающими и невыгорающими порообразователями (табл. 4.6). Всего было изготовлено и протестировано на технологические и эксплуатационные свойства более 60 различных рецептурных составов, по три круга каждого рецепта.

Составы высокопористых шлифовальных кругов были разработаны таким образом, чтобы получить исчерпывающую информацию по всему технически целесообразному диапазону количественного содержания компонентов (см. табл. 4.6). Было изготовлено и испытано 4 группы инструмента одного типоразмера на основе электрокорунда белого и карбида кремния зеленого, состав которых подбирался таким образом, чтобы получить максимально широкий диапазон

их эксплуатационных свойств по зернистости, твердости, структуре и разрывной прочности. Первая группа – на основе электрокорунда белого с выгорающими и невыгорающими порообразователями, вторая – на основе электрокорунда только с невыгорающими порообразователями, третья – на основе карбида кремния зеленого с выгорающими и невыгорающими порообразователями и, наконец, четвертая группа кругов изготовлена на основе карбида кремния с невыгорающими порообразователями. Третья и четвертая группы составов являются аналогами первой и второй групп, но связка и количество вводимых компонентов разные.

Помимо рецептурных составов указанных 4 групп были составлены композиции и исследованы высокопористые круги одинаковой характеристики на основе электрокорунда белого и его модификаций: хромтитанистого, циркониевого, микрокристаллического корунда, а также карбида кремния зеленого и черного.

Комплексность проведенного исследования заключалась в том, что на одном и том же рецептурном составе абразивной массы при постоянном типоразмере инструмента оценивались технологические и эксплуатационные свойства высокопористых кругов и взаимосвязь между ними.

Выходными параметрами измерения и их последующего статистического анализа были:

- усилие прессования круга P , МПа;
- деформация инструмента при его изготовлении ε , %;
- плотность абразивной массы до обжига и после него γ , г/см³;
- потеря массы инструмента при термической обработке ΔM , %;
- твердость и ее стабильность в объеме инструмента;
- неуравновешенность массы m_D , г;
- разрывная скорость круга v_p , м/с.

Целью исследования было выявление технологических особенностей изготовления высокопористых кругов на основе

4.6. Состав исследованных высокопористых абразивных кругов по группам

Номер группы	Наименование группы инструмента	Марка абразива	Размер зерна, мм	Содержание абразивного зерна	Наименование и содержание порообразователя, объемные доли		Содержание связки и стеклянных микросфер
					выгорающего	невыгорающего	
1	Из электрокорунда белого с открытой структурой	96А, 98А, 99А, 99SA	0,1...0,4	0,18...0,42	Оливковые косточки 0,05...0,14	Силикатные микросферы 0,07...0,54	0,06...0,192
2	Из электрокорунд белого с закрытой структурой	99А	0,06...0,4	0,18...0,42	–	Корундовые микросферы 0,04...0,46	0,14...0,216
3	Из карбида кремния зеленого с открытой структурой	49С	0,1...0,4	0,22...0,42	Оливковые косточки 0,02...0,06	Силикатные микросферы 0,04...0,2	0,125...0,225
4	Из карбида кремния зеленого с закрытой структурой	49С	0,1...0,4	0,22...0,42	–	Корундовые микросферы 0,04...0,2	0,125...0,25

композиций выгорающих и невыгорающих порообразователей и технических возможностей инструмента.

В качестве связок использовались керамические связки, модифицированные для изготовления инструмента соответственно на основе электрокорунда и карбида кремния.

Размер заготовки, для которой рассчитывалась навеска, составлял $355 \times 36 \times 74$ мм. В процессе прессования в каждом случае фиксировалось давление пресса, а у шлифовального круга после прессования измерялась его высота.

После обжига проводилось измерение наружного и внутреннего диаметров (по три точки с двух сторон) и высоты круга. Масса шлифовального круга определялась на электронных весах с точностью до 0,01 кг. Деформация круга после обжига рассчитывалась как разница между его размерами после прессования и размерами после спекания.

Твердость кругов определялась двумя методами. До механической обработки на пескоструйном приборе твердость оценивалась методом Маккензена по глубине лунки при постоянном давлении 0,05 или 0,15 МПа в трех точках с двух сторон на торцах круга. После механической обработки круга проводился дополнительно акустический контроль твердости. С помощью приборов "Звук-202" и MKS "Industrial" фирмы Grindo Sonik измеряли частоту собственных колебаний круга и определяли соответствующую ей твердость по звуковому индексу.

Также после механической обработки у каждого круга измеряли величину статической неуравновешенности масс. При этом на установке AWW 16 фирмы Hofmann определяли наиболее тяжелое место в круге на расстоянии 175 мм от оси вращения.

Испытания шлифовальных кругов на механическую прочность проводились на установках TOS модели BZ60A Kurim ($0 \dots 6500$ мин⁻¹) и Hosivak ($0 \dots 15900$ мин⁻¹). В ходе испытаний фиксировалась макси-

мальная частота вращения шпинделя, при которой происходил разрыв круга. Для каждого круга рассчитывали окружную разрывную скорость. В табл. 4.7 и 4.8 приведен исследованный диапазон характеристик и свойств высокопористой абразивной массы и шлифовальных кругов.

При статистическом исследовании функциональных связей большое значение имеет концепция оптимального использования области варьирования условий эксперимента с целью построения математической модели. Анализ адекватности экспериментального моделирования показал, что точность моделирования существенным образом зависит от выбора условий проведения экспериментов, т.е. является функцией плана эксперимента.

При проведении исследований применялся в основном так называемый активный эксперимент, когда осуществляется целенаправленный выбор значений нескольких выходных параметров модели, равномерно распределенных в достаточно широком интервале изменения. По результатам активного эксперимента можно оценить дисперсию ошибки, строго проверить адекватность модели и принять необходимые меры для выполнения условий применения метода множественного регрессионного анализа.

В отдельных случаях, когда механизм действия того или иного отдельного параметра или фактора был неизвестен и его нельзя спрогнозировать, используется классический эксперимент. При этом характер проявления этого параметра (например, влияние зернистости абразива или размера порообразователя на неуравновешенность масс круга) определяется при последовательном его изменении и сохранении постоянства других статистически значимых параметров.

Чтобы понять механизм внутренних взаимосвязей и обеспечить качественный прогноз возможных значений параметров различного вида в рамках рассматриваемой структурно-функциональной модели, выявлялись необходимые связи и разраба-

4.7. Исследованный диапазон характеристик и свойств высокопористой абразивной массы и шлифовальных кругов, изготовленных на основе корундовых микросфер

Характеристика или свойства	Материал абразива	
	Электрокорунд	Карбид кремния
Марка абразива	99BA, 96A, 98A, 99SA	48C, 49C
Зернистость	6...40	10...40
Объемное содержание абразива, %	18...42	22...42
Номер структуры	10...22	10...20
Усилие формования, МПа	20...190	20...100
Плотность, г/см ³ :		
после формования	1,57...2,28	1,60...2,03
после обжига	1,51...2,20	1,62...1,87
Деформация, %:		
после формования по высоте круга	0...17,2	0...18,1
объемная после обжига, в т.ч.:	0,43...7,45	-0,69...9,21
по наружному диаметру	0,24...1,91	0,05...2,72
по высоте круга	0,11...4,11	-1,07...4,31
по отверстию	0...1,98	-1,40...0,50
Потеря массы после обжига круга, %	3,79...8,25	4,04...8,12
Твердость круга:		
по глубине лунки, мм	3,2...8,9	2,4...5,2
по частоте собственных колебаний, кГц	3,8...5,29	4,86...5,96
по звуковому индексу	37...51	47...59
Степень твердости	M1...C1	M2...C1
Неуравновешенность масс круга, г	3...28	2...16
Разрывная скорость круга, м/с	85,2...147,6	81,9...126,3

4.8. Исследованный диапазон характеристик и свойств высокопористой абразивной массы и шлифовальных кругов, изготовленных на основе силикатных микросфер и оливковых косточек

Характеристика или свойства	Материал абразива	
	Электрокорунд	Карбид кремния
Марка абразива	99ВА	48С, 49С
Зернистость	10...40	10...40
Объемное содержание абразива, %	18...42	22...42
Номер структуры	10...22	10...20
Усилие формования, МПа	20...200	20...180
Плотность, г/см ³ :		
после формования	1,61...2,13	1,64...1,97
после обжига	1,54...1,98	1,56...1,83
Деформация, %:		
после формования по высоте круга	0...19,4	0...12,8
объемная после обжига, в т.ч.:	0,3...25,29	2,07...12,41
по наружному диаметру	0...6,5	0,21...3,31
по высоте круга	0,37...14,16	1,20...5,94
по отверстию	0,02...8,36	0,27...1,42
Потеря массы после обжига круга, %	2,78...18,66	5,61...14,75
Твердость круга:		
по глубине лунки, мм	3,0...8,5	2,7...7,3
по частоте собственных колебаний, кГц	3,52...5,30	5,03...6,07
по звуковому индексу	35...53	49...59
Степень твердости	М1...С2	М2...С1
Неуравновешенность масс круга, г	2...48	2...18
Разрывная скорость круга, м/с	71,5...113,9	78,6...119,5

тывались соответствующие им математические модели. Приоритетными являются модели связи между рецептурным составом высокопористого инструмента и параметрами его характеристики и эксплуатационных свойств, а также влияния на технологичность изготовления. Знание указанных моделей связи даст возможность прямого управления технологическими и эксплуатационными свойствами инструмента путем регулирования его рецептурного состава.

В неявном виде проявляются связи между характеристикой абразивного инструмента с такими свойствами, как плотность, неуравновешенность масс, экологичность изготовления, условия прессования, деформация и др. Но их выявление и формализация необходимы для оптимизации технологии изготовления высокопористых шлифовальных кругов, так как абразивный инструмент традиционно идентифицируется своей стандартизированной характеристикой по материалу абразива, зернистости, твердости, номеру структуры, классом точности и разрывной скоростью, а не рецептурным составом.

Для более полного представления об исследуемой величине определялись ее математическое ожидание, среднеквадратичное отклонение σ (СКО) и коэффициент вариации как отношение среднеквадратичного отклонения к математическому ожиданию (ранее в тексте обозначается через КВ).

Компьютерная обработка статистических данных эксперимента выполнялась с помощью специальных программ многофакторного корреляционного и регрессионного анализов с использованием идей рандомизации и статистической интерпретации.

Через коэффициент парной корреляции исследовали связь между отдельными параметрами, а связи с выходным параметром совокупности исследуемых параметров – через коэффициент множественной корреляции (КМК).

Коэффициент корреляции характеризует степень тесноты линейной зависимости между случайными величинами. Если случайные величины X и Y связаны точной линейной функциональной зависимостью, то $R_{XY} = 1$. Чем ближе значение R_{XY} к единице, тем ближе связь между случайными величинами к функциональной зависимости.

В последующем статистическом анализе экспериментальных данных корреляционному анализу уделено большое внимание. По величине и знаку коэффициентов парной корреляции выявлялись и оценивались возможные связи между параметрами структурно-функциональной модели изготовления высокопористого инструмента. При положительной корреляции, т.е. при $R_{XY} > 0$, действия исследуемых параметров однонаправлены, при $R_{XY} < 0$ их действие носит разнонаправленный характер [8].

Методами регрессионного анализа были исследованы формы связи между выходными параметрами инструмента и изучаемыми, как правило, в виде уравнений множественной регрессии – линейных или нелинейных логарифмических полиномов. Последние были получены для моделирования сложных по характеру влияния процессов формирования свойств инструмента.

Точность разрабатываемых моделей или их адекватность экспериментальным данным проверялась по коэффициенту множественной корреляции, F-критерию Фишера (F-отношение) и остаточной дисперсии (ОД).

Полезность коэффициента множественной корреляции не ограничивается только функцией критерия адекватности модели. По его значению, а также по разности $1 - R^2$ можно судить о степени влияния неучтенных факторов в предлагаемой статистической модели.

Принятая методология учитывает стохастический характер получаемых результатов эксперимента и основывается на статистической проверке гипотез.

В отношении приводимых выводов необходимо иметь в виду следующее обстоятельство: положительные результаты проверки некоторой статистической гипотезы означают лишь то, что постулируемая гипотеза не противоречит результатам эксперимента.

Корреляционный и регрессионный анализы являются удобными методами для выявления тесноты и характера связей между выходными и входными параметрами с их моделированием в виде математических зависимостей различного типа. В то же время практика их применения свидетельствует о необходимости осторожного обращения с массивом экспериментальных данных.

Обычно, чем больше включается в разработку математических моделей исследуемых параметров, тем выше уровень адекватности расчетных данных экспериментальным по статистическим характеристикам качества получаемых моделей. Это естественно, так как в статистический анализ вовлекается большее число действующих параметров. Но точность расчета выходного параметра при большом количестве рассматриваемых параметров снижается, и тем больше, чем больше их число.

Природа этой недостоверности кроется в том, что при введении в анализ все большего числа параметров возрастает количество тех, у которых пониженная статистическая значимость (по величине коэффициента парной корреляции). Также возрастает степень взаимозависимости между входными параметрами разрабатываемой модели, что неблагоприятно сказывается на точности расчета.

В случае моделирования, например, влияния рецептурного состава высокопористой абразивной массы на ее технологические свойства и эксплуатационные характеристики шлифовального круга, вышеприведенные замечания можно иллюстрировать следующим. Если строго подходить к выбору исследуемых параметров состава, то необходимо оценивать

только основные параметры: материал абразива, его зернистость и содержание, а также содержание связки. Другие параметры состава: содержание различных порообразователей и связующих компонент в той или иной степени связаны с основными параметрами состава и не являются статически независимыми.

Описанная методология статистической обработки экспериментальных данных использована не только для анализа результатов исследований различных составов высокопористых кругов, но и для статистической обработки экспериментальных данных, полученных как при изготовлении инструмента, так и при его использовании в процессах шлифования.

4.4. УСИЛИЕ ПРЕССОВАНИЯ ВЫСОКОПОРИСТЫХ АБРАЗИВНЫХ КРУГОВ РАЗЛИЧНОГО СОСТАВА

Формообразование заготовки шлифовального круга происходит в процессе прессования абразивной массы на прессах. Усилием или давлением прессования называют эффективное усилие пресса $N_{эф}$, которое приходится на 1 см² площади формируемого изделия:

$$P = \frac{N_{эф}}{S},$$

где $N_{эф}$ связано с фактическим манометрическим давлением масла в гидросистеме пресса $P_{м.ф}$ и его номинальным давлением P_n пропорционально номинальному усилию пресса N_n :

$$N_{эф} = \frac{P_{м.ф}}{P_n} N_n.$$

Известно, что мелкодисперсные материалы могут вести себя как высокопластичные, если пустоты между твердыми частицами частично заполнены жидкостью. Их хорошая формируемость связана с капиллярным действием жидкости: поверхностным натяжением пленки жидкости, заключенной между твердыми частицами, и капиллярным снижением давле-

ния в капельках, связывающих твердые частицы, что внешне проявляется как сцепление.

По существу, жидкость, которая всегда присутствует в абразивных смесях, способствует не только прочному сцеплению компонентов, но и облегчает их формирование на заданную конфигурацию.

На усилие прессования влияет не только площадь формируемой поверхности изделия, но и объем деформируемой абразивной массы, время деформирования, размеры поверхностей трения в пресс-форме и степень деформации (по высоте от насыпной массы до запрессованного сырца). При прочих равных условиях, когда прессуются шлифовальные круги одинаковых размеров, но из различных по составу абразивных масс, давление является одной из характеристик технологичности исследуемого состава.

При прессовании происходит уплотнение абразивной массы в пресс-форме с перераспределением составляющих насыпного объема в расчетный (меньший) объем за счет уменьшения порового пространства до заданного. Очевидно, что усилие прессования поэтому зависит от состава абразивной массы и наличия свободного пространства в ее объеме или, другими словами, от ее плотности.

При одном и том же расчетном объеме формования, принятом в исследовании, усилие прессования напрямую зависит от состава и свойств абразивной массы. Сопротивление деформированию будет тем больше, чем больше в составе смеси абразива и меньше его зернистость. При уменьшении зернистости электрокорунда белого с 40 до 10 при его постоянном содержании в формируемой массе усилие прессования увеличилось в 5 раз. Размер вводимых оливковых косточек оказывает на усилие прессования аналогичное влияние: с увеличением среднего размера косточек с 0,15 до 1,25 мм усилие уменьшается на 25 %.

Микросферы всех видов оказывают на формуемость благоприятное влияние:

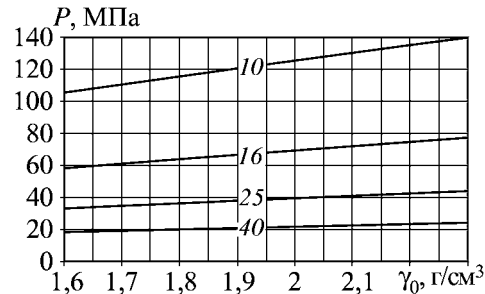


Рис. 4.8. Влияние плотности абразивной массы и ее зернистости на усилие формования круга

при их введении работа деформирования снижается. Связан этот эффект с облегчением процесса скольжения твердых и более тяжелых абразивных зерен с развитым макро- и микрорельефом поверхности с помощью легких сфер по объему деформируемого шлифовального круга.

Увлажненная керамическая связка также становится фактором снижения трения в формируемой абразивной массе.

Несмотря на то, что каждая из 4 исследованных групп высокопористого инструмента имеет свой состав и особенности строения, для всех групп была установлена общая закономерность изменения усилия прессования. Корреляционным и регрессионным анализами была выявлена зависимость усилия прессования от плотности абразивной массы γ_0 и ее зернистости A_3 в виде

$$P = 4,017 \gamma_0^{0,779} A_3^{-1,261}. \quad (4.6)$$

Плотность абразивной массы в формуле (4.6) выступает как обобщенный показатель ее состава, который в меньшей степени, чем размер абразива, но все же оказывает влияние на усилие деформирования. Модель (4.6) получена в результате статистической обработки экспериментальных данных при прессовании всех 4 групп высокопористого абразивного инструмента (рис. 4.8).

Исходная расчетная плотность абразивной массы при проектировании ее состава на заданную характеристику, как

правило, меньше в кругах на основе корундовых микросфер. Поэтому усилие прессования для них будет меньше, чем для кругов на основе силикатных микросфер и оливковых косточек. В свою очередь, сопротивление деформированию у инструмента на основе карбида кремния будет меньше, чем у электрокорундовых кругов, так как их плотность меньше, несмотря на то, что связки вводятся в 1,5 раза больше.

4.5. ДЕФОРМАЦИЯ ВЫСОКОПОРИСТЫХ ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ ПРИ ИХ ИЗГОТОВЛЕНИИ

В процессе изготовления шлифовальных кругов происходит изменение их формы и размеров, искажения которых исправляются механической обработкой. Для абразивного инструмента нормальных структур также искажения обычно незначительны, что дает возможность в некоторых случаях сдавать продукцию заказчику, минуя этап корректирующего формообразования резанием.

Особенностью изготовления высокопористого абразивного инструмента в отличие от кругов нормальной структуры является более существенное искажение формы и размеров, степень которого возрастает с увеличением номера структуры.

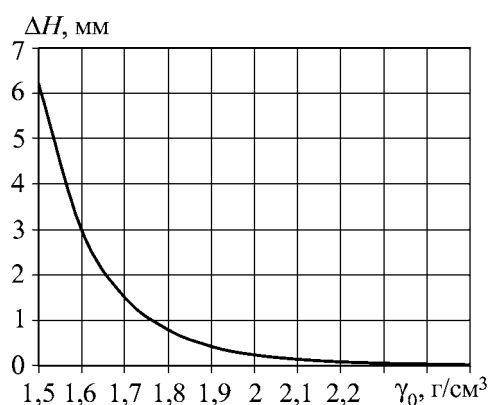


Рис. 4.9. Зависимость отклонения высоты круга при прессовании от плотности абразивной массы

Величина деформации высокопористых кругов также зависит от оптимальности выбранного состава.

Объемная структура высокопористых шлифовальных кругов формируется в два этапа: при прессовании и при высокотемпературном обжиге.

Размерная деформация при формировании кругов. Процесс прессования кругов — это, по существу, классический процесс его формообразования приданием формуемой абразивной массе заданной формы и размеров. Чтобы получить требуемые характеристики шлифовального круга, расчетная навеска абразивной массы должна строго соответствовать определенному ее объему, который обеспечивается формой и размерами пресс-формы.

В процессе формования круга может изменяться только один его размер — высота, остальные размеры фиксированы пресс-формой. Даже при постоянной настройке перемещения пуассона на один и тот же размер прессования высота круга, строго говоря, не остается постоянной. Связано это не со случайным характером вариации настроечного размера, а с инерционными свойствами высокопористой абразивной массы. При формовании 3 шлифовальных кругов 6-й структуры с исходной плотностью абразивной массы $\gamma_0 = 2,31 \text{ г/см}^3$ среднее уменьшение высоты круга H , например, составило $\Delta H = 0,13 \text{ мм}$. С повышением пористости и соответственно уменьшением плотности γ_0 деформация по изменению ΔH закономерно возрастает (рис. 4.9).

Отклонение высоты круга от расчетной в сторону уменьшения приводит соответственно к уменьшению фактического объема заготовки круга и, как следствие, пропорциональному увеличению плотности абразивной массы, относительного содержания зерен и связки в единице объема. Поэтому изменение высоты круга в процессе его формования можно рассматривать как возмущающий фактор, искажающий расчетные размеры заготов-

ки в результате ее дополнительной деформации.

При прессовании кругов с расчетными номерами структуры 12, 15, 18 и 22 отклонение от их расчетной высоты 36 мм составило соответственно 0,14; 1; 3,87 и 6,93 мм, что обеспечило незапланированную деформацию инструмента перед его сушкой и обжигом соответственно 0,39; 2,8; 10,7 и 19,3 %. Для сравнения: при прессовании круга 6-й структуры эта деформация была 0,36 % или в пределах точности измерения размеров с помощью штангенциркуля.

Механизм закономерного увеличения размера ΔH при уменьшении плотности формуемой массы может быть обусловлен тем, что под действием кинетической энергии, передаваемой пуансоном, масса продолжает уплотняться, вытесняя избыточный воздух из своего состава. Это можно подтвердить динамикой формования: усилие прессования кругов 6-й структуры составило 200 МПа, 12-й структуры – в 2,5 раза, а кругов 15...22-й структур – почти в 10 раз меньше.

Деформация круга при прессовании, которая искажает расчетный объем и соответственно его объемное строение, определяется через отношение:

$$\varepsilon_1 = \frac{H - H_1}{H} = \frac{\Delta H}{H}, \quad (4.7)$$

где H – расчетная высота заготовки инструмента, H_1 – ее значение после формования.

Величина ΔH зависит от сопротивления деформированию абразивной массы при формовании шлифовального круга. Так же, как и усилие прессования, значение ΔH коррелировано с исходной плотностью формуемой абразивной массы. Статистическим обобщением всех экспериментальных данных по ΔH для 4 исследованных групп абразивных смесей получена универсальная модель связи в виде

$$\ln \Delta H = 6,424 - 11,339 \ln \gamma_0 \quad (4.8)$$

с коэффициентом множественной корреляции, равным 0,853.

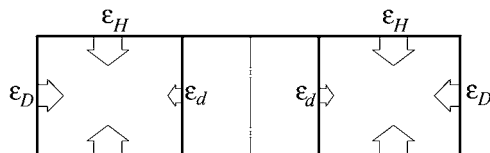


Рис. 4.10. Объемная контракция высокопористого круга на керамической связке после обжига

Используя расчетную модель (4.8), можно прогнозировать отклонение высоты формуемого круга от расчетного значения в зависимости от плотности абразивной массы, но, главное, появляется возможность предотвратить это отклонение за счет увеличения формуемой высоты круга на предполагаемую величину ΔH .

Деформация круга при обжиге. В процессе высокотемпературного обжига происходит изменение всех размеров шлифовального круга, как правило, в сторону их уменьшения, т.е. всестороннее сжатие или контракция.

По аналогии с (4.7) можно оценить деформацию ε_D по уменьшению наружного и ε_d – внутреннего диаметров инструмента и ε_H по дополнительному уменьшению при обжиге заформованной высоты круга.

Контракция высокопористых кругов при их остывании на заключительном этапе обжига является результатом затвердевания керамической связки и стягивания твердых компонентов состава к центральной части остывающей абразивной массы (рис. 4.10). Размеры стрелок показывают степень деформации по каждому направлению.

По мере охлаждения объема инструмента от наружной и внутренней поверхностей к центральной его части под действием внутренних напряжений происходит согласованное перемещение абразивных зерен – основы объемной конфигурации с формированием новой, искаженной объемной структуры из абразивных зерен, невыгоревших порообразователей и пор.

4.9. Размеры и деформация высокопористых кругов после прессования и обжига

Исследованные характеристики	Номер группы состава			
	1	2	3	4
<i>После прессования</i>				
Высота круга , мм	29...36	29,8...36	30,7...36,2	29,5...36,1
Деформация ε_H , %	0...19,44	0...17,22	-0,55...14,72	-0,28...18,05
<i>После обжига</i>				
Наружный диаметр D , мм	336,4...356,2	348,2...354,1	343,3...357,2	345...355
Деформация ε_D , %	-0,32...5,24	0,24...1,92	-0,66...3,3	-0,08...2,82
Высота круга , мм	25,1...36,0	28,8...36	29,1...35,4	29,1...35,8
Деформация ε_d , %	0...14,16	0...4,11	1,7...5,61	0,56...4,56
Диаметр отверстия d , мм	74,1...75,9	74,0...75,5	74,5...75,1	73...74,4
Деформация ε_d , %	0,13...2,57	0...1,99	0,07...1,49	-0,54...1,35
Деформация ε'_w , %	1,54...25,29	0,63...7,45	2,25...11,64	-0,69...8,85
Суммарная деформация после формирования и обжига ε_w , %	1,54...38,15	0,63...23,64	1,16...24,65	0,09...25,3

4.10. Модели связи объемной деформации шлифовального круга с деформацией по его размерам

Группа состава	Математические модели связи	Коэффициенты парной корреляции			Оценка адекватности модели		
		ε_D	ε_H	ε_d	КМК	ОД	F-отн.
1	$\ln \varepsilon_w = 0,711 + 0,111 \ln \varepsilon_D + 0,789 \ln \varepsilon_H + 0,110 \ln \varepsilon_d$	0,819	0,987	0,968	0,999	0,004	862,560
2	$\ln \varepsilon_w = 1,259 + 0,575 \ln \varepsilon_D + 0,297 \ln \varepsilon_H + 0,042 \ln \varepsilon_d$	0,905	0,931	0,495	0,994	0,018	131,876
3	$\ln \varepsilon_w = 0,884 + 0,312 \ln \varepsilon_D + 0,705 \ln \varepsilon_H + 0,019 \ln \varepsilon_d$	0,917	0,947	0,645	0,999	0,002	1004,51
4	$\ln \varepsilon_w = 1,111 + 0,365 \ln \varepsilon_D + 0,556 \ln \varepsilon_H + 0,024 \ln \varepsilon_d$	0,912	0,871	-0,147	0,998	0,006	351,667

В табл. 4.9 приведены размеры и результаты измерения деформации высокопористых кругов исследованных 4 групп по составу после формования и обжига.

Деформация шлифовальных кругов при обжиге и особенно их высокопористой разновидности является очень неприятным фактором изготовления абразивного инструмента. Помимо искажения его формы и размеров деформация часто приводит к формированию трещин. Если в первом случае негативное влияние деформации можно предусмотрительно учесть дополнительным припуском на механическую обработку круга, то во втором случае деформация приводит к неисправимому браку и соответственно – к излишним затратам времени и средств. Поэтому очень полезно установить ее причины и закономерности.

Объемная деформация высокопористых кругов при обжиге складывается как аддитивная величина из относительных деформаций круга по его основным размерам D , d и H . С погрешностью $\pm 15\%$ можно приближенно оценить ε_w как сумму ее составляющих:

$$\varepsilon_w = \varepsilon_D + \varepsilon_d + \varepsilon_H. \quad (4.9)$$

Более точная оценка объемной деформации высокопористых кругов в зависимости от их исследованного состава и относительных деформаций ε_D , ε_d , ε_H приведена в табл. 4.10.

В результате обобщения экспериментальных данных по удельным весам деформаций кругов различных составов по их размерам получена следующая пропорция:

$$\varepsilon_D : \varepsilon_d : \varepsilon_H = 1 : (1,5 \dots 3) : (4 \dots 6).$$

Обращает внимание, что наибольшее изменение объемной деформации при высокотемпературном обжиге круга происходит за счет уменьшения его высоты H , в меньшей степени – за счет уменьшения наружного D и внутреннего d диаметров. Таким образом, при изготовлении высокопористых кругов критическим раз-

мером является его высота, уменьшение которой с увеличением расчетного номера структуры может достигать 30 %. Эту особенность необходимо учитывать при назначении припусков на последующую механическую обработку высокопористого абразивного инструмента.

Условия формования высокопористых кругов коррелированы с плотностью формуемой абразивной массы. При их обжиге, напротив, большую роль в деформации инструмента играют компоненты абразивной массы.

Уже подчеркивалось, что устойчивость объемной структуры абразивного инструмента воздействию деформации определяется количеством твердых компонентов, находящихся в инструменте в момент отвердевания керамической связки. Чем их больше, тем меньше деформация шлифовального круга. Этим фактом объясняется практически отсутствие деформации абразивных кругов нормальных структур и ее увеличение при повышении номера структуры. Дополнительное введение в состав инструмента невыгорающих порообразователей позволяет уменьшить его объемную деформацию при обжиге. По степени влияния на деформацию инструмента содержания абразивных зерен и, например, корундовых микросфер, находятся примерно на одном уровне: коэффициенты парных корреляций связей $\varepsilon_w(V_3)$ и $\varepsilon_w(V_{мс})$ соответственно равны 0,970 и 0,917.

Прямой эксперимент показал, что при прочих равных условиях у кругов 12-й структуры из электрокорунда белого с увеличением только относительного содержания корундовых микросфер от 0 до 20 % деформация при обжиге резко снижается с 7,4 до 0,4 %.

Другие компоненты состава высокопористой абразивной массы также оказывают заметное влияние на деформацию инструмента при его обжиге.

Введение выгорающих оливковых косточек в состав круга увеличивает его деформацию и это объясняется высокой

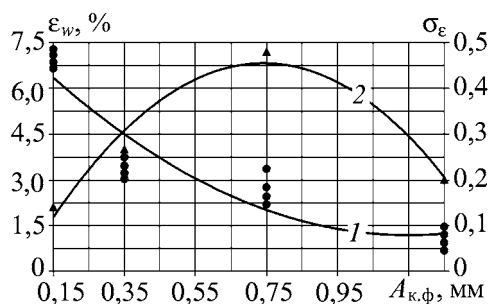


Рис. 4.11. Влияние размера оливковых косточек на деформацию при обжиге (1) и ее среднеквадратичное отклонение (2) для круга зернистостью 16 и структурой 12

степенью коррелированности между количеством косточек и объемной деформацией — до 0,879 в зависимости от состава абразивной массы. Например, увеличение объемного содержания оливковых косточек с размерами 0,2...0,5 мм с 6 до 12 % привело к соответствующему увеличению с 1,54 до 3,35 % деформации круга.

Размеры самих косточек также оказывают влияние на деформацию высокопористых кругов. На рис. 4.11 показан характер изменения деформации и ее среднеквадратичного отклонения круга 12-й структуры, у которого изменяются только размеры вводимых оливковых косточек с объемным содержанием в инструменте, равном 12 %. С увеличением среднего размера косточек от 0,15 до 1,25 мм пропорционально уменьшается деформация круга с 7,09 до 1,19 %. Стабильность деформации по ее среднеквадратичному отклонению имеет экстремальный характер в зависимости от размера вводимых косточек.

Расплавление и затвердевание керамической связки при обжиге высокопористых кругов является основной причиной их деформации. Несмотря на этот очевидный факт, характер влияния количества связки на степень деформации инструмента зависит от его состава. В инструменте на основе электрокорунда белого керамической

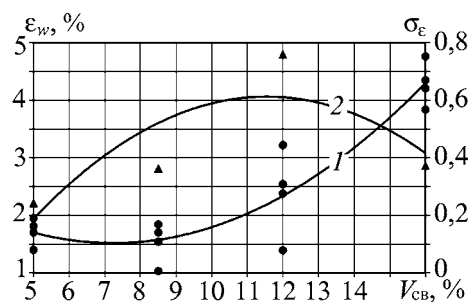


Рис. 4.12. Влияние объемного содержания связки на деформацию при обжиге (1) и ее среднеквадратичное отклонение (2) для круга зернистостью 16 и структурой 12

связкой формируется прочная адгезионная связь с абразивными зёрнами, корундовыми и силикатными микросферами. Объемный каркас из этих компонентов вместе со связкой выступает как единая, взаимосвязанная конструкция, которая весьма чувствительна к объемному содержанию связки.

При увеличении содержания керамической связки с 5 до 16 % объема круга у электрокорунда белого 12-й структуры его средняя деформация при обжиге возросла с 1,7 до 4,27 % при экстремальном изменении СКО деформации (рис. 4.12).

Дополнительное введение стеклянных микросфер для упрочнения связки оказывает влияние, аналогичное влиянию количества самой связки: больше стеклянных микросфер в круге — больше его объемная деформация, функционально связанная с общим содержанием $V_{св} + V_{мс}$ (рис. 4.13).

В инструменте на основе карбида кремния зеленого отсутствует адгезионная связь между связкой, абразивными зёрнами и невыгорающими порообразователями в виде микросфер. Формируется композиция, в которой твердые компоненты погружены в объем расплавленной связки, количество которой, кстати говоря, в 1,5...2 раза больше, чем у электрокорундовых кругов. В такой композиции

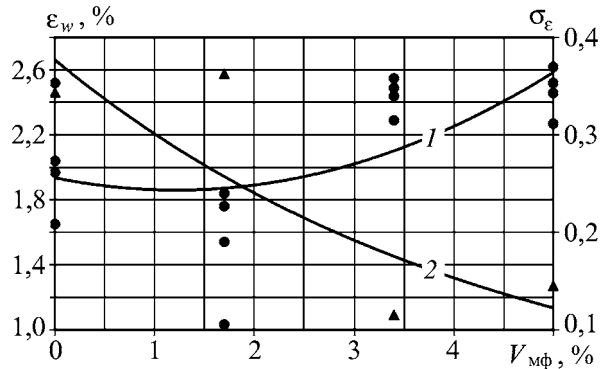


Рис. 4.13. Влияние объемного содержания стеклянных микросфер на деформацию при обжиге (1) и ее среднее квадратичное отклонение (2) для круга зернистостью 16 и структурой 12

деформация объемной структуры может происходить как результат несвязанных между собой перемещений абразивных зерен, траектория которых будет определяться столкновениями с ближайшими соседями.

Из анализа предложенных описательных моделей деформации следует два важных вывода. Увеличение содержания связки в первом случае, т.е. в кругах на основе электрокорунда белого, сопровождается в процессе кристаллизации связки «стягиванием» всех абразивных зерен, прочно соединенных твердеющей связкой. При этом не важны размеры зерен, а только их количество, поскольку объемная плотность зерен определяет жесткость объемной структуры инструмента. Корреляция между размерами абразивных зерен и степенью деформации практически отсутствует (ее величина 0,09...0,12).

Во втором случае (карбид кремния зеленого) с увеличением содержания керамической связки деформация, наоборот, будет уменьшаться. Так как уменьшается свободное пространство, в котором абразивные зерна, увлекаемые твердеющей связкой, могут перемещаться, то соответственно мало будет изменяться конфигурация объемной структуры. Для деформации высокопористых кругов из карбида кремния зеленого становится значимым

размер абразивных зерен: чем больше их размер, тем больше расстояние между ними и тем меньше препятствий для их перемещений. В этих кругах степень коррелированности размеров абразивных зерен с деформацией существенно выше (0,445...0,486).

Для прогнозирования возможных негативных последствий от деформации высокопористых кругов при их обжиге целесообразно знать характер и степень влияния их рецептурного состава. Разработка состава абразивного инструмента не является самоцелью, а направлена на обеспечение требуемой его характеристики. Поэтому при статистической обработке экспериментальных данных был сделан акцент на создание математических моделей, связывающих объемную деформацию при обжиге для каждой из четырех исследованных групп составов с зернистостью A_3 , объемным содержанием зерна V_3 , твердостью по глубину лунки $h_{\text{л}}$, т.е. основными параметрами характеристики круга, которую необходимо обеспечить при изготовлении (табл. 4.11).

На рис. 4.14 представлена графическая интерпретация математических моделей (см. табл. 4.11) на примере изготовления кругов четырех исследованных групп с постоянными параметрами: $V_3 = 0,38$; $A_3 = 0,16$ мм; $h_{\text{л}} = 4$ мм.

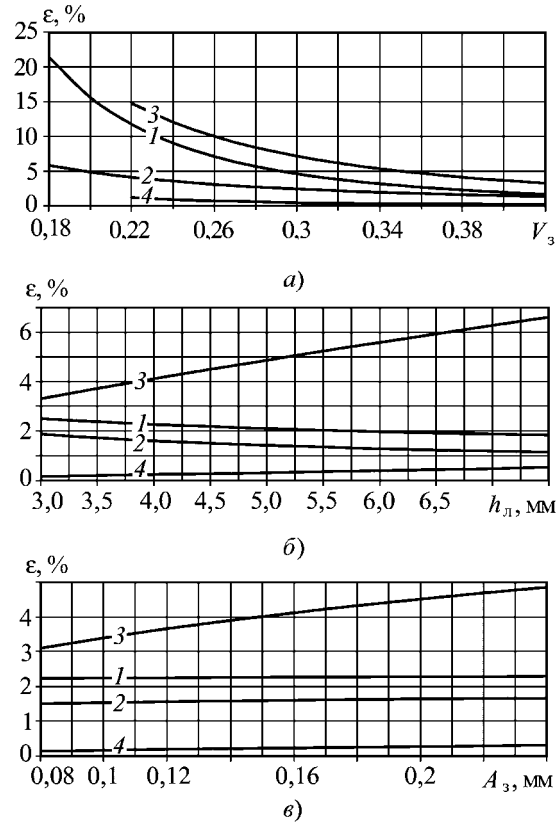


Рис. 4.14. Влияние содержания абразивного зерна (а), твердости (б) и зернистости (в) шлифовального круга на его объемную деформацию при обжиге

4.11. Модели связи объемной деформации высокопористых кругов при обжиге с их характеристикой

Группа состава	Математические модели связи	Коэффициенты парной корреляции		
		$A_з$	V_3	$h_{л}$
1	$\ln \epsilon_w = 0,023 \ln A_з - 3,007 \ln V_3 - 0,337 \ln h_{л} - 1,581$	-0,073	-0,988	-0,537
2	$\ln \epsilon_w = 0,091 \ln A_з - 1,724 \ln V_3 - 0,545 \ln h_{л} - 0,274$	0,088	-0,542	-0,102
3	$\ln \epsilon_w = 0,410 \ln A_з - 2,338 \ln V_3 + 0,756 \ln h_{л} - 1,143$	0,445	-0,831	0,287
4	$\ln \epsilon_w = 0,741 \ln A_з - 2,984 \ln V_3 + 1,316 \ln h_{л} - 4,824$	-0,486	-0,663	0,433

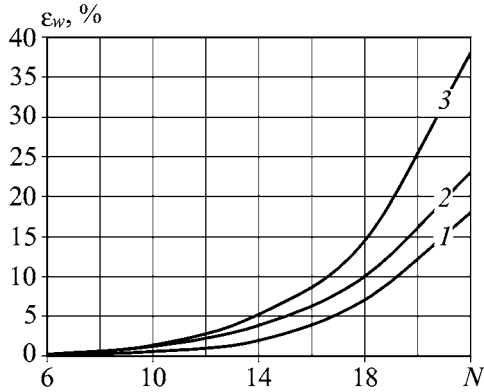


Рис. 4.15. Зависимость объемной деформации круга от номера его структуры:
1 – после формования; 2 – после спекания;
3 – суммарная деформация

Наибольшая деформация имеет место при обжиге высокопористых кругов из электрокорунда белого с применением композиций из невыгорающего и выгорающего порообразователей (1-я группа состава, табл. 4.6), а минимальная – у электрокорундовых кругов на основе корундовых микросфер (2-я группа состава). Введение оливковых молотых косточек в качестве порообразователя повышает степень деформации (1-я и 3-я группы составов).

Суммарная деформация. Таким образом, на этапе формования происходит искажение в сторону уменьшения расчетного значения высоты круга и соответственно его уплотнение со степенью деформации ε_1 (4.7). При обжиге высота круга еще больше уменьшается за счет деформации ε_H . Соответственно суммарная или накопленная деформация высокопористого круга по высоте составит:

$$\varepsilon_H^* = 1 - (1 - \varepsilon_1)(1 - \varepsilon_H), \quad (4.10)$$

а объемная деформация инструмента после формования и обжига будет равна:

$$\varepsilon_w = 1 - (1 - \varepsilon_1)(1 - \varepsilon'_w), \quad (4.11)$$

где ε'_w – объемная деформация после обжига круга.

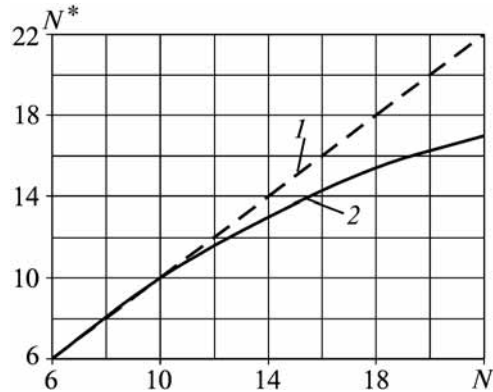


Рис. 4.16. Отклонение фактического номера структуры N^* от расчетного N в результате деформации круга:
1 – фактический номер структуры;
2 – расчетный

В результате уплотнения объемной структуры круга фактическое содержание абразивных зерен в нем уменьшается:

$$V_3^* = \frac{V_3}{1 - (1 - \varepsilon_1)(1 - \varepsilon'_w)}, \quad (4.12)$$

и соответственно уменьшается фактический номер структуры по (1.11).

На примере высокопористых кругов из электрокорунда белого с оливковыми косточками и силикатными микросферами получены данные по изменению степени деформации круга ε_w от его номера структуры на всех этапах изготовления (рис. 4.15). В результате уплотнения объемной структуры круга его фактический номер структуры N^* , начиная с расчетной структуры 14, начинает заметно уменьшаться (рис. 4.16).

Управляя рецептурным составом высокопористого круга подбором оптимальных композиций различных порообразователей, можно существенно (до 8 раз) уменьшить деформацию инструмента при его изготовлении. При этом необходимо обратить внимание на следующее. Связь фактического содержания абразивного зерна с деформацией круга по уравнению (4.12), по существу, является рекурсивной

**4.12. Деформация и свойства высокопористых кругов различных составов
после прессования и обжига**

Исследованные характеристики	Номер группы состава при структуре				
	22		20		
	1	2	2	3	4
Усилие прессования, МПа	20	50	20	20	20
Фактическое объемное содержание абразива V_3 , %	29,0	18,9	28,6	28,9	28,3
Номер структуры	17	22	17	17	17
Твердость:					
по глубине лунки, мм	4,2	5,4	3,8	3,7	3,7
по звуковому индексу	4,3	42,4	47,7	49,6	48,0
Степень твердости	M3	M2/M3	CM1	CM1	CM1
Неуравновешенность масс, г	13	11	15	4	7
Разрывная скорость, м/с	79,1	106,1	109,4	92,5	97,0
<i>После прессования</i>					
Высота круга H , мм	29,1	35,8	29,9	30,8	30,6
Деформация ϵ_H , %	19,2	0,55	16,9	14,4	15,0
<i>После обжига</i>					
Наружный диаметр D , мм	336,7	352,1	348,2	343,6	345,3
Деформация ϵ_D , %	5,15	0,8	1,9	3,2	2,7
Высота круга H , мм	25,1	34,9	28,8	29,1	29,6
Деформация ϵ_H , %	13,8	2,5	3,7	5,5	3,3
Диаметр отверстия d , мм	80,1	74,0	74,2	74,8	73,3
Деформация ϵ_d , %	8,2	—	0,3	1,1	0,95
Деформация ϵ'_w , %	23,4	2,3	7,45	11,6	8,85
Суммарная деформация после формования и обжига ϵ_w^* , %	38,1	4,7	23,2	24,0	22,4

4.13. Связь объемной деформации высокопористых кругов после обжига с плотностью абразивной массы

Группа состава	Математические модели связи	Коэффициенты парной корреляции	Оценка адекватности модели		
			КМК	ОД	F-отн.
1	$\ln \varepsilon_w = 6,164 - 7,825 \ln \gamma_0$	-0,993	0,993	0,013	454,89
2	$\ln \varepsilon_w = 3,303 - 3,721 \ln \gamma_0$	-0,536	0,536	0,711	2,43
3	$\ln \varepsilon_w = 3,388 - 3,310 \ln \gamma_0$	-0,974	0,974	0,05	75,072
4	$\ln \varepsilon_w = 6,127 - 8,705 \ln \gamma_0$	-0,918	0,918	0,157	32,215

функцией, решение которой предопределяется исходным значением V_3 в моделях, представленных в табл. 4.10. Чтобы расчетным путем обеспечить заданную структуру круга с учетом его возможной деформации, необходимо заранее уменьшить расчетное значение V_3 . Такой подбор осуществляется методом итераций.

В табл. 4.12 представлены экспериментальные данные для кругов различных составов, разработанных для получения 20 и 22-й структур, т.е. предельных исследованных номеров структуры.

По аналогии с усилием прессования (4.6) была установлена статистически значимая связь между объемной деформацией круга после обжига с исходной плотностью его абразивной массы (табл. 4.13). Во всех случаях, то есть для всех исследованных составов высокопористых кругов с увеличением плотности формуемой массы уменьшается деформация инструмента (рис. 4.17).

Самые лучшие результаты получены при изготовлении электрокорундового высокопористого круга на основе корундовых микросфер со структурой 22, у которого суммарная объемная деформация не превышала 4,7 %, что позволило, в конечном итоге, сохранить расчетный номер структуры. Максимальные значения

суммарной деформации для других составов высокопористых кругов были в диапазоне от 22,4 до 38,1 %.

В целом же круги на основе корундовых порообразователей (группы 2 и 4) с наиболее распространенными структурами 10...16 при оптимальных пропорциях объемного содержания зерна и порообразователей могут быть получены с суммарной деформацией в пределах 0,4...1,2 %, гарантированно сохраняя расчетный номер структуры. При изготовлении шлифовальных кругов более высоких структур

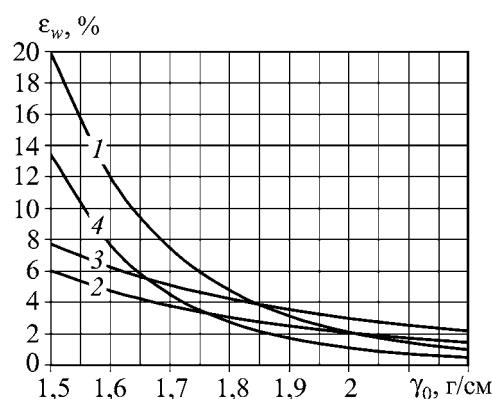


Рис. 4.17. Влияние плотности высокопористой абразивной массы различных составов на объемную деформацию круга

с минимально возможной деформацией необходимо на этапе их формования учитывать поправку на инерционные свойства высокопористой абразивной массы и увеличивать расчетную высоту формуемого инструмента.

Модели размерной деформации круга получены для постоянного диаметра заготовки, равного 355 мм. После статистической обработки данных о деформации кругов различных типоразмеров с изменением наружного диаметра от 80 до 500 мм одного и того же рецептурного состава на основе корундовых микросфер получена формула зависимости деформации ε_D от диаметра D круга в виде:

$$\ln \varepsilon_D^{\text{HM}} = 4,804 - 1,089 \ln D, \quad (4.13)$$

$$\ln \varepsilon_D^{\text{H6}} = 4,271 - 0,855 \ln D. \quad (4.14)$$

Из (4.13) и (4.14) следует, что с увеличением наружного диаметра шлифовального круга деформация по этому размеру уменьшается.

Через деформацию ε_D получена зависимость объемной деформации круга:

$$\varepsilon_w^{\text{HM}} = 0,657 + 3,512 \varepsilon_D, \quad (4.15)$$

$$\varepsilon_w^{\text{H6}} = 2,521 + 3,502 \varepsilon_D, \quad (4.16)$$

которая дает возможность прогнозировать размеры припуска на механическую обработку абразивного инструмента по (4.1) и (4.3).

Также статистической обработкой результатов измерения объемной деформации, составляющей 2,3...5,24 % высокопористых кругов диаметром 500 мм с одинаковой характеристикой 25A 12 BM2 12 K (99BA 100 G 12 V), установлено, что ее изменение подчиняется нормальному распределению. Это свидетельствует о том, что стабильность технологического процесса изготовления высокопористого круга и, как следствие, стабильность деформации в партии инструмента обусловлена случайными причинами.

4.6. ЭКОЛОГИЧНОСТЬ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ВЫСОКОПОРИСТЫХ ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ

Изготовление абразивного инструмента относится к вредным с экологической точки зрения производствам. Современный абразивный завод – это многономенклатурное производство различных по видам, типам и размерам абразивных изделий с использованием разных абразивных материалов, связок, технологий и оборудования. Каждой технологии присущи своя степень и объем загрязнения окружающей среды.

В целом же, основываясь на конкретных данных отечественного абразивного производства, можно полагать, что выбросы загрязняющих веществ в атмосферу составляют не менее 2 % от объема выпускаемой абразивной продукции. К их числу относятся диоксид азота, оксид углерода, абразивная пыль, сера и сернистый ангидрид, фтористый водород, марганец и его соединения, оксид железа, сажа, фенолы и др. Для среднего по мощности абразивного завода с выпуском нескольких десятков тысяч тонн продукции в год вредные выбросы в атмосферу составляют сотни тонн.

Если изготовление абразивной продукции совмещено с производством абразивных материалов, то объемы пылегазовых выбросов существенно возрастают. Пыль абразивного производства относится к тяжелым, гигроскопичным со значительным удельным электрическим сопротивлением системам. В составе твердого аэрозоля содержится более 20 химических элементов, в основном, кремнезема, оксида железа и углерода. В производстве абразивов возрастают выбросы таких вредных газов, как оксид углерода, сернистый ангидрид, сероводород и оксиды азота [15].

Кардинальным решением проблемы экологической безопасности абразивного производства может быть только утилизация вредных пылегазовых выбросов. Дру-

гим решением, которое поможет снизить нагрузку на очистные сооружения, является освоение экологически безопасных технологий изготовления абразивного инструмента.

Производство высокопористых шлифовальных кругов традиционно основано на использовании выгорающих порообразователей. В настоящее время в мировой практике в качестве таковых применяются в основном молотые фруктовые косточки и нафталин (см. разделы 1.2 и 3.3), которые практически полностью переходят в газообразные продукты.

Новые технологические принципы изготовления высокопористого абразивного инструмента дают возможность существенно снизить уровень загрязнения окружающей среды за счет порообразования невыгорающими наполнителями. Полностью исключить газообразование при изготовлении абразивного инструмента на керамических связках невозможно, так как это связано с выгоранием клеящих добавок (декстрин, жидкое стекло) и частично – компонентов связки.

Различные составы высокопористых шлифовальных кругов исследовались на экологичность по потере массы ΔM после обжига.

На первый взгляд, кажется более удобным воспользоваться стандартизованным параметром абразивного инструмента – его плотностью и оценить потерю массы шлифовального круга по формуле

$$\frac{\Delta \gamma}{\gamma_0} = \frac{\gamma_0 - \gamma}{\gamma_0}, \quad (4.17)$$

где γ_0 , γ – плотность абразивной массы после формования круга и после обжига. Но такая оценка по (4.17) корректна только для случаев, когда сохраняется постоянным объем инструмента, что с небольшой погрешностью может быть принято для структур менее 6.

Простой расчет дает формулу

$$\frac{\Delta \gamma}{\gamma_0} = \left(\frac{\Delta M}{M_0} - \varepsilon_w \right) \frac{1}{1 - \varepsilon_w}, \quad (4.18)$$

из которой следует, что суммарная деформация шлифовального круга при его изготовлении вносит определенные коррективы в оценку экологичности по плотности абразивной массы.

При выгорании фруктовых косточек, компонентов керамической связки, клеящих добавок и испарении влаги, содержащейся в абразивной массе, образуются газообразные продукты, которые формируются в пузырьки – поры. В случае равновесия внешних напряжений, действующих на газонаполненную полость, и внутренних напряжений от давления газа пора принимает сферическую форму. Но даже в отсутствие внешних сил форма включения, строго говоря, отличается от сферической. В поле действия приложенных сил, обусловленных деформацией объемного каркаса абразивного инструмента при его обжиге, различные участки газонаполненной полости будут двигаться с неодинаковыми скоростями и форма поверхности начнет изменяться.

Такое искривление первоначально сферической формы порового включения приводит к дополнительному его взаимодействию из-за кривизны поверхности с композиционной матрицей инструмента. Искривление поверхности и рост внутренних напряжений будет происходить до тех пор, пока не выровняются скорости всех участков поверхности поры. После этого устанавливается стационарное состояние, в котором газонаполненная полость измененной формы будет двигаться как целое.

Известно, что движение газовых пузырьков в твердых телах носит самопроизвольный, хаотический характер [16]. Отсутствие растворимости выделяемого газа в абразивной массе при ее обжиге приводит к образованию множества диспергированных очень мелких газовых пузырьков. Их броуновская миграция, характерная для высокотемпературного обжига, приводит к перемещению газа не только за пределы, но и в глубь инструмента.

Броуновское движение газонаполненных полостей оказывает, таким образом, влияние на перераспределение газа, не растворимого в абразивной массе и распределенного в нем неравномерно. Столкновения мигрирующих пузырьков радиусами r_1 и r_2 вызывают появление пузырька с радиусом r_3 , определяемым соотношением:

$$r_3^2 = r_1^2 + r_2^2.$$

Обычная движущая сила, ответственная за миграцию в условиях градиента температур, обусловлена тепловым потоком, в результате чего газовый пузырек (или пузырек с жидкой связкой) должен мигрировать в противоположном направлении.

Наличие нестабильного градиента температуры в реальных условиях обжига абразивного инструмента приводит к нестабильным размерам газонаполненных полостей и капелек жидкой связки и характеру их распределения в объеме. Такая нестабильность характерна для всех движущихся пузырьков и капелек, у которых отношение скорости движения к градиенту температуры превышает некоторое критическое значение. Предполагается, что природа такой нестабильности связана с локальными искажениями градиента температуры в местах расположения включений, обладающих, по сравнению с матрицей абразивной массы, меньшей теплопроводностью. В результате чего центральная часть пузырька или капельки стремится мигрировать с большей скоростью, чем их края, поскольку в центре градиент температуры оказывается наибольшим. Такой механизм предопределяет разделение крупных включений на более мелкие.

Описанный механизм газообразования, таким образом, предполагает формирование как крупных включений в результате коалесценции газовых пузырьков, так и их дробление на более мелкие. Этот процесс в сочетании с броуновской

миграцией пузырьков газа по объему обжигаемого абразивного инструмента создает предпосылки для неоднородного характера итогового распределения пор.

Препятствиями для движения пузырьков могут быть только твердые включения абразивной массы: зерна и невыгорающие порообразователи в виде микросфер. Сталкиваясь с ними, пора закрепляется на этих включениях, ослабляя их связь с керамической связкой.

Можно ожидать, что формирование мелких пузырьков происходит за счет выгорания мелкодисперсных компонентов связки и клеящих добавок, дегидратации абразивных зерен и склонных к влагонасыщению силикатных микросфер, возможной сублимации всех твердых элементов состава инструмента. Крупные поры образуются при выгорании молотых фруктовых косточек или других выгорающих порообразователей.

Чем интенсивнее идет процесс газообразования, тем больше образуется новых пор, чаще они сталкиваются и образуют крупные полости, которые, соединяясь, формируют сквозное, объемное поровое пространство в структуре абразивного инструмента.

Интенсивность описанного механизма порообразования тесно связана с интенсивностью газовыделения при термической обработке высокопористой абразивной массы. Можно было бы ожидать, что интенсивность ее выгорания или потеря массы, в свою очередь, будет зависеть от количества вводимых выгорающих компонентов: фруктовых косточек, декстрина, керамической связки и т.д.

Однако, как показал прямой эксперимент, в действительности все происходит сложнее. В п. 3.3 было установлено, что если оливковые косточки в отдельности при температуре 1250 °С выгорают на 99,15 %, то в смеси с керамической связкой их степень выгорания уже не превышает 60 %.

В табл. 4.14 приведены исследованные составы абразивной массы 12-й

**4.14. Составы высокопористой абразивной массы
по различным рецептам для кругов 12-й структуры и ее потеря
после термической обработки**

Компоненты состава и потеря массы	Количество по группам составов, г			
	1	2	3	4
Абразивное зерно	5114	5114	4143	4143
Керамическая связка	426	468	852	852
Оливковые косточки	286	–	240	–
Корундовые микросферы	–	164	–	164
Силикатные микросферы	110	–	110	–
Стекланные микросферы	14	34	34	34
Увлажняющие и клеящие добавки	560	290	377	260
Масса навески M_0 , г	6510	6070	5756	5453
Потеря массы ΔM , г	600	230	520	220
Потеря массы $\Delta M/M_0$, %	9,22	3,79	9,03	4,03

структуры всех 4 групп высокопористых кругов с выгорающими и невыгорающими порообразователями. В качестве увлажняющих и клеящих добавок были введены 1,5...2 % сухого декстрина и 3...5 % его водного раствора. Для кругов с силикатными микросферами и оливковыми косточками их количество было наибольшим.

Из анализа данных табл. 4.14 следует вывод, что не выгорают полностью не только оливковые косточки, но и увлажняющие и клеящие добавки на основе декстрина. Также можно утверждать, что при термической обработке формируется специфичная по своему содержанию абразивная масса с керамической связкой химического состава, заметно отличающейся от исходного. При этом, с одной стороны, новая абразивная масса меньше подвержена выгоранию, но, с другой стороны, ее измененные физико-механические свойства оказывают влияние на эксплуатационные свойства шлифовального круга.

Наибольший вклад в потерю массы при изготовлении высокопористых кругов вносит содержание фруктовых косточек. При их отсутствии степень выгорания уменьшается в 3 раза.

На основании опыта разработки и применения высокопористого абразивного инструмента можно полагать, что его рецептурные составы подбираются таким образом, чтобы обеспечить заданные значения твердости по глубине лунки h_L , размера A_z и содержания V_z зерна при минимально возможной деформации в процессе изготовления. Тогда функциональная связь $\Delta M(A_z, V_z, h_L)$ может характеризовать оптимальность рецептурного состава на экологичность изготовления.

В табл. 4.15 и на рис. 4.18 представлены результаты статистической обработки изменения потери массы ΔM от зернистости, твердости и относительного содержания зерен в круге. Постоянными для построения графиков были приняты сле-

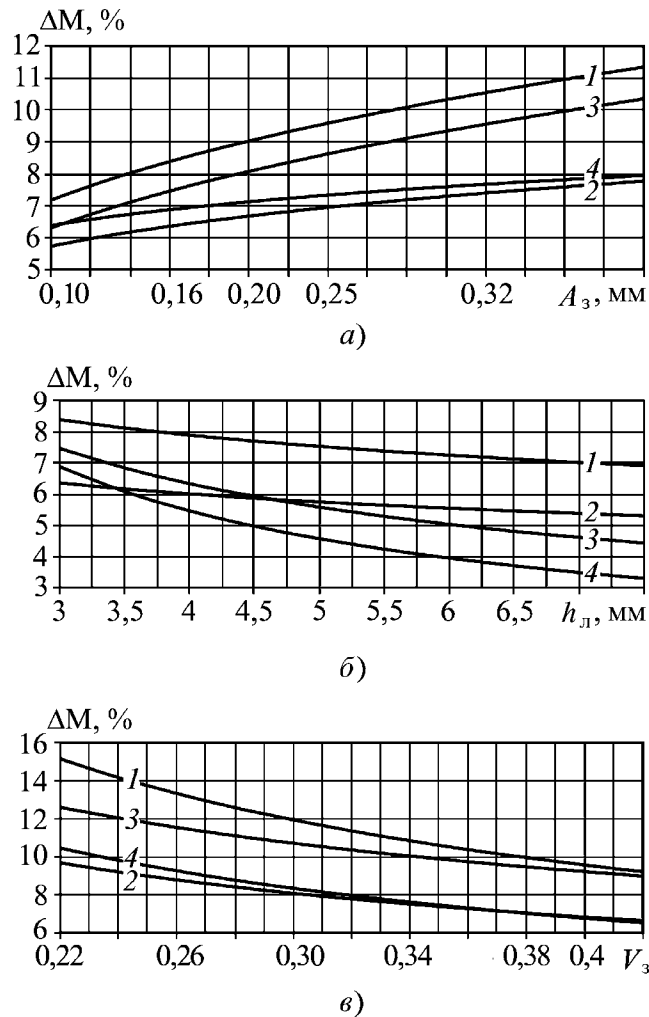


Рис. 4.18. Влияние зернистости (а), твердости (б) и объемного содержания абразивных зерен (в) шлифовального круга на потерю его массы при сушке и обжиге

дующие значения: $A_3 = 0,16 \text{ мм}$, $h_{\text{д}} = 4 \text{ мм}$, $V_3 = 0,38$.

Как и ожидалось, чем больше в состав абразивной массы вводится связки и порообразователи, тем больше потеря массы ΔM . Наиболее ощутимое влияние на ΔM оказывает структура шлифовального круга: с ее увеличением от 10 до 20 потеря массы возрастает до 1,5 раз.

В соответствии с современным расширительным трактованием экологично-

сти производства заключение о степени вредности изготовления высокопористого абразивного инструмента надо давать с учетом сопутствующих технологических процессов.

В этой связи очень важным достоинством высокопористого инструмента является то, что при его изготовлении объем потребления абразивного материала сокращается до 2...3 раз. Производство абразива считается самым вредным с эколо-

4.15. Математические модели связи потери абразивной массы высокопористых кругов различных составов с их зернистостью, твердостью и структурой

Группа состава	Математические модели связи потери массы ΔM , %					
1	$\ln \Delta M = 2,086 + 0,330 \ln A_3 - 0,211 \ln h_n - 0,770 \ln V_3$					
2	$\ln \Delta M = 1,803 + 0,219 \ln A_3 - 0,197 \ln h_n - 0,583 \ln V_3$					
3	$\ln \Delta M = 2,692 + 0,357 \ln A_3 - 0,568 \ln h_n - 0,523 \ln V_3$					
4	$\ln \Delta M = 2,266 + 0,158 \ln A_3 - 0,801 \ln h_n - 0,730 \ln V_3$					
Группа состава	Коэффициенты парной корреляции			Оценка адекватности модели		
	A_3	h_n	V_3	КМК	ОД	F-отн.
1	0,248	-0,323	-0,532	0,629	0,907	0,871
2	0,397	-0,164	-0,604	0,770	0,570	2,426
3	0,659	0,039	-0,677	0,919	0,218	9,030
4	0,621	-0,689	-0,672	0,973	0,076	26,068

гической точки зрения в абразивной промышленности [15]. Поэтому увеличение удельных объемов выпуска высокопористого инструмента дает весьма значительный вклад в оздоровление окружающей среды.

Что касается собственно технологии изготовления высокопористых шлифовальных кругов, то при этом проявляются противоречивые явления. Например, с увеличением зернистости круга умень-

шаются усилия прессования (затраты энергии), но возрастает степень выгорания абразивной массы и деформация круга после обжига, что требует дополнительной его механической обработки. Аналогичные выводы можно сделать по другим параметрам характеристики высокопористых шлифовальных кругов. Однако, подбирая их оптимальные рецептурные составы, можно свести к минимуму указанные последствия.

Глава 5

ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ВЫСОКОПОРИСТЫХ ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ

5.1. ТВЕРДОСТЬ И ЕЕ СТАБИЛЬНОСТЬ В ОБЪЕМЕ ИНСТРУМЕНТА

Формирование твердости абразивного инструмента безусловно зависит от физико-механических и химических свойств связки и ее количества в объеме шлифовального круга. Эта аксиома справедлива как для керамических связок, адгезионно-активных к абразивному материалу (например, к электрокорунду), так и для связок, химически инертных к нему (например, к карбиду кремния).

Чем больше вводится в объем инструмента связки, тем прочнее становится связь между соседними абразивными зернами и тем выше твердость, измеряемая механическими или акустическими методами.

Также безусловно и другое положение: для каждой комбинации размер абразивного зерна – количество зерна существует оптимальное содержание связки, которое обеспечивает заданную твердость инструмента. При изменении указанной комбинации соответственно надо изменять количество вводимой связки, чтобы сохранить заданную степень твердости.

При изготовлении высокопористых кругов необходимо дополнительно учитывать роль новых компонентов абразивной массы: выгорающих и невыгорающих порообразователей, которые могут упрочнять связь между зернами или, наоборот, ее разупрочнять. Совместное действие нескольких таких компенсаторов приводит к сложной картине формирования твердости.

Обеспечение заданной твердости и повышенной ее стабильности.

По данным ВНИИАШ твердость шлифовальных кругов линейно возрастает с увеличением объемного содержания керамической связки (рис. 5.1). По этим данным формально можно обеспечить любую твердость круга, увеличивая объемное содержание связки. Так, для 6-й структуры степень твердости ВМ1 обеспечивается объемным содержанием керамической связки в круге менее 4 %, а степень твердости ЧТ2 – 26 %. Аналогично для обеспечения указанных твердостей в круге со структурой 12 необходимы связки соответственно 14 и 38 %. При составлении рекомендации ВНИИАШ исходит из того, что уменьшение объемного содержания абразивных зерен в шлифовальном круге компенсируется аналогичным прибавлением объемной доли керамической связки.

Для оценки количества возможных мостиков связки между абразивными зернами в инструменте более показательным количеством соседних зерен в единице объема, чем их объемное содержание. Исходя из расчета числа зерен в 1 см^3 объема инструмента по формуле (2.3), на рис. 5.2 показано, что при одном и том же номере структуры круга, соответствующем одному и тому же значению объемного содержания зерен, число возможных мостиков связи между соседними зернами сильно зависит от зернистости. С уменьшением номера зернистости число зерен, находящихся в единичном объеме, увеличивается и возрастает возможное число мостиков связи при неизменном объемном содержании связки. Это известно из практи-

ки, следовательно, получать повышенную твердость для абразивного инструмента с зернистостью 10...16 предпочтительнее, чем для зернистости 40...50.

В высокопористых кругах с увеличением структуры от 6 до 20 объемное содержание зерен уменьшается с 50 до 22 %, и, следовательно, их количество в 1 см^3 объема снижается почти в 2,3 раза. Соответственно уменьшению количества абразивных зерен в единице объема увеличиваются расстояния между ними. При дополнительном введении связки большая ее часть идет не на формирование мостиков связи между соседними зернами, достаточно удаленными друг от друга, а на их обволакивание. По этой причине сложно обеспечить заданную твердость для кругов с большими номерами зернистости (более 16) и структуры (более 10) при их изготовлении на основе только выгорающих порообразователей.

Введение невыгорающих микросфер взамен абразивных зерен позволяет не только сократить, но и увеличить количество возможных мостиков связи между зернами и микросферами, в которых микросферы участвуют как промежуточный конструктивный элемент формирования объемного каркаса. Именно наличие твердых компонентов и характер их распределения в объемной структуре абразивного инструмента при ликвации керамической связки на заключительном этапе обжига становится релевантным фактором формирования твердости и ее стабильности.

Надо отметить, что такая характеристика шлифовального круга, как стабильность твердости, обеспечивающая его конкурентоспособность, не отражается в стандартах фирм – изготовителей абразивного инструмента. Исключение составляет ГОСТ 2424–83 (в ред. 2005 г.), который регламентирует точность изготовления абразивного инструмента с возможным рассеянием твердости в его объеме. Например, для класса точности АА допускается разброс значений твердости по глубине лунки в пределах только одной степени твердости.

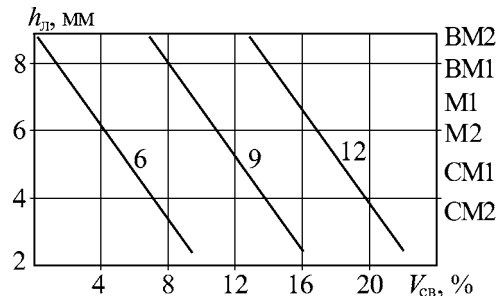


Рис. 5.1. Зависимость твердости от содержания связки и номера структуры

Можно принять за меру стабильности твердости инструмента среднее квадратичное отклонение σ_h рассеяния значений глубины лунки, измеренных пескоструйным методом в различных точках его объема. Тогда оказывается, что допустимая величина σ_h будет зависеть от зернистости и степени твердости абразивного инструмента.

Степень твердости по ГОСТ 18118–79 (в ред. 1981 г.) задается интервалом значений $h_{л}$ в зависимости от зернистости инструмента и давления струи песка (см. рис. 1.2). Так как распределение значений глубины лунки, измеренных на одном инструменте, подчиняется обычно нормальному закону, то теоретически воз-

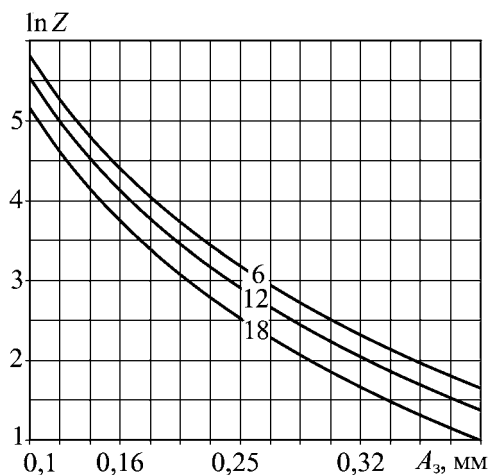


Рис. 5.2. Расчетное число абразивных зерен в 1 мм^3 объема круга в зависимости от его зернистости и номера структуры (6, 12, 18)

можный диапазон твердости определяется выражением

$$h_{\text{л}} = \bar{h}_{\text{л}} \pm 3\sigma_h, \quad (5.1)$$

где $\bar{h}_{\text{л}}$ – среднее значение глубины лунки.

По (5.1) теоретический диапазон рассеяния глубины лунки оказывается сильно завышенным относительно реальных значений, полученных измерением пескоструйным методом. Статистическим анализом большого массива экспериментальных измерений глубины лунки для высокопористых кругов установлено, что чаще всего весь диапазон $\Delta h_{\text{л}}$ укладывается в размер $3\sigma_h$.

Соответственно, для практических целей прогнозирования возможной твердости инструмента от его состава можно воспользоваться выражением:

$$h_{\text{л}} = h_{\text{л}}^* \pm 1,5\sigma_h, \quad (5.2)$$

где $h_{\text{л}}^*$ – расчетная глубины лунки.

Если принять, что среднее значение $\bar{h}_{\text{л}}$ лежит в центре регламентированного ГОСТ 18118–79 (в ред. 1981 г.) диапазона твердости, то можно определить допустимые значения σ_h . При таком допущении минимальное значение среднеквадратичного отклонения глубины лунки составит $\pm 0,13$ мм для зернистости 8...12 и степени твердости С1, С2, а максимально возможное – $\pm 0,15$ мм для той же зернистости и степени твердости ВМ1.

Таким образом, с учетом выполненных требований отечественного стандарта на точность и качество изготовления возможное среднеквадратичное отклонение твердости по глубине лунки при давлении 0,05 МПа допускается от 0,13 до 0,5 мм в зависимости от зернистости и степени твердости абразивного инструмента.

Альтернативными характеристиками стабильности твердости могут быть дисперсия рассеяния глубины лунки и коэффициент вариации, как отношение $\frac{\sigma_h}{h_{\text{л}}}$.

Чтобы получить высококачественный абразивный инструмент, необходимо обеспечить не только заданную его твердость, которая обычно маркируется по среднему значению измеренной глубины лунки, и не только минимальный диапазон ее изменения. Важно добиться минимального значения среднеквадратичного отклонения всех ее измеренных значений, чтобы они максимально плотно группировались возле средней глубины лунки. Именно при таком распределении твердости можно говорить о ее стабильности в объеме инструмента, которая гарантирует эффективное и стабильное шлифование.

К сожалению, стабильность твердости не является выходной характеристикой абразивного инструмента, и о ее величине в каждом конкретном случае можно судить только косвенно (если не производить измерений), исходя из общих закономерностей ее формирования.

В основе формирования твердости абразивного инструмента и ее стабильности лежит один механизм – соединение соседних зерен керамической связкой. Но, если твердость по определению обусловлена прочностью этого соединения, то ее стабильность в большей степени обусловлена гомогенностью распределения связки в межзеренном пространстве инструмента. При наличии в межзеренном пространстве дополнительных компонентов состава в виде выгорающих и невыгорающих порообразователей механизм формирования стабильной по объему твердости зависит от их физико-механических и морфологических свойств.

В нашем исследовании стабильность твердости в объеме инструмента оценивалась через среднеквадратичное отклонение σ_h значений глубины лунки, полученных пескоструйным методом при давлении 0,05 МПа. По каждому рецептурному составу изготовлялось по 3 шлифовальных круга, на каждом круге в различных точках с двух сторон делали 6...8 измерений твердости. Интегральную оценку

среднеквадратичного отклонения σ_h определяли по результатам 18...24 измерений на трех шлифовальных кругах каждого рецепта.

Влияние фруктовых косточек.

Увеличение объемного содержания оливковых косточек разупрочняет шлифовальный круг и дестабилизирует распределение твердости в его объеме. Повышение количества косточек размером 0,2...0,5 мм с 6 до 12 % объема круга зернистостью 16 со структурой 12 при постоянном содержании керамической связки 8,5 % приводит к увеличению средней глубины лунки с 5,55 до 6,0 мм или уменьшению на половину диапазона степени твердости М1. Снижение твердости круга сопровождается значительным увеличением среднеквадратичного отклонения σ_h с 0,302 до 0,684 мм.

Наряду с количеством на твердость и ее стабильность влияют размеры вводимых фруктовых косточек (рис. 5.3). При всех постоянных соотношениях количества зерна, связки и косточек твердость электрокорундового круга со структурой 12 повышается от М3 до СМ1 при увеличении только размеров вводимых косточек с отклонением от линейной функции при $A_{к.ф} = 0,35$ мм. При этом же среднем размере косточек наблюдается максимальное среднеквадратичное отклонение σ_h .

Корреляционным анализом экспериментальных данных установлено, что на твердость круга и ее стабильность более сильное влияние оказывает размер вводимых косточек, чем их количество.

Влияние стеклянных микросфер обусловлено одновременным проявлением их упрочняющих и порообразующих свойств. При изготовлении высокопористых кругов они являются полезной добавкой к керамической связке, поэтому действие стеклянных микросфер необходимо рассматривать во взаимосвязи с керамической связкой.

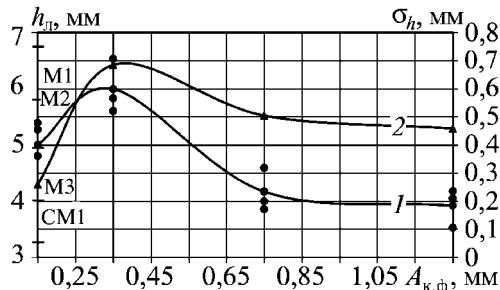


Рис. 5.3. Влияние размера оливковых косточек на твердость (1) и ее среднеквадратичное отклонение (2) для круга зернистостью 16 и структурой 12

На рис. 5.4 приведены экспериментальные зависимости взаимного влияния вышеуказанных компонентов состава круга зернистостью 16 и структурой 12, построенные по значениям h_l и σ_h , усредненным по результатам измерений на трех кругах каждой рецептуры.

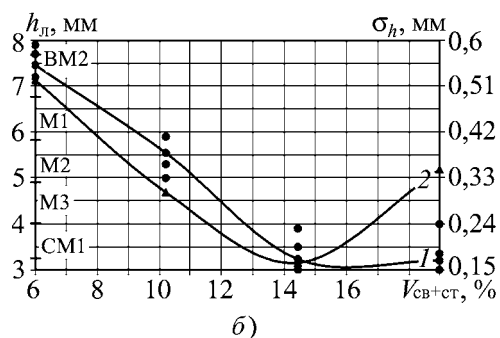
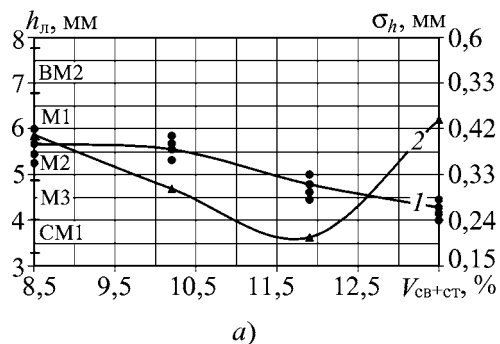


Рис. 5.4. Влияние объемного содержания стеклянных микросфер (а) и керамической связки (б) на твердость (1) и ее среднеквадратичное отклонение (2) для круга зернистостью 16 и структурой 12

На рис. 5.4, *а* показано изменение твердости и ее среднеквадратичного отклонения в инструменте при увеличении объемного содержания стеклянных микросфер от 0 до 5,1 % при постоянном количестве связки, равном 8,5 %. На рис. 5.4, *б* сохраняется постоянным относительное содержание стеклянных микросфер, равное 20 % от количества керамической связки, при ее увеличении в объеме круга от 5 до 16 %.

Анализируя приведенные зависимости, можно отметить, что в обоих случаях твердость с увеличением суммарного содержания стеклянных микросфер и керамической связки возрастает, но интенсивность уменьшения глубины лунки h_L обеспечивается в большей мере за счет увеличения содержания связки, чем стеклянных микросфер.

Для исследованной круга структуры 12 с объемным содержанием зерна 38 % зафиксирован предельный порог твердости, близкий к границе СМ1/СМ2. При увеличении количества связки от 12 до 16 % объема совместно со стеклянными микросферами средняя глубина лунки практически остается постоянной, изменяясь от 3,24 до 3,16 мм.

В отличие от твердости величина и характер изменения ее стабильности обуславливается преимущественным влиянием стеклянных микросфер. Совместное увеличение количества стеклянных микросфер и связки приводит к уменьшению величины σ_h . При содержании стеклянных микросфер 2,5...3,5 % объема круга наблюдается минимум среднеквадратичного отклонения глубины лунки. Чем больше вводится в состав круга керамической связки, тем меньше надо добавлять стеклянных микросфер. В небольших количествах они всегда стабилизируют распределение твердости в объеме высокопористого абразивного инструмента.

Влияние силикатных микросфер на твердость круга связано с их упрочняющим действием на мостики связи между абразивными зёрнами (см. главу 3). Вве-

дение силикатных микросфер в количестве 8...10 % объема круга при постоянном содержании связки повышает его твердость на одну степень. Если такое увеличение твердости нежелательно, то его можно компенсировать введением в состав круга молотых фруктовых косточек.

Как было установлено в п. 3.2, введение в состав высокопористых кругов корундовых микросфер практически не оказывает влияния на его твердость, но существенно снижает ее среднеквадратичное отклонение по глубине лунки. Повышенное содержание силикатных микросфер при постоянном содержании керамической связки также стабилизирует распределение твердости в объеме высокопористого инструмента.

Влияние рецептурного состава круга. Рецептурный состав высокопористых кругов оптимизируется, прежде всего, с учетом его заданной характеристики: материала абразива, его зернистости, твердости и номера структуры.

На примере изменения характеристики высокопористых кругов с рецептурным составом второй группы в соответствии с классификацией, приведенной в табл. 4.6, можно проследить совместное влияние компонентов межзеренного пространства на твердость инструмента и ее стабильность. В составах инструмента этой группы присутствуют силикатные и стеклянные микросферы, оливковые косточки, которые вместе с зёрнами электрокорунда и керамической связкой взаимодействуют между собой достаточно сложным образом. Правильным подбором их количественных соотношений можно обеспечить четкие закономерности изменения твердости и ее стабильности от характеристики круга.

Представленные на рис. 5.5 зависимости являются расчетными моделями, полученными статистическим обобщением и регрессионным анализом различных по составу кругов. При постоянном содержании керамической связки в 10 % объема круга со структурой 12 его твер-

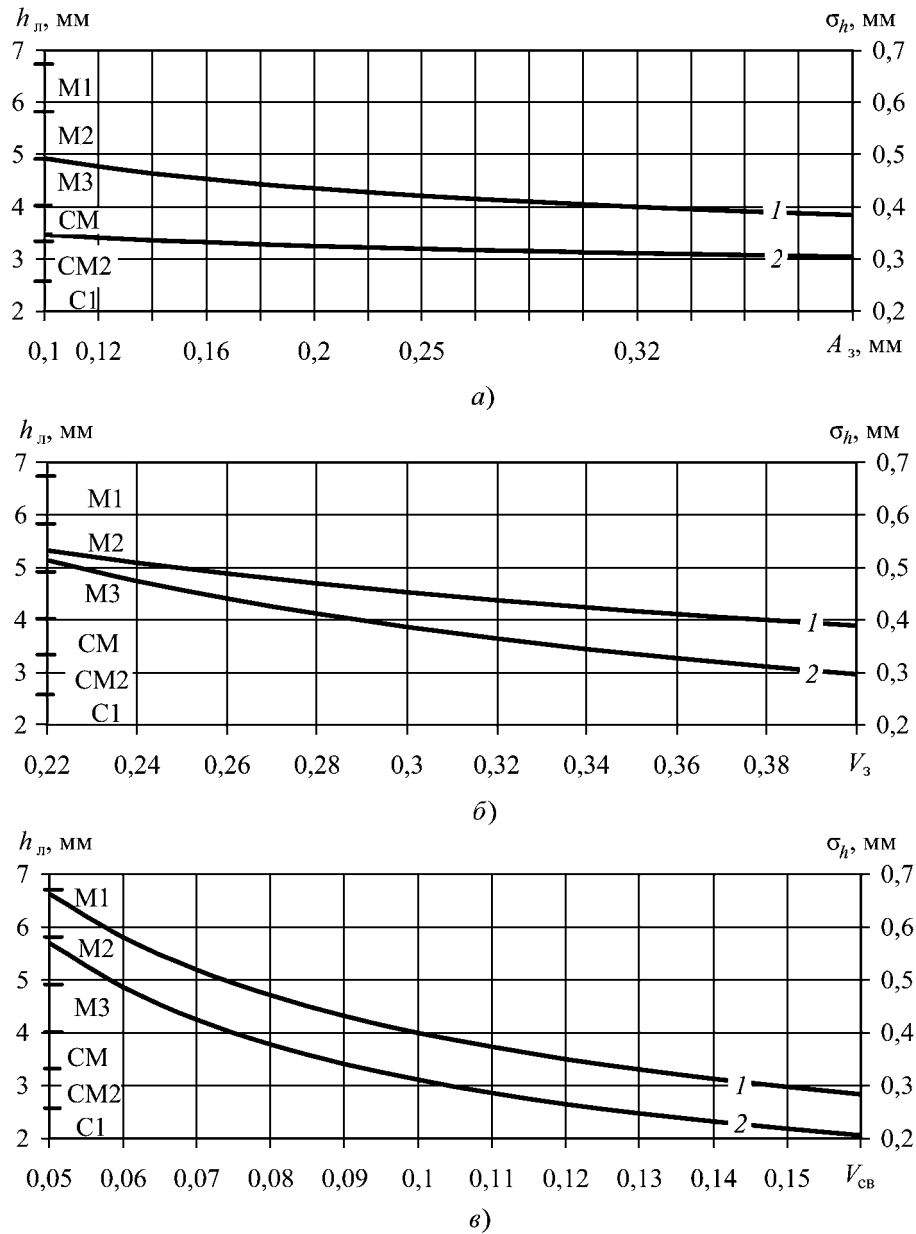


Рис. 5.5. Влияние зернистости (а), относительного содержания зерна (б) и связки (в) на твердость по глубине лунки (1) и ее среднеквадратичное отклонение (2)

дость и среднеквадратичное отклонение глубины лунки уменьшаются при увеличении зернистости абразива (рис. 5.5, а).

Аналогичным образом уменьшаются h_d и σ_h при постоянном содержании связки в круге зернистости 16 (рис. 5.5, б) и в круге зернистостью 16 и структурой 12 (рис. 5.5, в) при возрастании в объеме круга соответственно содержания абразивного зерна V_3 и керамической связки $V_{св}$.

Обобщенные статистические модели связи параметров характеристики круга с его твердостью по глубине лунки h_d и ее среднеквадратичным отклонением σ_h имеют вид

$$h_d = 0,365 A_3^{-0,18} V_3^{-0,524} V_{св}^{-0,73}, \quad (5.3)$$

$$\sigma_h = 0,154 A_3^{-0,094} V_3^{-0,918} V_{св}^{-0,874}. \quad (5.4)$$

На твердость и ее стабильность по величине коэффициента парной корреляции наиболее сильно влияет, как и ожидалось, содержание связки, в меньшей степени размеры и количество абразивных зерен. При этом, подбирая состав круга на заданную твердость, надо обращать внимание на размеры зерен, а при минимизации ее рассеяния в объеме инструмента – на их количество.

Можно было бы ожидать, что нестабильность твердости, как результат перераспределения керамической связки в объеме инструмента при его контракции в процессе обжига, зависит от степени деформации. Однако значимой корреляционной зависимости σ_h от объемной деформации высокопористых шлифовальных кругов, изготовленных на основе электрокорунда белого и карбида кремния зеленого по различным рецептурам, не установлено.

Обеспечение повышенной твердости высокопористых шлифовальных кругов. Для шлифовальных кругов с большими номерами зернистости и структуры получить высокую степень твердости (более чем СМ1), как уже отмечалось,

является сложной технологической задачей. С увеличением содержания керамической связки в объеме высокопористого инструмента большая ее часть расходует-ся на обволакивание зерен, а меньшая часть – на формирование мостиков связи между соседними зернами. Абразивные зерна, покрытые толстым слоем керамической связки, теряют свою режущую способность и непригодны к шлифованию.

Если обратиться к модели объемного строения абразивного инструмента (рис. 3.24), то можно прийти к очевидному выводу: прочность связи соседних зерен между собой будет тем больше, чем больше будет мостиков связи между ними. Резистентность или сопротивляемость объемной конструкции с большим количеством взаимных соединений, например, деформации при высокотемпературном обжиге или вырыву (разрушению) отдельных ее элементов безусловно выше, чем для конструкции с большим числом степеней свободы. Добавим также, что повышению прочности такой объемной конструкции способствует уменьшение расстояний между абразивными зернами и увеличение площади сечения мостиков связи между ними.

При повышении номера зернистости или структуры уменьшается количество зерен в единице объема, увеличивается средневероятное расстояние между ними и сокращается число возможных соединений между соседними абразивными зернами. Чтобы сохранить резистентность системы на прежнем уровне или, другими словами, обеспечить заданную твердость, необходимо увеличивать содержание керамической связки в абразивном инструменте. Такой подход не всегда дает нужный результат.

Введение невыгорающих микросфер в объем абразивного инструмента в качестве порообразователя и наполнителя существенно упрощает задачу получения высокопористых кругов повышенной твердости.

5.1. Влияние объемного содержания абразивного зерна и корундовых микросфер на твердость шлифовального круга

Структура круга	Объемное содержание		Твердость круга	
	зерна	микросфер	Глубина лунки, мм	Степень твердости
19	0,25	0,20	8,5	BM1
16	0,30	0,20	5,2	M2
14	0,35	0,20	5,3	M2
19	0,25	0,25	8,7	BM1
16	0,30	0,25	7,1	BM2
19	0,25	0,30	7,3	BM2

В табл. 5.1 приведены экспериментальные данные по измерению твердости у шлифовальных кругов из электрокорунда белого марки 25А зернистостью 25, у которых при переменном содержании зерна и корундовых микросфер сохранялось постоянным объемное содержание связки К5 ПГ, равное 8,5 %.

Из анализа данных табл. 5.1 следует, что, сохраняя постоянным содержание связки в объеме круга и варьируя объемным содержанием зерна и корундовых микросфер, можно управлять твердостью в достаточно широких пределах. В нашем случае степень твердости изменялась от BM1 до M2 или на 3 степени.

В кругах с высокими номерами структуры невыгорающие микросферы, компенсируя отсутствие абразивных зерен, становятся как бы "реперными точками" в свободном пространстве между достаточно удаленными друг от друга соседними зернами. Заполняя межзеренный объем круга, микросферы, как твердые частицы, способствуют созданию дополнительных мостиков связи, снижая степень свободы перемещения абразивных зерен и упрочняя их соединение.

Вернемся теперь к задаче разработки рецептурного состава высокопористого круга повышенной твердости с учетом специфики конкретного производства. При отработанной производственной тех-

нологии изготовления шлифовальных кругов целесообразно отталкиваться от известных рецептов абразивной массы, которые гарантированно обеспечивают заданную твердость при зернистости A_3 , объемном содержании зерна V_3 и известном содержании керамической связки. При переходе на другой рецепт с зернистостью A_3^* и объемным содержанием зерна V_3^* , необходимо дополнительно ввести в абразивную массу микросферы в количестве, компенсирующем недостаток абразивного зерна. Приняв во внимание, что количество зерна по (2.3) связано с его зернистостью и объемным содержанием, получаем

$$0,667 \frac{V_3}{A_3^3} = 0,667 \frac{V_3^*}{A_3^{*3}} + K V_{mc} \quad (5.5)$$

В выражении (5.5) коэффициент K переводит объемное содержание микросфер V_{mc} в их количество в единице объема. Для корундовых микросфер марки "Т", у которых средний размер составляет 103 мкм (см. табл. 3.3), $K = 1,748 \cdot 10^3$.

Для более общего случая, когда новый рецепт высокопористого круга разрабатывается с учетом опыта изготовления другого рецепта, где уже используются корундовые микросферы, их необходимое количество можно определить по формуле

$$V_{\text{мс}}^* = 3,82 \cdot 10^{-4} \left(\frac{V_3}{A_3^3} - \frac{V_3^*}{A_3^{*3}} \right) + V_{\text{мс}}. \quad (5.6)$$

Например, если есть потребность в изготовлении круга зернистостью 16 со структурой 18, то по сравнению с аналогом зернистостью 12 и структурой 12 целесообразно увеличить количество вводимых корундовых микросфер с 10 до 16 % объема шлифовального круга.

5.2. РОЛЬ МАСШТАБНОГО ФАКТОРА В ФОРМИРОВАНИИ ТВЕРДОСТИ И ЕЕ СТАБИЛЬНОСТИ В ОБЪЕМЕ ИНСТРУМЕНТА

При изготовлении абразивного инструмента больших размеров определенную роль в формировании их эксплуатационных свойств начинает играть масштабный фактор. В этой связи особый интерес представляют высокопористые шлифовальные круги диаметром более 300 мм и высотой до 200 мм.

Применение крупногабаритных шлифовальных кругов обусловлено, с одной стороны, конструктивными особенностями обрабатываемых деталей и, соответственно, необходимостью обработки одной или нескольких поверхностей одновременно (например, врезное шлифование шеек коленчатых валов или глубинное шлифование замков лопаток газотурбинных двигателей). С другой стороны, использование шлифовальных кругов с большими диаметрами и высотами обеспечивает наибольшую площадь контакта абразивного инструмента с обрабатываемой поверхностью и соответственно наибольшее число режущих элементов, удаляющих обрабатываемый материал. Это, в свою очередь, обеспечивает повышенный съем материала, меньшую удельную нагрузку на инструмент, улучшенные условия для его работы и, следовательно, более высокую эффективность процесса резания в целом.

Статистический анализ потребности в шлифовальных кругах на заводах автомобилестроения, авиадвигателестроения и других показал, что круги диаметром более 300 мм составляют от 60 до 80 % общей потребности в абразивном инструменте.

Входной контроль твердости показывает, что разброс по твердости у одного и того же абразивного инструмента зарубежных фирм даже относительно небольших размеров диаметром 80...175 мм с нормальной структурой может достигать двух степеней твердости. Также круги имеют в 1,5...2 раза меньшую кромкоустойчивость при снятии малых припусков на поверхностях с небольшими размерами (например, при ручном полировании лопаток).

Выбор характеристического размера шлифовальных кругов. Абразивный инструмент изготавливается различных типов, характеризующих форму, конструкцию и их размер. Основные типы шлифовальных кругов на керамической, бакелитовой и вулканитовой связках определены ГОСТ 2424–83 (в ред. 2005 г.).

Для наиболее распространенного типа шлифовальных кругов – прямого профиля по ГОСТ 2424–83 (в ред. 2005 г.), например, определены следующие размеры круга:

- наружный диаметр 3...1060 мм;
- высота 1...250 мм;
- диаметр отверстия 1...305 мм.

Если подойти дифференцированно к каждой характеристике размера круга, то невозможно выбрать такую, которая давала бы интегрированную оценку габаритов инструмента в целом, с точки зрения технологии его изготовления. В то же время практика производства шлифовальных кругов и особенно высокопористого абразивного инструмента дает много примеров влияния их габаритов на специфику изготовления и особенно на их эксплуатационные свойства: твердость, ее стабильность, разрывную прочность, дисбаланс, деформацию при обжиге и др.

5.2. Примеры высокопористых абразивных кругов различных размеров и характеристик

Характеристика круга	Типоразмер круга	Твердость h_d , мм		
		диапазон	$\bar{h}_d$	σ_h
25A 12П ВМ2 12 К5	1 250×32×76	6,3...7,5	6,6	0,46
	1 500×50×203	6,4...7,5	6,8	0,50
	1 500×75×203	5,9...6,6	6,1	0,33
25A 12П М1 16 К5	1 40×25×13	6,1...6,3	6,2	0,14
	1 55×28×13	5,5...5,8	5,7	0,21
25A 16П М2 14 К5	1 55×28×13	5,4...5,6	5,5	0,01
	1 200×20×51	4,9...5,3	5,1	0,13
24A 40П М1 10 К5	1 250×32×76	3,9...4,0	3,9	0,06
25A 40П С1 10 К5	1 500×100×203	1,7...1,9	1,8	0,09

В табл. 5.2 приведены примеры изготовления высокопористых шлифовальных кругов закрытой структуры с разными габаритами, где видно, что размеры инструмента при одном и том же составе абразивной массы оказывают достаточно сильное влияние на твердость и ее стабильность. У первых из двух представленных в табл. 5.2 характеристик высокопористых кругов 25A 12П ВМ2 12 К5 и 25A 12П М1 16 К5 для всех размеров инструмента сохраняется одна и та же степень твердости, однако наблюдается рассеяние в значениях ее математического ожидания $\bar{h}_d$ и среднеквадратичного отклонения σ_h .

Одинаковые значения твердости у кругов с характеристикой 25A16П М2 14 К5 обеспечиваются за счет различного содержания керамической связки К5, которая учитывает габариты инструмента. И, наконец, две разные характеристики кругов по степени твердости 24A 40П М1 10 К5 и 25A 40П С1 10 К5 получены у инструментов с одним и тем же рецептурным составом высокопористой абразивной массы.

Чтобы связать габариты шлифовальных кругов, т.е. их масштабный фактор, с одной какой-либо его размерной характеристикой, для дальнейшего рассмотрения было предложено использовать: объем шлифовального круга $W = \frac{\pi}{2}(D^2 - d^2)H$, см³, или условную диагональ круга через характеристический размер $L_x = \sqrt{D^2 + H^2}$, см.

Сравнительная оценка указанных характеристик проводилась на статистической выборке из 14 шлифовальных кругов по степени влияния на их твердость по глубине лунки и ее среднеквадратичное отклонение. Все исследуемые круги были прямого профиля с зернистостью 16, структурой 12 из электрокорунда белого марки 25A.

Диапазон размерных характеристик и свойств кругов был следующим:

- размер кругов 50×11×10...
500×25×203;
- объем кругов 20,73...4099,6 см³;
- диагональ кругов 5,12...50,06 см;

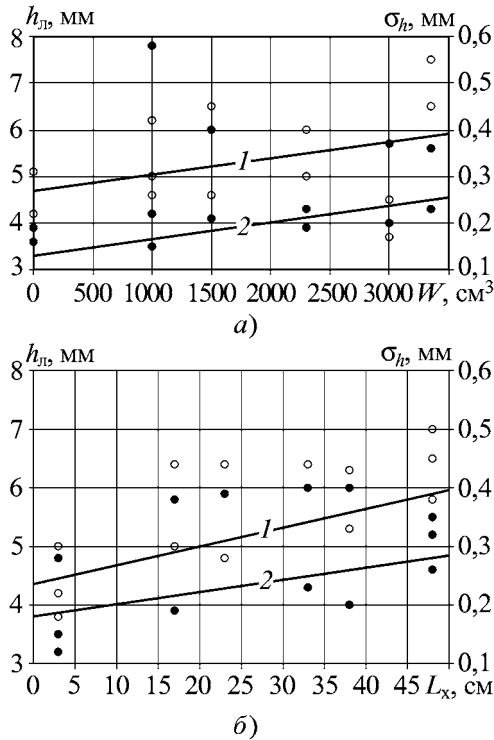


Рис. 5.6. Влияние объема круга W (а) и его диагонали L_x (б) на твердость (1) и ее среднеквадратичное отклонение (2)

- твердость h_d 3,6...7,6 мм;
- степень твердости ВМ2...СМ2;
- σ_h твердости 0,11...0,65 мм;
- относительное содержание керамической связки К5 в круге 5...8,6 %.

Результаты статистической обработки данных по влиянию объема круга W и его диагонали L_x на твердость и ее среднеквадратичное отклонение представлены на рис. 5.6.

Математические модели разрабатывались в виде линейного полинома связи твердости по h_d и ее среднеквадратичного отклонения σ_h и размерной характеристики W и L_x , а также относительного содержания керамической связки в круге $V_{св}$. Так как содержание связки непостоянно в исследованных шлифовальных кругах, то этим можно объяснить относительно большой разброс экспериментальных дан-

ных относительно их сглаженной линейной модели (см. рис. 5.6).

Результаты проведенного корреляционного анализа и статистической оценки адекватности модели экспериментальным данным приведены в табл. 5.3. Изучение и сопоставление экспериментальных данных табл. 5.3 позволяет сделать вывод, что по всем исследованным статистическим характеристикам диагональ круга L_x оказывает более сильное влияние на твердость круга и ее среднеквадратичное отклонение, чем объем шлифовального круга W .

Таким образом, диагональ круга L_x выбирается в качестве характеристического размера шлифовального круга, который в достаточно полной мере учитывает масштабный фактор инструмента.

Моделирование твердости кругов и ее стабильности. Статистическим обобщением экспериментальных данных для шлифования кругов различных типоразмеров и характеристик, представленных в табл. 5.2 и 5.4, с помощью компьютерных программ корреляционного и регрессионного анализа получен ряд моделей связи твердости (по глубине лунки h_d , мм) круга и ее стабильности (по величине среднеквадратичного отклонения глубины лунки σ_h , мм) в зависимости от объемного содержания абразивного зерна V_z , корундовых микросфер $V_{мс}$, стеклянных микросфер $V_{ст}$ и керамической связки $V_{св}$.

Модели разработаны в виде натурального логарифмического полинома связи 1-го порядка для высокопористых кругов зернистостью 16 с диапазоном исследованных параметров:

- объемное содержание абразивного зерна – 26...44 %;
- структура круга – 9...18;
- объемное содержание корундовых микросфер – 3...40 %;
- объемное содержание стеклянных микросфер – 5...25 %;
- объемное содержание керамической связки – 6...10 %.

5.3. Результаты статистического анализа размерных характеристик шлифовальных кругов

Статистическая характеристика	Размерная характеристика	
	W	L_x
Твердость:		
Кoeffициент парной корреляции	0,322	0,363
Кoeffициент множественной корреляции	0,348	0,408
Остаточная дисперсия	0,952	0,903
F-отношение	0,827	1,196
Предельное отклонение, %	48,75	45,51
СКО твердости:		
Кoeffициент парной корреляции	0,052	0,094
Кoeffициент множественной корреляции	0,793	0,805
Остаточная дисперсия	0,414	0,391
F-отношение	7,587	8,289
Предельное отклонение, %	100,07	89,08

5.4. Результаты исследования шлифовальных кругов повышенной твердости

Характеристика круга	Типоразмер круга	Твердость, $h_{\text{д}}$, мм		
		Диапазон	Среднее значение	СКО
25A 10П CM1 12 K5	1 33,5×8×9,6	3,2...4,9	4,1	0,12
24A 16П CM1 9 K5	1 250×25×76	3,2...4,5	3,9	0,23
24A 16П CM2 9 K5	1 250×25×76	2,9...3,8	3,1	0,24
25A 16П C1 10 K5	1 200×63×76	2,2...2,85	2,5	0,19
25A 16П CM1 12 K5	1 50×11×10	3,3...3,8	3,6	0,22
24A 16П CM1 12 K5	1 350×32×76	3,4...4,3	3,8	0,36
24A 16П CM1 12 K5	1 300×25×127	2,4...2,6	2,5	0,14
95A 16П CM1 13 K5	1 80×20×20	3,55...4,5	3,9	0,30
25A 16П CM1 13 K5	1 200×20×51	3,4...4,45	3,8	0,42
95A 16П CM1 16 K5	1 80×20×20	3,45...4,2	3,8	0,18
25A 16П CM1 16 K5	1 600×80×203	5,6...6,0	5,7	0,21
25A 16П CM2 18 K5	1 600×80×203	5,4...5,6	5,5	0,08
25A 20П CM1 11 K5	1 50×11×10	3,3...4,1	3,6	0,34
25A 25П CM2 12 K5	1 350×32×127	5,1...5,3	5,2	0,09
25A 25П CM2 14 K5	1 600×80×203	5,1...5,3	5,2	0,37

Продолжение табл. 5.4

Характеристика круга	Типоразмер круга	Твердость, h_d , мм		
		Диапазон	Среднее значение	СКО
25A 25П С1 14 К5	1 600×80×203	4,5...4,7	4,6	0,37
25A 32П СМ1 10 К5	1 200×63×76	4,25...6,6	5,3	0,59
25A 32П СМ2 10 К5	1 200×63×76	4,5...5,15	4,9	0,23
25A 32П СМ2 12 К5	1 350×32×127	2,0...2,35	2,3	0,21
25A 32П СМ1 14 К5	1 25×25×8	5,6...5,0	5,2	0,30
25A 40П СМ1 14 К5	1 16×16×6	5,8...5,0	5,3	0,29
25A 40П СМ2 14 К5	1 50×20×10	4,2...5,15	4,6	0,32
25A 40П С2 14 К5	1 50×20×10	2,75...3,8	3,2	0,39
25A 40П СТ1 14 К5	1 50×20×10	2,5...3,2	2,8	0,27
25A 50П СМ1 12 К5	1 50×20×10	2,2...3,2	2,6	0,32
25A 50П СМ1 14 К5	1 50×20×10	4,3...5,7	5,0	0,57
25A 50П СМ2 14 К5	1 50×20×10	4,1...5,5	4,3	0,19
25A 50П СТ3 14 К5	1 50×20×10	1,5...2,4	1,9	0,33

Диапазон исследованных свойств шлифовальных кругов составил: по глубине лунки 1,7...7,6 мм; по $\sigma_h = 0,14...0,69$ мм.

Корреляционный и регрессионный анализы проводились одновременно для двух групп шлифовальных кругов диаметром 34...600 мм и 300...600 мм, а также с учетом принятого характеристического размера круга L_x .

Исследований по изучению влияния рецептурного состава высокопористой абразивной массы на твердость и ее стабильность выполнено достаточно много. Поэтому научный и практический интерес представляют результаты сравнительного анализа одних и тех же экспериментальных данных и их статистической обработки с учетом и без учета масштабного фактора.

5.5. Степень влияния параметров состава и характеристического размера круга на его твердость

Параметр состава и размер круга	Коэффициент парной корреляции при диаметре круга, мм	
	34...600	300...600
Объемное содержание:		
абразивного зерна V_z	-0,266	-0,110
корундовых микросфер V_{mc}	0,043	0,130
стеклянных микросфер $V_{ст}$	0,099	-0,140
керамической связки $V_{св}$	-0,069	-0,358
Характеристический размер L_x	0,341	0,046

5.6. Степень влияния параметров состава и характеристического размера круга на стабильность его твердости

Параметр состава и размер круга	Коэффициент парной корреляции при диаметре круга, мм	
	34...600	300...600
Объемное содержание:		
абразивного зерна V_z	0,107	0,075
корундовых микросфер V_{mc}	-0,257	0,045
стеклянных микросфер $V_{ст}$	-0,269	0,094
керамической связки $V_{св}$	0,155	-0,220
Характеристический размер L_x	-0,321	0,189

По величине коэффициента парной корреляции можно оценивать степень влияния параметра структуры круга на его свойства. Результаты расчета коэффициентов парной корреляции показаны в табл. 5.5 и 5.6.

Размеры кругов в связи с их рецептурным составом оказывают очень большое влияние на твердость. Для кругов больших размеров с наружным диаметром от 300 до 600 мм степень влияния по величине коэффициента парной корреляции убывает в последовательности: содержание керамической связки, стеклянных микросфер, корундовых микросфер и абразивного зерна.

Учет характеристического размера L_x не изменяет этой последовательности, а степень влияния самого размера L_x оказывается несущественной ($R = 0,046$). Это можно объяснить тем, что для исследованного диапазона кругов диаметром 300...600 мм размер L_x изменяется от 301 до 509,9 мм или в 1,7 раза, что меньше, чем изменение исследованных параметров абразивной массы.

Для диапазона шлифовальных кругов диаметром от 34 до 600 мм изменение размера L_x составило 34,4...605,3 мм или 17,6 раз, что сразу отразилось на результатах корреляционного анализа. Последо-

вательность убывания степени влияния параметров состава круга на его твердость изменяется: содержание абразивного зерна, стеклянных микросфер, керамической связки и корундовых микросфер, а характеристический размер L_x оказывает наиболее сильное влияние на твердость ($R = 0,341$).

Аналогичным образом проявляется влияние масштабного фактора на стабильность твердости: чем больше изменение L_x в исследованных группах шлифовальных кругов, тем больше его влияние на среднеквадратичное отклонение глубины лунки. Для кругов с диаметром 300...600 мм это влияние оценивается величиной коэффициента парной корреляции 0,189, а для кругов 34...600 мм – 0,321. Соответственно изменяется и последовательность параметров состав круга по степени их влияния на стабильность твердости.

Учитывая, что статистика для кругов диаметром от 34 до 600 мм с характеристическим размером L_x более полно учитывает связь состава абразивной массы с твердостью круга и ее стабильностью, именно для этого случая целесообразно рассмотреть корреляционную матрицу исследованных параметров (табл. 5.7).

Из корреляционной матрицы (табл. 5.7) следует, что статистически значимыми комбинациями по взаимному влиянию на твердость круга и ее стабильность являются парные комбинации зерно–связка и связка–корундовые микросферы. Наиболее сильное влияние на твердость круга оказывает масштабный фактор инструмента во взаимосвязи с корундовыми и стеклянными микросферами, а также с керамической связкой, а на стабильность твердости – в комбинации с абразивным зерном, стеклянными микросферами и керамической связкой.

В табл. 5.8 сведены разработанные математические модели связи твердости кругов и ее стабильности с параметрами состава их абразивной массы и характеристическим размером L_x . Модели представлены в виде линейного логарифмиче-

ского полинома с учетом и без учета масштабного фактора для двух групп исследованных шлифовальных кругов.

Обращает внимание, что учет масштабного фактора в виде размера L_x уменьшает удельный вес неучтенных факторов (на примере кругов с диаметрами 34...600 мм).

Из анализа разработанных моделей следует также важный вывод, что масштабный фактор оказывает статистически значимое влияние на твердость круга и ее стабильность – с увеличением размеров шлифовальных кругов при прочих равных условиях увеличивается глубина лунки (следовательно, уменьшается степень твердости) и увеличивается ее средне-квадратичное отклонение (следовательно, уменьшаются стабильность твердости в объеме инструмента).

5.7. Корреляционная матрица параметров состава круга, твердости и ее СКО

Параметр круга	Выходной параметр твердости	Корреляционная матрица				
		V_3	$V_{мс}$	$V_{ст}$	$V_{св}$	L_x
V_3	h_l	1	–0,424	0,112	–0,541	0,007
	σ_h	1	–0,412	0,161	–0,551	0,226
$V_{мс}$	h_l	–0,424	1	–0,161	0,579	0,129
	σ_h	–0,412	1	–0,244	0,696	0,087
$V_{ст}$	h_l	0,112	–0,161	1	–0,466	0,224
	σ_h	0,161	–0,244	1	–0,453	0,219
$V_{св}$	h_l	–0,541	0,579	–0,466	1	–0,209
	σ_h	–0,551	0,696	–0,453	1	–0,242
L_x	h_l	0,077	0,129	0,224	–0,209	1
	σ_h	0,226	0,087	0,219	–0,242	1

5.8. Математические модели связи твердости и ее стабильности с параметрами состава и характеристическим размером круга

Модель связи	Характеристики адекватности модели		
	КМК	Остаточная дисперсия	F-отн.
Для шлифовальных кругов диаметром 300...600 мм			
$\ln h_{\pi} = 0,884 - 0,869 \ln V_3 + 0,506 \ln V_{MC} + 0,202 \ln V_{CT} - 0,752 V_{CB}$	0,679	0,612	4,708
$\ln h_{\pi} = 1,003 - 0,892 \ln V_3 + 0,505 \ln V_{MC} + 0,728 \ln V_{CT} - 0,754 V_{CB} + 0,020 \ln L_x$	0,679	0,641	3,597
$\ln \sigma_h = 4,635 + 1,921 \ln V_3 + 0,948 \ln V_{MC} + 0,794 \ln V_{CT} - 0,612 V_{CB}$	0,645	0,729	2,142
$\ln \sigma_h = 2,467 \ln V_3 - 1,928 + 0,792 \ln V_{MC} + 0,033 \ln V_{CT} - 0,328 V_{CB} + 0,685 \ln L_x$	0,454	1,082	0,573
Для шлифовальных кругов диаметром 16...600 мм			
$\ln h_{\pi} = 0,060 \ln V_{MC} - 0,208 - 1,050 \ln V_3 + 0,01 \ln V_{CT} - 0,282 V_{CB}$	0,370	0,976	0,912
$\ln h_{\pi} = 0,698 - 0,989 \ln V_3 - 0,06 \ln V_{MC} - 0,014 \ln V_{CT} - 0,171 V_{CB} + 0,094 \ln L_x$	0,471	0,919	1,253
$\ln \sigma_h = 1,238 + 1,101 \ln V_3 - 1,296 \ln V_{MC} + 0,128 \ln V_{CT} - 0,990 V_{CB}$	0,588	0,763	2,376
$\ln \sigma_h = 0,587 + 1,220 \ln V_3 - 1,158 \ln V_{MC} - 0,115 \ln V_{CT} + 0,896 V_{CB} + 0,076 \ln L_x$	0,602	0,788	1,932

5.9. Степень влияния параметров состава и характеристического размера круга на его твердость

Параметр состава и размер круга	Коэффициент парной корреляции при диаметре круга, мм	
	16...600	300...600
Размер зерна A_3	-0,257	-0,491
Относительное содержание:		
абразивного зерна V_3	-0,266	-0,110
корундовых микросфер V_{mc}	0,043	0,131
стеклянных микросфер $V_{ст}$	0,099	-0,140
керамической связки $V_{св}$	-0,069	-0,358
Характеристический размер L_x	0,341	0,046

Обобщенная статистическая модель твердости кругов и ее стабильности с учетом масштабного фактора. Введение в структуру математических моделей твердости высокопористых кругов, ее стабильности и размера абразивных зерен A_3 в сочетании с характеристическим размером L_x дает более полное описание параметров шлифовального инструмента, так как известно, что зернистость оказывает большое влияние на его технологические и эксплуатационные свойства.

В данном разделе представлены результаты корреляционного и регрессионного анализа глубины лунки h_l и ее среднеквадратичного отклонения в зависимости от размера зерна A_3 и относительного объемного содержания в круге абразивного зерна V_3 , корундовых V_{mc} и стеклянных микросфер $V_{ст}$, а также керамической связки $V_{св}$. Компьютерное моделирование проводилось для двух диапазонов размеров шлифовальных кругов диаметрами 16...600 мм и 300...600 мм с

учетом масштабного фактора через характеристический размер круга L_x .

Диапазон изменения исследованных параметров состава абразивной массы и входных характеристик моделирования представлен в табл. 5.4 и 5.5.

Результаты корреляционного анализа параметров круга, его твердости и ее стабильности представлены в табл. 5.9 и 5.10.

Как ожидалось, степень влияния размера зерна A_3 на твердость и ее стабильность во всех исследованных случаях оказывается достаточно большой. Для расширенного диапазона размеров инструмента (диаметр от 16 до 600 мм) по степени влияния на твердость размер зерна A_3 ($R = 0,257$) стоит после характеристического размера L_x ($R = 0,341$) и относительного содержания в круге абразивного зерна V_3 ($R = 0,266$), а по степени влияния на стабильность твердости ($R = 0,166$) превосходит содержание керамической связки $V_{св}$ ($R = 0,155$) и абразивного зерна V_3 ($R = 0,107$).

5.10. Степень влияния параметров состава и характеристического размера круга на стабильность его твердости

Параметр состава и размер круга	Коэффициент парной корреляции при диаметре круга, мм	
	16...600	300...600
Размер зерна A_3	0,166	0,212
Относительное содержание:		
абразивного зерна V_3	0,107	0,075
корундовых микросфер V_{mc}	-0,257	0,045
стеклянных микросфер $V_{ст}$	-0,269	0,339
керамической связки $V_{св}$	0,155	-0,220
Характеристический размер L_x	-0,321	0,189

В целом по убыванию степени влияния на твердость круга его параметры с учетом масштабного фактора распределяются в следующей последовательности: характеристический размер L_x , содержание абразивного зерна V_3 , размер абразивного зерна A_3 , содержание стеклянных микросфер $V_{ст}$, керамической связки $V_{св}$ и корундовых микросфер V_{mc} .

По степени влияния на среднеквадратичное отклонение лунки последовательность параметров круга изменяется: характеристический размер L_x , содержание стеклянных микросфер $V_{ст}$, корундовых микросфер V_{mc} , размер абразивного зерна A_3 , содержание керамической связки $V_{св}$ и абразивного зерна V_3 .

Результаты корреляционного анализа показали, что масштабный фактор является преобладающим среди других параметров состава круга по влиянию на твердость высокопористых шлифовальных кругов и ее стабильность. Очень важно также отметить, что чем шире исследуемый диапазон размеров шлифовальных кругов, тем более явным образом прояв-

ляется влияние характеристического размера L_x на твердость и ее стабильность. Так, для диапазона диаметров кругов 300...600 мм величина коэффициентов корреляции с твердостью и СКО равна 0,046 и 0,189 соответственно, а для более расширенного диапазона кругов от 16 до 600 мм эти значения возрастают: 0,341 и 0,321 соответственно. Это является дополнительным подтверждением необходимости учета масштабного фактора инструмента при разработке рецептурного состава высокопористой абразивной массы в целом, а в его качестве рассматривать характеристический размер круга L_x .

Влияние масштабного фактора на твердость и ее стабильность проявляется не только самостоятельно, но и во взаимосвязи с другими параметрами круга, хотя и в меньшей степени, чем влияние абразивного зерна, корундовых и стеклянных микросфер и керамической связки.

Все варианты разработанных с помощью ЭВМ математических моделей в виде логарифмических полиномов с раз-

5.11. Математические модели связи твердости и ее стабильности с параметрами состава и характеристическим размером круга

Модель связи	Характеристики адекватности модели		
	КМК	Остаточная дисперсия	F-отн.
Для шлифовальных кругов диаметром 300...600 мм			
$\ln h_{\eta} = 1,734 - 0,363 A_3 + 0,298 \ln V_3 + 0,618 \ln V_{\text{MC}} + 0,299 \ln V_{\text{CT}} - 0,631 V_{\text{CB}}$	0,755	0,512	5,571
$\ln h_{\eta} = 1,382 - 0,374 A_3 - 0,222 \ln V_3 + 0,624 \ln V_{\text{MC}} + 0,279 \ln V_{\text{CT}} - 0,624 V_{\text{CB}} + 0,060 \ln L_x$	0,756	0,536	4,439
$\ln \sigma_h = 4,128 + 0,15 A_3 + 1,637 \ln V_3 + 0,823 \ln V_{\text{MC}} + 0,766 \ln V_{\text{CT}} - 0,615 V_{\text{CB}}$	0,651	0,785	1,621
$\ln \sigma_h = 2,399 + 0,189 \ln A_3 + 1,947 \ln V_3 + 0,574 \ln V_{\text{MC}} + 0,01 \ln V_{\text{CT}} - 0,343 V_{\text{CB}} + 0,622 \ln L_x$	0,466	1,174	0,463
Для шлифовальных кругов диаметром 16...600 мм			
$\ln h_{\eta} = 0,310 - 0,134 A_3 - 0,763 \ln V_3 + 0,088 \ln V_{\text{MC}} - 0,007 \ln V_{\text{CT}} - 0,104 V_{\text{CB}}$	0,385	1,006	0,767
$\ln h_{\eta} = 0,259 - 0,113 A_3 - 0,748 \ln V_3 - 0,034 \ln V_{\text{MC}} - 0,02 \ln V_{\text{CT}} - 0,024 V_{\text{CB}} + 0,092 \ln L_x$	0,479	0,953	1,045
$\ln \sigma_h = 1,79 + 0,131 \ln A_3 + 0,847 \ln V_3 - 1,350 \ln V_{\text{MC}} - 0,121 \ln V_{\text{CT}} + 0,841 V_{\text{CB}}$	0,591	0,803	1,828
$\ln \sigma_h = 0,986 + 0,1 \ln A_3 + 1,02 \ln V_3 - 1,206 \ln V_{\text{MC}} - 0,110 \ln V_{\text{CT}} + 0,785 V_{\text{CB}} + 0,073 \ln L_x$	0,604	0,834	1,531

мером L_x и без него приведены в табл. 5.11, где также представлены статистические характеристики адекватности моделей. В соответствии с представленными моделями, с увеличением габаритов высокопористого инструмента при постоянном его рецептурном составе увеличивается глубина лунки, т.е. уменьшается твердость и возрастает среднеквадратичное ее отклонение, т.е. снижается стабильность твердости в объеме инструмента.

Рассмотрим в качестве примера два крайних размера исследованных шлифовальных кругов $1\ 16 \times 16 \times 6$ ($L_x = 22,6$ мм) и $1\ 600 \times 80 \times 203$ ($L_x = 605,3$ мм). В соответствии с расчетными моделями при увеличении характеристического размера круга с 22,6 до 605,3 мм или в 26,8 раз при постоянном составе абразивной массы твердость круга должна измениться в 1,23 раза, а ее стабильность – на 18 %.

По ГОСТ 18118–79 (в ред. 1981 г.), однако, регламентировано допустимое изменение глубины лунки $h_l \pm \Delta h_l$ в пределах степени твердости не более 4...8 % от среднего значения h_l , и величина возможного рассеяния глубины лунки зависит от степени твердости (для более твердых кругов со степенью С...СТ больше, чем для более мягких кругов со степенью М...СМ).

Таким образом, расчетная оценка рассеяния глубины лунки существенно больше, чем регламентируется стандартом, что приводит к ситуации, когда твердость инструмента изменяется на одну или две степени от ожидаемой. Поэтому становится очевидным, что разработка рецептурного состава высокопористых шлифовальных кругов должна обязательно учитывать масштабный фактор инструмента.

5.3. АКУСТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ СТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ ВЫСОКОПОРИСТЫХ ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ

Акустический контроль абразивного инструмента, как уже отмечалось в главе 1, является универсальным и неразрушаю-

щим методом оценки его физико-механических свойств и, в частности, твердости. Учитывая многообразие существующих и несопоставимых между собой методов определения твердости механическим воздействием на поверхность инструмента, акустический контроль представляется альтернативой им как удобная и единая методологическая основа контроля качества абразивного инструмента различных производителей.

В России, в отличие, от других стран этим методом, например, определяется твердость высокопористых кругов для различных операций шлифования замков турбинных лопаток газотурбинных двигателей в авиационной промышленности. Для шлифовальных кругов зернистостью 10...25 и с номерами структуры 10...12, изготовленных на основе порообразователей в виде молотых фруктовых косточек, в зависимости от требований к операции обработки вместо общепринятой степени твердости строго регламентирован только звуковой индекс. Такая оценка твердости шлифовальных кругов по ЗИ начинает применяться и на ответственных операциях в автомобилестроении. Например, для шлифования кулачков распределительного вала рекомендуется высокопористый круг на основе молотых фруктовых косточек из электрокорунда белого 25А зернистостью 16 со звуковым индексом 37...39.

Поэтому важно знать не только физическую природу акустического контроля, но также степень достоверности и область его рациональной применимости для оценки физико-механических свойств абразивного инструмента.

Теория акустического контроля.

Акустический метод контроля основан на физических закономерностях прохождения звуковых волн через твердое тело. Из законов механики следует, что любое звуковое возмущение распространяется в сплошной среде со скоростью

$$C_l = \sqrt{\frac{E}{\gamma}}, \quad (5.7)$$

которая связана со свойствами среды через модуль упругости Юнга E и плотность γ .

Выражение (5.7) является решением классического волнового уравнения, которое описывает распространение звука в среде.

Скорость распространения звуковых волн также связана с длиной λ волны и частотой f следующей зависимостью:

$$C_l = \lambda f, \quad (5.8)$$

$$f = \frac{1}{T}, \quad (5.9)$$

где T – период колебаний.

Частота f является частотой собственных колебаний колебательной системы, в качестве которой рассматривается абразивный инструмент. Она определяется свойствами данной системы и природой ее границ.

В отличие от частоты собственных колебаний f скорость распространения звуковых волн C_l не зависит от формы и размеров изделия и наряду с модулем упругости E является физической константой материала.

При акустическом контроле абразивного инструмента в формуле (5.8) длину звуковой волны λ заменяют на параметр F , называемый коэффициентом формы. Его величина обратна величине λ и зависит от формы и размеров контролируемого изделия, а также от вида возбуждающих колебаний. Тогда скорость распространения звуковых волн определяется выражением

$$C_l = \frac{f}{F},$$

которое лежит в основе акустического контроля структурного состояния абразивного инструмента.

Скорость прохождения звуковой волны через твердое тело определяется его свойствами и, прежде всего, его объемным строением, наличием и мощностью препятствий, отражающих или поглощающих звук в данной среде.

В отечественных приборах типа "Звук" акустический контроль производится по измеренной частоте f или времени десяти периодов T собственных колебаний абразивного инструмента с последующим вычислением скорости распространения акустических волн C_l . Скорость C_l определяется делением частоты собственных колебаний f на частотный коэффициент формы инструмента F , который зависит от его размеров, или делением временного коэффициента формы F_1 на значение времени десяти периодов собственных колебаний T .

Процедура измерений и вычислений указанных величин регламентирована ГОСТ 25961–83 (в ред. 1990 г.). По значению приведенной скорости распространения акустических волн C_l определяется ЗИ, а по величине ЗИ – ориентировочно возможная твердость абразивного инструмента (см. табл. 1.8).

Абразивные инструменты, являясь особой группой материалов, по своему объемному строению представляют собой квазиоднородную дискретно-композиционную структуру. Степень их сплошности и гомогенности строения сильно зависит от объемного содержания абразива: чем его больше в инструменте, тем ближе он по своему строению к сплошной среде.

Физические положения методологии акустического контроля основаны на закономерностях прохождения звука через сплошную среду, особенности которой могут быть идентифицированы ее упругими свойствами и плотностью. Физическая акустика в этой связи исследует возмущения в строении твердого тела, препятствующие прохождению звуковой волны, на микрокристаллическом и атомном уровнях. К таким возмущениям относят взаимодействия точечных дефектов (межузельных атомов, вакансий, межузельных пар, двойных вакансий) и линейных дефектов, т.е. дислокаций, с акустическими и механическими волнами [92].

Указанные физические положения акустического контроля применимы к

абразивному инструменту в той степени, насколько его строение можно отождествлять по сплошности со строением твердых тел типа металлы, твердые неметаллические материалы, например, минералы, полупроводники и другие аналоги, у которых отсутствует упругая анизотропия.

Когда акустическая волна распространяется через металл, она вызывает движение атомов решетки вдоль направления распространения волны или перпендикулярно ей в зависимости от того, являются ли волны продольными или поперечными (сдвиговыми). Скорость звука и плотность остаются независимыми величинами: первая из них определяется из акустических свойств системы, а ее плотность из граничных условий, таких, как ее масса. В некоторых случаях (например, при прохождении звука через мантию Земли – объекта, чрезвычайно далекого по своей объемной структуре от твердых, сплошных материалов) выполняется соотношение

$$\frac{C_L}{\gamma} = \text{const}.$$

Определение твердости высокопористых шлифовальных кругов. Основываясь на приведенном теоретическом анализе, можно утверждать, что акустические свойства колебательной системы, подобной абразивному инструменту, тесно связаны с его рецептурным составом.

Акустический метод контроля абразивных инструментов, по мнению авторов разработки соответствующих стандартов [31], предполагает связь их упругих параметров: частоты собственных колебаний f , скорости распространения акустических волн C_L и модуля упругости E с рецептурными характеристиками, эксплуатационными свойствами и, в том числе, с твердостью, измеренной механическими методами. Скорость прохождения акустических волн обладает большей информативностью о свойствах абразивных инструментов, определяется с более высокой точностью и меньшей трудоемкостью,

чем, например E -модуль, применяемый за рубежом (см. п. 3.2) [31].

Частота собственных колебаний, как характеристика колебательной системы, зависит от ее конструкции и, следовательно, от формирующего эту конструкцию рецептурного состава.

В описываемых исследованиях рассматриваются 2 варианта составов для электрокорунда и карбида кремния. В первом варианте, условно названном высокопористыми кругами с открытой структурой, рецептурная композиция включает в себя силикатные микросферы и молотые оливковые косточки. В другом варианте, условно определенном как круги с закрытой структурой, в состав в качестве порообразователя вводятся только корундовые микросферы.

Указанное напоминание важно для оценки демпфирующих свойств рассматриваемых вариантов шлифовальных кругов как колебательной системы. Вариативность объемно-структурного строения исследованных высокопористых кругов дало хорошую возможность оценить в широком диапазоне связь частоты собственных колебаний инструмента с его твердостью. При этом важно получить прямые доказательства того, насколько в условиях дискретности распределения рецептурных компонентов высокопористого круга звуковой индекс по ГОСТ 25961–83 (ред. 1990 г.) адекватно отражает его твердость, измеренную пескоструйным методом в соответствии с ГОСТ 18118–79 (ред. 1981 г.).

Абразивный инструмент как колебательная система представляет собой стохастическую дискретную конструкцию, в которой разнородные по своим физико-механическим и, прежде всего, звукопоглощающим свойствам зерна и микросферы соединены керамической связкой. Форма и размеры свободного пространства между ними зависят от наличия или отсутствия выгорающих порообразователей. Все это вместе взятое в каждом конкретном случае предопределяет вполне

конкретное значение частоты собственных колебаний.

Последующий анализ основан на результатах экспериментального измерения частоты собственных колебаний f на шлифовальных кругах различного рецептурного состава, но одного типоразмера: все круги были прямого профиля с размерами $350 \times 32 \times 76$ с частотным коэффициентом формы $F = 1,019 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1}$. Из-за постоянства формы и размеров исследованных кругов в качестве вариативной характеристики их структурных свойств принята измеренная частота собственных колебаний.

Измерения частоты собственных колебаний проводились с помощью прибора "Звук-202". Твердость по глубине лунки контролировалась пескоструйным методом при давлении 0,05 МПа.

Прямые эксперименты подтверждают наличие зависимости частоты собственных колебаний высокопористых шлифовальных кругов от их рецептурного состава, т.е. от объемного строения. Практический интерес представляет, прежде всего, точность оценки твердости высокопористого инструмента акустическим контролем, поэтому одновременно анализировалась связь твердости по глубине лунки с частотой собственных колебаний круга.

В табл. 5.12 представлены обобщенные статистические модели связи частоты собственных колебаний круга f от его состава для различных групп в соответствии с табл. 4.6. Модели разработаны в виде линеаризованных функций, которые формализуют монотонный характер влияния каждого параметра объемного строения высокопористого инструмента на величину f . В табл. 5.12 приведены также модели связи глубины лунки $h_{\text{л}}$ с теми же параметрами рецептурного состава. Для каждого рецептурного состава определялись 3 значения f (было изготовлено 3 круга одного состава) и 18 значений $h_{\text{л}}$ (для этих же кругов).

Из анализа данных табл. 5.12 обращает внимание, прежде всего, то, что степень влияния того или иного компонента состава круга сильно зависит от группы инструмента. Она также разнится в зависимости от материала абразива: роль связи в формировании значения f для кругов на основе электрокорунда белого более существенна (коэффициенты парной корреляции 0,969 и 0,598), чем для инструмента на основе карбида кремния зеленого (–0,167 и –0,411). Эта аналогия сохраняется и при моделировании твердости по глубине лунки.

Если усреднить коэффициенты парной корреляции, то можно получить обобщенное представление о степени влияния компонентов рецептурного состава высокопористых кругов различных составов на величину f и $h_{\text{л}}$. По убыванию степени влияния на частоту собственных колебаний круга они тогда располагаются в следующей последовательности: объемное содержание керамической связки $V_{\text{св}}$, молотых фруктовых косточек $V_{\text{к.ф}}$, микросфер $V_{\text{мс}}$, абразивного зерна V_3 и его размеры A_3 .

Для твердости по глубине лунки сохраняется ключевая роль связки, а последовательность изменяется: $V_{\text{св}}$, A_3 , $V_{\text{к.ф}}$, $V_{\text{мс}}$ и V_3 . Эти закономерности справедливы в той мере, насколько оправдана использованная процедура усреднения коэффициентов парных корреляций.

Необходимо особо отметить, что модели, представленные в табл. 5.12, с высокой степенью адекватности (КМК, например, находится в пределах 0,802...0,998) учитывают влияние компонентов рецептурного состава инструмента на его частоту собственных колебаний и твердость, измеренную механическим способом. Этот факт подчеркивает также и высокую степень влияния структурного состояния высокопористого круга на f и $h_{\text{л}}$.

Не всегда влияние компонента состава круга на его твердость и частоту собственных колебаний носит монотонный характер, как это показано на

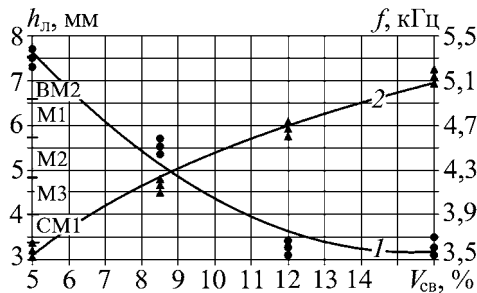


Рис. 5.7. Влияние объемного содержания керамической связки на твердость круга по глубине лунки (1) и его частоту собственных колебаний (2) из электрокорунда белого зернистостью 16 и структурой 12

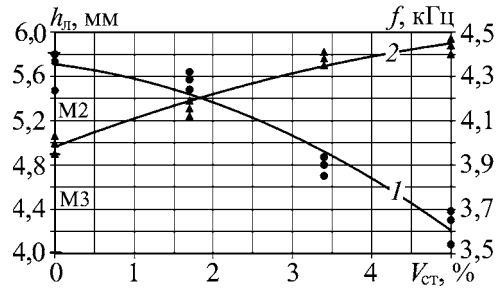


Рис. 5.8. Влияние объемного содержания стеклянных микросфер на твердость по глубине лунки (1) и частоту собственных колебаний (2) для круга зернистостью 16 и структурой 12

рис. 5.7. С увеличением объемного содержания связки уменьшается глубина лунки $h_{л}$ и соответственно возрастает частота собственных колебаний круга f . Аналогичный характер наблюдается при изменении содержания стеклянных микросфер в объеме круга (рис. 5.8), которые вносят дополнительный вклад в упрочнение керамической связки.

Ситуация меняется, если анализировать влияние зернистости электрокорунда белого (рис. 5.9) и номера структуры круга (рис. 5.10). В этих примерах наблюдается немонотонное влияние размера зерна и его объемного содержания на твердость

круга по глубине лунки. Но, если при изменении номера структуры зависимость $f(N)$ зеркально отображает изменение глубины лунки $h_{л}$, то при увеличении размера абразивных зерен частота собственных колебаний шлифовального круга имеет монотонный убывающий характер.

В случае если возрастает средний размер вводимых в инструмент оливковых косточек, то экспериментально наблюдаемый характер изменения $h_{л}$ и f приобретает достаточно сложный и своеобразный вид, но, тем не менее, обе закономерности являются зеркальным отображением друг друга (рис. 5.11).

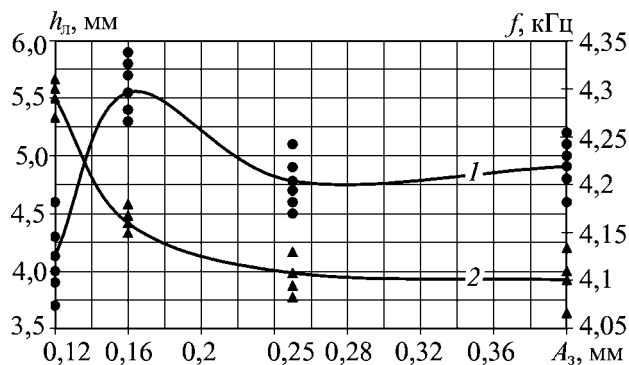


Рис. 5.9. Влияние зернистости электрокорунда белого на твердость по глубине лунки (1) и частоту собственных колебаний (2) круга со структурой 12

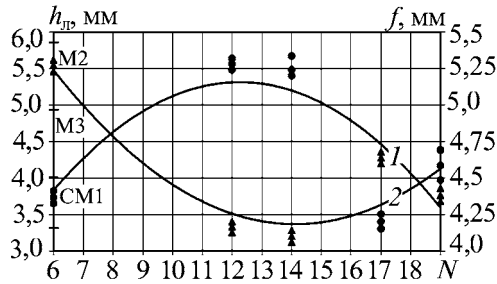


Рис. 5.10. Влияние номера структуры круга зернистостью 16 на его твердость по глубине лунки (1) и частоту собственных колебаний (2)

При увеличении объемного содержания оливковых косточек в круге от 6 до 14 % твердость по глубине лунки практически не выходит за пределы диапазона M1, а по значению ЗИ, рассчитанному по частоте собственных колебаний f , степень твердости уменьшается от M3 до M1. Этими данными подтверждается прогноз, что поры, являясь эффективным барьером для акустических волн, могут искажать реальную картину объемного строения круга. Чем больше пор как физических объектов и больше их размеры, тем менее адекватно соответствие твердости, измеренной механическими методами.

Это утверждение справедливо и для характеристик шлифовальных кругов с повышенной зернистостью (25...40 и более), у которых велика естественная пористость в строении. Неблагоприятное, с точки зрения прохождения акустических волн, сочетание размеров абразивных зерен и пор, содержания невыгорающих порообразователей и керамической связки приводит к несоответствию измеренной твердости до 4 степеней. При этом практически во всех случаях наблюдается адекватный характер закономерностей изменения твердости по глубине лунки и значения ЗИ от рецептурного состава высокопористых шлифовальных кругов.

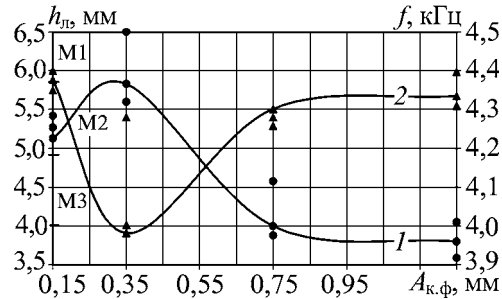


Рис. 5.11. Влияние размера оливковых косточек на твердость по глубине лунки (1) и частоту собственных колебаний (2) для круга зернистостью 16 и структурой 12

Были проведены также измерения частоты собственных колебаний у шлифовальных кругов одного типоразмера и одинакового состава зернистостью 16 и структурой 12, в которых были использованы различные модификации корунда — белый, хромтитанистый, циркониевый и микрокристаллический. Средняя твердость у всех кругов, измеренная пескоструйным методом, составила M3, а измеренная акустическим методом звуковому индексу — CM1.

Для высокопористых кругов из карбида кремния черного марки 48С и зеленого марки 49С анализом выявлена более сложная картина (табл. 5.13). Статистические характеристики рассеяния значений $h_{л}$ и f практически близки друг к другу для кругов одной характеристики, но степень несоответствия по твердости достигает 3 степеней (от CM2 до CT1).

Компьютерной статистической обработкой всех экспериментальных данных для кругов прямого профиля с размерами 350×32×76 с различными рецептурными составами и характеристиками было установлено, что для каждой группы исследованных составов (см. табл. 4.6) имеется своя зависимость частоты собственных колебаний от изменения глубины лунки (рис. 5.12 и 5.13). На рисунках частота собственных колебаний f также интерпре-

5.12. Обобщенные математические модели зависимости частоты собственных колебаний и твердости высокопористых кругов по глубине лунки от их рецептурного состава

Номер группы	Математические модели связи
Для частоты собственных колебаний круга f	
1	$\ln f = 2,186 + 0,043 \ln A_3 - 0,279 \ln V_3 + 0,309 \ln V_{\text{св}} + 0,163 \ln V_{\text{к.ф}} - 0,089 \ln V_{\text{мс}}$
2	$\ln f = 2,701 + 0,023 \ln A_3 + 0,35 \ln V_3 + 0,357 \ln V_{\text{св}} + 0,33 \ln V_{\text{мс}}$
3	$\ln f = 0,055 + 0,024 \ln A_3 - 0,284 \ln V_3 - 0,232 \ln V_{\text{св}} - 0,30 \ln V_{\text{к.ф}} + 0,05 \ln V_{\text{мс}}$
4	$\ln f = 1,229 + 0,020 \ln A_3 - 0,07 \ln V_3 - 0,091 \ln V_{\text{св}} - 0,112 \ln V_{\text{мс}}$
Для твердости по глубине лунки $h_{\text{л}}$	
1	$\ln h_{\text{л}} = 1,182 \ln V_3 - 0,148 \ln A_3 - 0,753 \ln V_{\text{св}} - 0,798 \ln V_{\text{к.ф}} + 0,381 \ln V_{\text{мс}} - 0,584$
2	$\ln h_{\text{л}} = 0,164 \ln V_{\text{мс}} - 0,283 \ln A_3 - 0,211 \ln V_3 - 0,685 \ln V_{\text{св}} - 0,180$
3	$\ln h_{\text{л}} = 0,892 + 0,292 \ln A_3 - 0,174 \ln V_3 - 0,617 \ln V_{\text{св}} + 0,135 \ln V_{\text{к.ф}} - 0,072 \ln V_{\text{мс}}$
4	$\ln h_{\text{л}} = 1,759 - 0,275 \ln A_3 + 0,511 \ln V_3 - 0,200 \ln V_{\text{св}} + 0,302 \ln V_{\text{мс}}$

Продолжение табл. 5.12

Номер группы	Коэффициенты парной корреляции				Оценка адекватности			
	A_3	V_3	V_{cu}	$V_{сф}$	$V_{сc}$	КМК	ОД	F-отн.
Для частоты собственных колебаний круга f								
1	-0,200	-0,236	0,969	-0,064	0,130	0,998	0,007	302,399
2	0,226	0,301	0,598	—	-0,441	0,902	0,325	4,390
3	-0,188	0,412	-0,167	-0,839	-0,291	0,994	0,030	45,628
4	-0,112	0,641	-0,411	—	-0,810	0,853	0,476	2,674
Для твердости по глубине лунки h_n								
1	0,217	0,262	-0,865	0,063	-0,128	0,932	0,207	9,224
2	-0,387	-0,275	-0,578	—	0,328	0,905	0,316	4,532
3	0,520	0,076	-0,272	0,356	0,238	0,878	0,536	2,010
4	-0,539	0,050	-0,165	—	0,137	0,802	0,624	1,805

5.13. Сравнительный анализ твердости по глубине лунки и частоте собственных колебаний высокопористых кругов из карбида кремния черного/зеленого

Характеристика круга	Марка зерна	Твердость по глубине лунки, мм				Частота собственных колебаний, кГц			
		h_n	$\bar{h}_n$	σ_h	Степень твердости	f	$\bar{f}$	σ_f	Степень твердости
Зернистость 12 Структура 10	48C	2,7...3,8	3,0	0,229	CM2	5,97...6,06	6,03	0,041	CT1
	49C	2,9...3,4	3,1	0,178	CM2	6,04...6,07	6,06	0,015	CT1
Зернистость 16 Структура 12	48C	2,8...3,6	3,0	0,189	CM2	5,80...5,87	5,83	0,030	C2
	49C	2,8...3,3	3,01	0,130	CM2	5,85...5,90	5,88	0,023	C2
Зернистость 16 Структура 20	48C	3,4...3,9	3,6	0,218	CM1	5,09...5,14	5,13	0,022	CM1
	49C	3,2...4,9	3,7	0,393	CM1	5,03...5,09	5,06	0,026	CM1

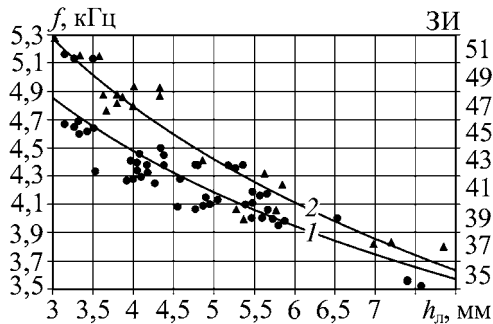


Рис. 5.12. Зависимость частоты собственных колебаний высокопористых кругов из электрокорунда белого с открытой (1) и закрытой (2) структурами от глубины лунки

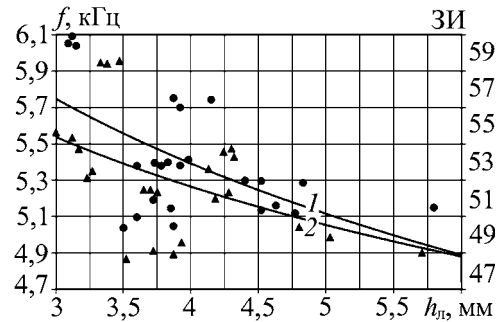


Рис. 5.13. Зависимость частоты собственных колебаний высокопористых кругов из карбида кремния зеленого с открытой (1) и закрытой (2) структурами от глубины лунки

тирована через значения звукового индекса ЗИ.

Модели связи $f(h_{\text{л}})$ для каждой из исследованных групп высокопористого инструмента и характеристики качества их аппроксимации приведены в табл. 5.14.

Обращает внимание высокий уровень коррелированности экспериментальных данных с расчетной моделью $f(h_{\text{л}})$ для высокопористых кругов на основе электрокорунда белого. Большой разброс

опытных точек при сглаживании экспериментальных данных по кругам на основе карбида кремния зеленого стал причиной снижения коэффициента корреляции КМК и других критериев качества адекватности статистических моделей.

Общим для всех полученных моделей связи $f(h_{\text{л}})$ является тенденция на сближение значений частоты собственных колебаний при увеличении глубины лунки и соответственно уменьшение твердости

5.14. Связь частоты собственных колебаний высокопористых шлифовальных кругов с их твердостью по глубине лунки

Номер группы	Наименование группы инструмента	Модели связи	Качество адекватности модели			
			КМК	ОД	F-отн.	Δ , %
1	Из электрокорунда белого с открытой структурой	$f = 6,851h_{\text{л}}^{-0,307}$	0,883	0,22	177,069	2,91
2	Из электрокорунда белого с закрытой структурой	$f = 8,007h_{\text{л}}^{-0,373}$	0,960	0,784	270,177	2,41
3	Из карбида кремния зеленого с открытой структурой	$f = 7,313h_{\text{л}}^{-0,221}$	0,566	0,680	10,828	3,41
4	Из карбида кремния зеленого с закрытой структурой	$f = 6,739h_{\text{л}}^{-0,178}$	0,479	0,770	6,861	3,80

высокопористого инструмента. Для степеней твердости МЗ и мягче значения f практически одинаковы соответственно для кругов из электрокорунда и карбида кремния независимо от их строения.

Таким образом, можно констатировать, что у высокопористых кругов различного состава имеется тесная корреляция между частотой собственных колебаний и соответственно скоростью распространения звуковых волн и значением звукового индекса, с одной стороны, и глубиной лунки, измеренной пескоструйным методом, с другой стороны. Чтобы определить степень твердости абразивного инструмента, необходимо в соответствии с ГОСТ 18118–79 (ред. 1981 г.) помимо глубины лунки знать зернистость абразивных зерен. При изменении зернистости, например, от 16 до 50 при одной степени твердости глубина лунки может изменяться до 2,2 раз.

В проведенном анализе прямым образом не учитывалась зернистость A_3 как характеристика дискретности структурного строения шлифовального круга. Так же, как и ее другая характеристика – объемное содержание зерен в инструменте V_3 .

В табл. 5.15 представлены результаты статистической обработки экспериментальных данных по влиянию параметров характеристики (h_L , V_3 и A_3) высокопористых кругов различного состава на значение ЗИ. Полученные модели более полно и адекватно, чем модели в табл. 5.14, отражают связь ЗИ с характеристикой инструмента. Кроме того, удельный вес неучтенных факторов в моделях табл. 5.15 уменьшается в 2 раза для электрокорундовых кругов и немного (на 10 %) для карборундового инструмента.

Корреляционным анализом установлено, что глубина лунки h_L безусловно во всех случаях более тесно коррелирована со значением звукового индекса, чем размер зерен и их объемное содержание. В свою очередь, содержание зерна V_3 является статистически более значимым фак-

тором при акустическом контроле, чем их размер A_3 .

После изучения расчетных моделей можно заключить, что вклад A_3 (для максимальной зернистости 40) в величину звукового индекса не превышает 4...6 %, а V_3 (для структуры 10) – 6...18 %. Наибольшие значения у высокопористых кругов на основе карбида кремния зеленого.

Информативность величины звукового индекса ЗИ как характеристики физико-механических свойств высокопористого инструмента, следовательно, включает в себя в большей степени прочность связи абразивных зерен в виде глубины лунки h_L и в меньшей степени – их объемное содержание V_3 и размер A_3 .

Сравнение большого массива экспериментальных и производственных данных по звуковому индексу высокопористых кругов различных типоразмеров, рецептурных составов и характеристик, и соответствующего ему степени твердости (см. табл. 1.8) со степенью твердости этих же кругов по ГОСТ 18118–79 (в ред. 1981 г.) показало, что в большинстве случаев они идентичны, хотя и наблюдаются отдельные "выбросы" на 1...3 степени.

Акустический контроль является очень удобным методом установления степени твердости абразивного инструмента. На основании проведенных исследований можно использовать справочные рекомендации ГОСТ 25961–83 (ред. 1990 г.) (см. табл. 1.8) для определения только по величине ЗИ соответствующей степени твердости.

Можно также рекомендовать обобщенные модели для оценки глубины лунки по величине ЗИ:

для высокопористых кругов из электрокорунда белого

$$\ln h_L = 10,053 - 2,266 \ln \text{ЗИ} ,$$

для высокопористых кругов из карбида кремния

$$\ln h_L = 7,304 - 1,504 \ln \text{ЗИ} .$$

5.15. Влияние характеристики состава высокопористых кругов на значение их звукового индекса

Наименование группы инструмента	Модели связи	Коэффициенты парной корреляции			Оценка адекватности		
		h_i	V_j	A_s	КМК	ОД	F-отн.
Из электрокорунда белого с открытой структурой	$\ln 3И = 4,074 - 0,274 \ln h_i - 0,066 \ln V_j - 0,001 A_s$	-0,952	-0,537	-0,196	0,961	0,102	24,128
Из электрокорунда белого с закрытой структурой	$\ln 3И = 4,343 - 0,402 \ln h_i + 0,013 \ln V_j - 0,046 \ln A_s$	-0,967	0,305	0,224	0,981	0,052	42,878
Из карбида кремния зеленого с открытой структурой	$\ln 3И = 4,599 - 0,315 \ln h_i + 0,191 \ln V_j - 0,003 \ln A_s$	-0,661	0,645	-0,410	0,961	0,107	20,140
Из карбида кремния зеленого с закрытой структурой	$\ln 3И = 4,419 - 0,287 \ln h_i + 0,174 \ln V_j - 0,060 \ln A_s$	-0,483	0,641	-0,112	0,913	0,233	8,370

Коэффициент корреляции этих моделей равен 0,91 и 0,57 при средней ошибке 8,8 и 10,8 % соответственно.

Определив глубину лунки и зная зернистость круга, можно более точно определить его степень твердости, чем по величине ЗИ. Модели применимы для структур 10...22 и дают тем большую точность, чем мягче высокопористые круги.

5.4. НЕУРАВНОВЕШЕННОСТЬ МАСС ВЫСОКОПОРИСТЫХ ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ

Неуравновешенность масс или дисбаланс следует рассматривать как самостоятельную характеристику или свойство шлифовального круга, которая определяется так же, как и другие его характеристики или свойства, рецептурным составом и технологией изготовления.

Величина дисбаланса фиксируется в статическом состоянии инструмента (обычно на динамометрическом столе), а его влияние (всегда негативное) проявляется в динамике при шлифовании.

Неуравновешенность масс и ее влияние на процесс шлифования. Неуравновешенность масс или дисбаланс становятся значимой характеристикой вращающегося тела в виде шлифовального круга в случае, когда его ось вращения не совпадает с центром его массы (см. раздел 1.1). Причин указанного несовпадения может быть несколько, и они будут подробно рассмотрены в последующем изложении. Сейчас же рассмотрим проявление дисбаланса с позиций механики сплошных сред.

Абразивный круг состоит из бесчисленного множества элементарных масс m_i , удаленных на расстояние r_i от оси вращения и на расстояние l_i от плоскости, проходящей через центр масс круга. Возникающая при шлифовании сила инерции вращающегося инструмента пропорциональна квадрату угловой скорости вращения ω и его статическому моменту

$$\bar{P} = \omega^2 \sum m_i \bar{r}_i = \omega^2 m \bar{r}_s, \quad (5.10)$$

где m – масса круга, а r_s – расстояние центра масс круга от оси его вращения.

Результирующий момент всех сил инерции также связан с угловой скоростью вращения, центробежным моментом инерции относительно оси вращения и плоскости, нормальной к оси вращения и проходящей через центр масс:

$$\bar{M} = \omega^2 \sum m_i [\bar{r}_i \bar{l}_i] = \omega^2 J_{rl}. \quad (5.11)$$

В теоретической механике за меру статической неуравновешенности или статического дисбаланса приняты эквивалентные величины

$$m_{DC} = m r_s = G r_s, \quad (5.12)$$

где масса m отождествляется с весом G .

Мерой динамической неуравновешенности или динамического дисбаланса вращающегося тела служит величина J_{rl} или пропорциональная ей величина, выраженная через вес

$$m_{DI} = \sum m_i [\bar{r}_i \bar{l}_i] = \sum G_i [\bar{r}_i \bar{l}_i]. \quad (5.13)$$

В качестве характеристики неуравновешенности масс шлифовальных кругов используется величина его статического дисбаланса (5.12).

Формирующиеся при вращении круга векторы $\bar{P}$ и $\bar{M}$ не направлены в одну сторону, а образуют между собой некоторый угол. Разнонаправленность действия усложняет их нейтрализацию при шлифовании.

Наиболее заметным проявлением неуравновешенности шлифовального круга является возбуждение автоколебательного процесса в технологической системе резания от пульсирующей центробежной нагрузки. Амплитуда и частота колебаний зависит от величины дисбаланса, скорости вращения круга и жесткости системы

станок–круг–деталь и, в малой степени, от характеристики инструмента, прежде всего, от его твердости и демпфирующих свойств связки.

При глубинном шлифовании высокопористыми кругами наличие неуравновешенности инструмента сокращает его размерную стойкость до 60 %, способствует появлению макронеровностей в виде волнистости, следов "дробления" на шлифуемой поверхности, т.е. дефектов, недопустимых при финишных операциях [53]. Кроме того, из-за дисбаланса круга повышается средняя контактная температура на 100...150 °С, что в ряде случаев становится решающим фактором появления прижогов и трещин.

Ю.С. Степанов установил, что неуравновешенность шлифовального круга проявляется и при формировании тонкой кристаллической структуры поверхностного слоя обработанной детали из цементированных и закаленных сталей. Рост дисбаланса круга при постоянных условиях шлифования способствует увеличению размеров блоков когерентного рассеяния, измеренных рентгенографическим методом.

Работа неуравновешенного круга становится источником непрерывного колебательного процесса в системе резания с нестационарными условиями шлифования по скорости съема материала, характеру и интенсивности изнашивания инструмента и термодинамическому воздействию на обрабатываемую поверхность. В свою очередь, нестабильность шлифования провоцирует тенденцию к увеличению дисбаланса шлифовального круга и как следствие, к прогрессирующей дестабилизации всех выходных параметров процесса.

Неуравновешенность масс шлифовального круга оказывает также определенное влияние на его разрывную прочность, о чем более подробно изложено в следующем разделе книги.

Чтобы устранить или уменьшить вредное влияние дисбаланса круга на

процесс шлифования, инструмент, как правило, подвергается уравниванию или балансировке.

При статической балансировке шлифовального круга уравнивание достигается при выполнении условия

$$m\bar{r}_s = \sum m_i \bar{r}_i = 0, \quad (5.14)$$

а при динамической балансировке – за счет реализации другого условия уравнивания

$$\bar{J}_{rl} = \sum m_i [\bar{r}_i \bar{l}_i] = 0. \quad (5.15)$$

После статической балансировки сохраняется негативное влияние на процесс шлифования действующего момента сил инерции $\bar{M}$ (5.11), а после динамической балансировки сохраняется действие результирующей силы инерции $\bar{P}$ (5.10).

Для обеспечения комфортных условий шлифования с повышенными требованиями по точности и качеству обработки необходимо одновременно выполнять оба условия уравнивания. Это технически достаточно сложновыполнимая задача, учитывая, что координаты центра масс шлифовального круга изменяются после его размерного износа и особенно при неравномерном изнашивании, от перераспределения охлаждающей жидкости в объеме и отходов шлифования на периферии инструмента и др.

Природа неуравновешенности масс высокопористых шлифовальных кругов. Неуравновешенность массы шлифовального круга – это проявление неоднородной его плотности по объему инструмента. Интегрально она оценивается через смещение центра масс (тяжести) относительно оси вращения круга. Используемая для практических целей величина неуравновешенности масс трансформирована к размерам инструмента.

Формирование неуравновешенности масс происходит на всех этапах технологического процесса изготовления шлифовальных кругов. Ее величина, в конечном

итоге, как аддитивная характеристика определяется составом абразивной массы, порядком и схемой смешивания ее исходных компонентов, условиями формования (прежде всего выравнивания массы в пресс-форме), принятой технологией механической обработки всех поверхностей абразивного инструмента и точностью их формообразования резанием. Температурный режим и условия нагрева при высокотемпературном обжиге, по-видимому, тоже могут оказать влияние на возникновение флуктуаций плотности в объеме абразивного инструмента.

После анализа возможных причин формирования дисбаланса при изготовлении шлифовальных кругов можно сделать вывод, что неуравновешенность масс связана с действием двух независимых друг от друга факторов.

Часть причин, которые влияют на внутреннее строение шлифовального круга, можно условно объединить в качестве внутреннего фактора. К нему следует отнести состав абразивной массы и процессы ее смешивания, прессования и высокотемпературного обжига. Этот фактор является причиной локальных отклонений от однородности объемной структуры инструмента в виде флуктуаций плотности массы.

Другая группа причин формирования дисбаланса в качестве внешнего фактора обусловлена внешним воздействием на заготовку шлифовального круга при ее механической обработке. В результате этого воздействия формообразование абразивного инструмента происходит с отклонениями по форме, взаимного расположения и размерам всех обрабатываемых поверхностей.

Анализируя причины формирования неоднородного характера распределения плотности по объему абразивного инструмента, их можно объединить по двум уровням проявления:

1. На микроуровне за счет флуктуаций плотности абразивной массы, которая связана с ее составом и технологичностью изготовления.

2. На макроуровне, когда формируется разнородность по объему за счет неточного (некачественного) выравнивания абразивной массы в пресс-форме, образования разновысотности (разнотолщинности) при прессовании и смещении центра массы относительно оси отверстия круга при его механообработке.

Дисбаланс, обусловленный проявлением внешнего фактора, может быть устранен или сведен к минимуму за счет одной балансировки перед установкой на станке. Дисбаланс шлифовального круга от внутреннего фактора случайным образом распределен по объему инструмента и будет непрерывно изменяться за счет смещения центра неуравновешенных масс, изменения их величины по мере изнашивания круга и уменьшения его диаметра.

Роль внутреннего фактора в формировании дисбаланса шлифовального круга в процессе его изготовления практически не исследована, поэтому на этом вопросе остановимся более подробно.

В процессе обжига происходит расплавление связки и формирование непрочных мостиков связи между абразивными зернами и твердыми компонентами абразивной массы – невыгорающими порообразователями, наполнителями и т.п. с одновременной их деформацией и разрушением (сублимацией) в результате выгорания выгорающих порообразователей (например, фруктовых косточек, нафталина и др.) и выхода продуктов сгорания из объема инструмента. При охлаждении абразивной массы начинается процесс затвердевания связки с уменьшением ее объема и формированием прочных мостиков связи между твердыми компонентами. Как следствие, происходит их втягивание внутрь объема инструмента, где связка еще находится в полужидком состоянии. Объемная каркасная структура зерно-наполнитель-связка-поры деформируется, уменьшаясь в объеме. Структура из относительно однородной с однородно распределенными компонентами абразив-

ной массы под действием многих случайных факторов превращается в гетерогенную. Неоднородность формирующейся структуры проявляется в виде локальных флуктуаций плотности – зон повышенной твердости и центров неуравновешенных масс.

Природа появления флуктуаций плотности связана с механизмом перемещения твердых компонентов абразивной массы при ее затвердевании. Под действием возникающих внутренних напряжений твердые частицы начинают перемещаться, причем скорость их движения связана с размерами: более мелкие частицы двигаются более быстро (например, мелкие фракции зернового состава и наполнителя), а крупные частицы – медленней; появляется вероятность их столкновения и образования конгломерата из двух и более частиц. Эта вероятность будет тем больше, чем больше плотность абразивной массы и соответственно концентрация абразивных зерен, наполнителей и связки в объеме шлифовального круга.

Таким образом, для более плотных структур шлифовальных кругов большее содержание компонентов, определяющих их плотность, становится предпосылкой формирования в объеме инструмента локальных очагов повышенной плотности, где, как правило, фиксируется и более высокая твердость в сравнении со средними величинами.

Для более высоких номеров структур с пониженным содержанием абразивного зерна, но с более высокой концентрацией порообразователя и связки, вероятность развития флуктуационных явлений сохраняется высокой. Но в составе формирующихся флуктуаций плотности содержатся более легкие компоненты, чем абразивные зерна.

При рассмотрении на микроуровне механизма формирования неуравновешенности масс с помощью элементной модели было показано, как влияет на ее изменение зернистость и номер структуры шлифовального круга в зависимости от объемной деформации (см. п. 3.5).

По совокупности причин, влияющих на формирование, и по самой природе неуравновешенности масс абразивного инструмента как статистической характеристики его разнотности, дисбаланс шлифовального круга можно определить как диссеминационную величину (лат. *disseminatio* – рассеяние, распространение). Она является как бы "плавающей" характеристикой, которая изменяет свои координаты и величину в зависимости от изменения размеров инструмента. Дестабилизирующим фактором становятся условия шлифования за счет дополнительного перераспределения масс на периферии шлифовального круга: охлаждающей жидкости и шлама.

Описанная физическая модель подтверждается прямым экспериментом на высокопористых абразивных кругах с размерами 350×32×76 из электрокорунда белого зернистостью 16 со структурой 22, изготовленных на основе корундовых микросфер и фруктовых косточек.

При увеличении в составе абразивной массы только объемного содержания корундовых микросфер в 1,5 раза наблюдалось повышение неуравновешенности массы шлифовального круга с 5,3 г (колебание для трех исследованных кругов составило 4...7 г) до 12,7 г (11...15 г) или в 2,4 раза при снижении его степени твердости с CM2 до CM1.

В этой связи можно заключить, что при увеличении количества тугоплавких микросфер, их миграция, как более легких и более мелких по размерам, чем абразивные зерна (в 10 и 1,5 раза соответственно), в процессе обжига и остывания круга играет значимую роль в формировании его объемной структуры и распределении плотности.

О формировании флуктуаций плотности в виде скоплений абразивных зерен в шлифовальных кругах нормальной структуры известно уже давно, как и о неоднородном характере распределения твердости в объеме инструмента.

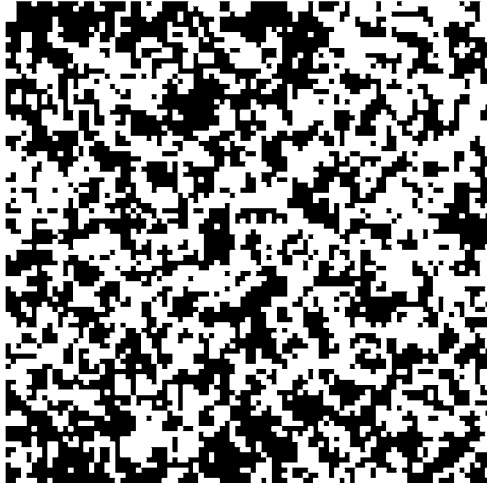


Рис. 5.14. Изображение поверхности абразивного инструмента в бинарном виде

Е.В. Болонова на прозрачных шлифах кругов на вулканитовой связке наблюдала скопление абразивных зерен гнездами [13].

С помощью современных методик можно получить не только достоверную картину структурного строения абразивного инструмента, но и наблюдать объемное распределение плотности. В работе [11] описан метод бесконтактного исследования структурного строения абразивного инструмента на керамических связках. Его оценка осуществляется по изображению поверхности, полученному с помощью видеокамеры с последующей специальной компьютерной обработкой. На рис. 5.14 показано изображение поверхности шлифовального круга у электрокорунда марки 91А твердостью СМ2 (зернистость и структура неизвестны), где черные пятна представляют собой поры, а светлые – зерна со связкой. Автор разделил отсканированную поверхность шлифовального круга на 16 равных участков, где определил относительную площадь пор на каждом участке.

В целом поверхность абразивного инструмента представляет собой статистически пеструю картину, где наглядно

наблюдается неоднородность в распределении твердых компонентов и открытых пор. Для локально измеренных зон шлифовального круга колебание средних значений относительных площадей, занятых зернами и связкой, составило от 47 до 58 % с соответствующим рассеянием плотности на 16 исследованных участках до 25 % на поверхности, равной 1 см².

Совместно с Хемницким техническим университетом (Германия) была исследована объемная структура высокопористых кругов из электрокорунда белого зернистостью 12 с твердостью от ВМ2 до М3 со структурами 14 и 16 методом компьютерной томографии [140]. Исследуемый слой круга просвечивался сфокусированным пучком рентгеновских лучей. При этом толщина исследуемого слоя круга может варьироваться, а также может произвольно выбираться количество слоев в любом месте шлифовального круга. С помощью жестко соединенных между собой рентгеновской трубки и приборов детектирования проводят контроль определенного слоя круга, поворачивая измерительную систему вокруг неподвижного круга. Ослабление рентгеновского излучения зависит от распределения плотности по объему круга. Данные по измерению представлены в НУ-единицах (HOUNSFIELD UNITS), причем с повышением плотности увеличивается поглощение излучения, и наоборот.

Шлифовальный круг просвечивался в радиальном направлении, т.е. перпендикулярно к его оси, кроме того, за один процесс измерения можно было исследовать круг по всей его высоте. С помощью специальной программы построена сетка изображения с элементарными ячейками размером 6×4 мм. Всего получено более 1600 элементарных ячеек, которые обеспечили достаточную дифференциацию дискообразной формы шлифовального круга.

Результаты компьютерной обработки представлены в виде трехмерных диаграмм распределения плотности по объе-

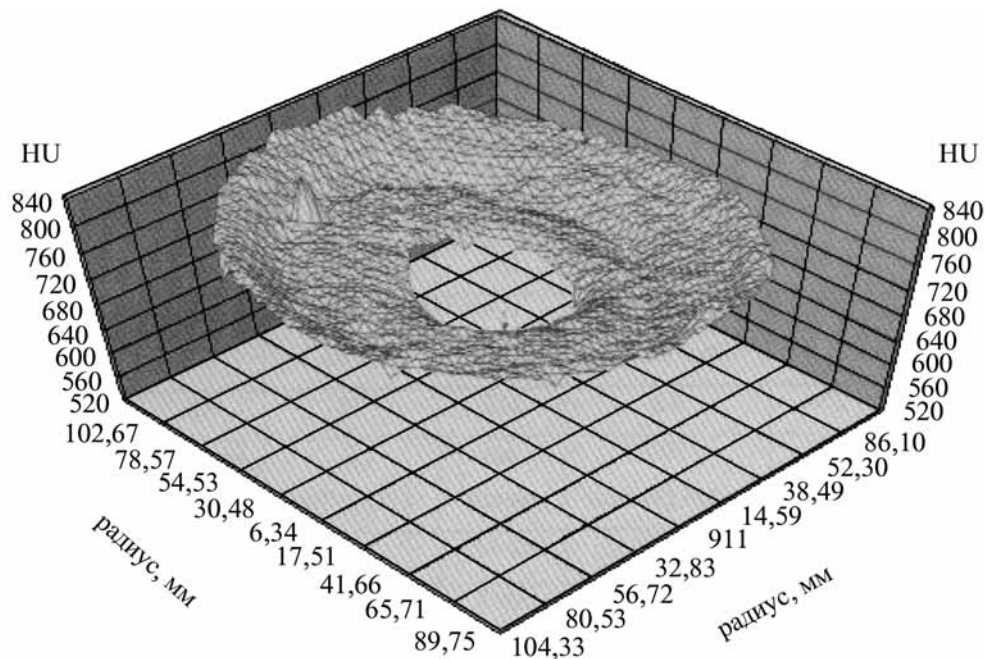


Рис. 5.15. Трехмерная диаграмма распределения плотности абразивной массы в высокопористом круге структуры 14

му высокопористого круга 14-й структуры (рис. 5.15) и шлифовального круга нормальной структуры (рис. 5.16), а также соответственно на рис. 5.17 и 5.18 в виде их контурных графических изображений.

На указанных рисунках плотность графически представлена интенсивностью затемнения: чем темнее участок круга, тем больше его плотность.

Прямые измерения плотности абразивной массы также подтверждают их неоднородный характер распределения по объему шлифовального круга. У исследованного высокопористого круга, кроме того, наблюдалась зона повышенной плотности у периферии инструмента (рис. 5.17).

При анализе причин неуравновешенности масс шлифовальных кругов важно разобраться, прежде всего, с методологическим аспектом его экспериментального определения. Эта характеристика абразивного инструмента имеет ярко выраженный стохастический характер, обуслов-

ленный вероятностными условиями ее формирования.

По определению, неуравновешенность масс шлифовального круга равна его массе (или весу), умноженной на величину смещения (эксцентриситет) e центра масс относительно оси вращения инструмента. Тогда измеряемый дисбаланс m_D находится в тождестве с эксцентриситетом по следующему соотношению:

$$Ge = m_D R, \quad (5.16)$$

где R – радиус шлифовального круга.

Если выразить параметры круга через его объем W и плотность γ , то получим уравнения связи дисбаланса круга с его эксцентриситетом:

$$m_D = e\gamma \frac{W}{R}, \quad (5.17)$$

$$e = \frac{m_D}{\gamma} \frac{R}{W}. \quad (5.18)$$

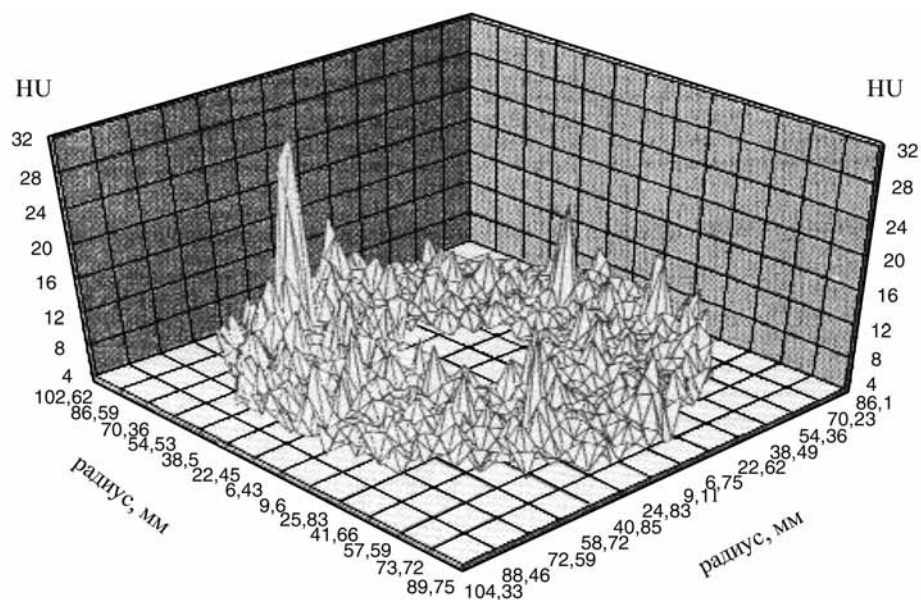


Рис. 5.16. Трехмерная диаграмма распределения плотности абразивной массы в шлифовальном круге нормальной структуры

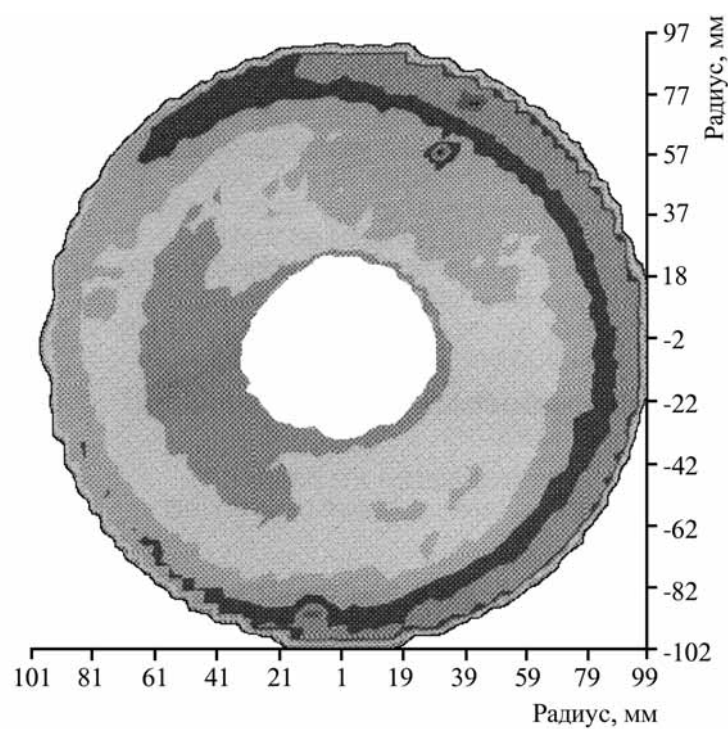


Рис. 5.17. Контурное графическое изображение распределения плотности в высокопористом круге

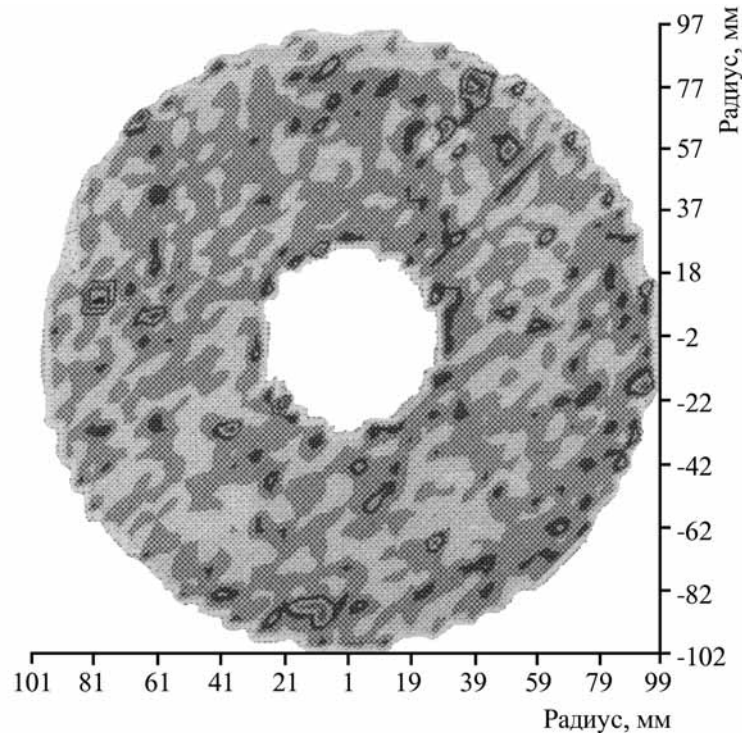


Рис. 5.18. Контурное графическое изображение распределения плотности в круге нормальной структуры

При постоянных размерах шлифовального круга его неуравновешенность масс будет прямо пропорциональна смещению его центра масс от оси вращения и плотности абразивной массы. При одинаковом эксцентриситете e дисбаланс будет меньше для кругов с высокими номерами структуры: чем больше пористость, тем меньше неуравновешенность масс.

Таким образом, природа дисбаланса заключается во взаимосвязанном влиянии плотности шлифовального круга и формирования его эксцентриситета смещения центра масс. Из этого определения следует, что величина дисбаланса шлифовальных кругов, включая высокопористый инструмент, прямо зависит от состава абразивной массы и технологических условий их изготовления на всех этапах производственного цикла. Смещение цен-

тра масс относительно оси круга начинает формироваться при формообразовании заготовки инструмента прессованием. На этом этапе очень важны процедура выравнивания абразивной массы в пресс-форме, точность формообразующего движения пуансона, формы, размеров и установки пресс-формы на рабочем столе пресса.

Нарушение указанных требований может привести к появлению разности ΔH заготовки шлифовального круга до 0,1...0,5 мм. Величина формируемого дисбаланса в этой связи прямо пропорциональна разности высот заготовки

$$m_D = \frac{\pi}{16} \Delta H \gamma (D^2 - d^2) \quad (5.19)$$

и не зависит от высоты прессуемого круга.

5.16. Экспериментальные данные по взаимосвязанному влиянию свойств структуры

A_3 , мм	$\frac{V_3, \%}{N}$	Твердость круга по Маккензену					ЗИ/ степень твердости
		Рассеяние твердости, мм	Δh_n , мм	$\bar{h}_n$	σ_h , мм	КВ, %	
0,10	$\frac{38,8}{12}$	3,7...5,1	1,4	4,25	0,39	9,18	41,9/M3
		3,7...4,3	0,6	4,08	0,22	5,39	42,1/M3
		4,0...4,1	0,1	4,05	0,05	1,23	42,3/M3
0,16	$\frac{38,6}{12}$	5,0...5,8	0,8	5,48	0,36	6,57	40,82/M2
		5,1...5,9	0,8	5,57	0,33	5,92	40,82/M2
		5,2...6,0	0,8	5,60	0,17	3,04	40,92/M2
0,25	$\frac{38,7}{12}$	4,0...5,2	1,2	4,55	0,26	5,71	40,04/M2
		4,0...5,8	1,8	4,90	0,45	9,18	40,53/M2
		4,0...5,8	1,8	4,90	0,45	9,18	40,24/M2
0,40	$\frac{38,8}{12}$	4,1...5,2	1,1	4,77	0,29	6,08	39,94/M2
		4,6...5,7	1,1	5,05	0,52	10,30	40,53/M2
		4,5...5,2	0,7	4,92	0,31	6,30	40,24/M2
0,16	$\frac{50}{6}$	3,5...4,0	0,5	3,68	0,05	1,36	51,52/C1
		3,6...3,9	0,3	3,73	0,05	1,34	52,01/C1
		3,5...4,0	0,5	3,73	0,14	3,75	51,72/C1
0,16	$\frac{34,4}{14}$	5,1...5,7	0,6	5,48	0,28	5,11	40,43/M2
		4,9...6,2	1,3	5,67	0,43	7,58	39,84/M2
		4,9...5,8	0,9	5,45	0,29	5,32	40,24/M2
0,16	$\frac{32,0}{15}$	4,4...5,6	1,2	4,97	0,52	10,46	—
		4,6...6,8	2,2	5,27	0,79	14,99	—
		4,3...5,4	1,1	4,92	0,21	4,27	—
0,16	$\frac{29,0}{17}$	3,2...3,8	0,6	3,50	0,31	8,86	45,53/CM1
		3,1...3,5	0,4	3,33	0,09	2,70	45,53/CM1
		3,3...3,6	0,3	3,43	0,14	4,08	45,34/CM1
0,16	$\frac{25,5}{18}$	3,7...4,3	0,6	3,97	0,14	3,53	43,28/M3
		4,2...4,5	0,3	4,38	0,05	1,14	42,98/M3
		3,8...4,7	0,9	4,17	0,09	2,16	42,98/M3
0,16	$\frac{38,6}{12}$	6,2...8,5	2,3	7,40	0,54	7,30	34,84/M1
		7,0...7,8	0,8	7,40	0,22	2,97	34,94/M1
		7,0...8,5	1,5	7,57	0,58	7,66	34,51/M1
0,16	$\frac{38,9}{12}$	3,0...3,5	0,5	3,27	0,08	2,45	45,63/CM1
		3,1...3,5	0,4	3,32	0,08	2,41	45,93/CM1
		3,0...3,4	0,4	3,15	0,17	5,40	45,83/CM1
0,16	$\frac{39,7}{11}$	3,0...3,5	0,5	3,27	0,22	6,73	50,34/C1
		3,4...2,5	1,1	3,67	0,52	14,17	50,34/C1
		2,9...3,5	0,6	3,15	0,12	3,81	50,64/C1

круга на дисбаланс в зависимости от зернистости,
и содержания связки

Деформация круга, %				m_D , Г	v_p , м/с
ε_D	ε_H	ε_d	ε_w		
0,40	1,20	0,43	2,07	22	106,6
0,40	1,02	0,43	1,90	18	104,7
0,41	1,57	0,32	2,44	10	110,2
0,26	0,47	0,34	1,03	6	95,4
0,25	1,29	0,25	1,84	16	95,5
0,25	1,20	0,43	1,76	10	97,3
0,14	1,48	0,45	1,80	15	86,4
0,12	1,57	0,47	1,87	16	90,0
0,14	1,85	0,50	2,18	18	84,5
0,01	1,69	0,63	1,76	16	80,8
0,03	2,05	0,63	2,17	13	79,0
0	2,34	0,43	2,39	11	80,9
-0,04	0,37	0,09	0,30	16	104,8
-0,05	-0,28	0,11	-0,37	17	113,9
-0,04	-0,47	0,14	-0,53	25	112,1
0,74	2,86	1,26	4,47	11	93,5
0,77	2,57	1,46	4,27	8	89,8
0,78	2,67	1,44	4,37	5	95,3
1,72	4,90	3,11	8,56	4	83,5
1,71	6,17	3,04	9,77	2	78,0
1,74	5,0	3,27	8,72	4	83,4
5,25	13,45	8,36	23,38	7	71,5
5,09	13,33	8,36	23,01	4	83,7
5,13	14,16	8,04	23,78	5	71,5
6,50	13,43	6,01	25,31	12	77,4
6,44	13,33	5,74	25,09	15	82,6
6,44	13,74	6,06	25,47	11	77,4
0,18	1,02	0,02	1,40	14	84,3
0,18	1,49	0,23	1,89	10	82,5
0,15	1,48	0,23	1,81	21	82,5
0,45	1,58	0,56	2,54	2	104,4
0,46	0,38	0,61	1,39	17	102,5
0,51	2,13	0,61	3,22	17	102,5
0,72	2,67	0,92	4,21	12	115,8
0,69	3,30	0,88	4,76	10	110,3
0,67	2,41	0,83	3,84	5	106,6

К примеру, для заготовки высокопористого круга со структурой 12 с размерами $D = 355$ мм, $d = 74$ мм указанная погрешность разновысотности обеспечивает увеличение дисбаланса от 4,3 г (при $\Delta H = 0,1$ мм) до 21,3 г (при $\Delta H = 0,5$ мм) при разновысотности по объему инструмента до 3...5 % в зависимости от его высоты.

В процессе высокотемпературного обжига абразивной массы в результате разнообразных и сложных физико-химических явлении в конечном итоге формируются две группы флуктуаций в объемной структуре инструмента – плотности и твердости. Очаги или локальные зоны с повышенной твердостью (за счет повышенного содержания связки) и плотностью массы (в основном за счет скопления абразивных зерен как наиболее тяжелых составляющих абразивной массы) статистически неоднородно распределены в объеме шлифовального круга. Флуктуации твердости ответственны за нестабильность распределения твердости, а флуктуации плотности – за дисбаланс круга. Из описанного механизма следует, что оба эти негативных фактора должны проявляться за весь период работы шлифовального круга, по мере изнашивания которого на его рабочей поверхности будут появляться новые очаги либо с повышенной твердостью, либо с повышенной неуравновешенностью масс.

Вопреки ожиданиям, эти два явления, несмотря на общность механизма их формирования, оказываются не связанными между собой: величина дисбаланса не обуславливается ни средней твердостью в объеме инструмента, ни ее статистическими характеристиками распределения – среднеквадратичным отклонением и коэффициентом вариации.

Корреляционный анализ связи дисбаланса с тремя указанными статистическими характеристиками твердости показал, что между значением дисбаланса и среднеквадратичным отклонением твердости (по глубине лунки) в объеме шлифовального круга коэффициент парной

корреляции составляет 0,061, а с коэффициентом вариации твердости всего 0,009. При этом теснота связи дисбаланса со средней твердостью круга оценивается значением 0,231. Из этих данных следует, что дисбаланс и нестабильность твердости в объеме шлифовального круга являются статистически независимыми параметрами его качества.

Приведенные результаты являются частью экспериментального исследования большого числа высокопористых кругов с размерами $350 \times 32 \times 76$ из электрокорунда белого зернистостью от 10 до 40, твердостью от ВМ1 до СТ1 со структурами от 10 до 19. Круги на керамической связке были изготовлены на основе корундовых микросфер и фруктовых косточек.

В табл. 5.16 представлены экспериментальные данные по взаимосвязанному влиянию технологических свойств высокопористых кругов и круга со структурой 6, зернистости и структурного строения инструмента на величину дисбаланса. Для каждого из трех кругов одного рецептурного состава приведены конкретные значения его твердости по глубине лунки со статистическими характеристиками по диапазону рассеяния Δh , математическому ожиданию $\bar{h}_d$, среднеквадратичному отклонению σ_h и его коэффициенту вариации, а также твердости, измеренной акустическим методом. Даны также значения деформации круга после обжига по наружному ε_D и внутреннему ε_d диаметрам, высоте круга ε_H и его объемной деформации ε_w .

Диапазон исследованных свойств высокопористых кругов и их теснота связи по коэффициенту парной корреляции с величиной дисбаланса приведены в табл. 5.17. По специальной методике каждого также рассчитан удельный вклад каждого из исследованных параметров в величину неуравновешенности масс высокопористых кругов.

Из корреляционного анализа следует, что дисбаланс имеет наибольшее значение

коэффициента парной корреляции с объемной деформацией круга. В свою очередь, дифференциация влияния составляющих объемной деформации высокопористого инструмента показала, что наибольший вклад в дисбаланс вносит деформация по внутреннему диаметру круга ε_d , затем в порядке убывания – деформация по наружному диаметру ε_D и по высоте ε_H .

Процесс деформации при высокотемпературном обжиге обусловлен также формированием открытой пористости за счет выгорания фруктовых косточек и сопутствующей потерей массы ΔM . Коэффициент парной корреляции между ними составляет 0,916, что свидетельствует о высокой степени тесноты связи. Вследствие взаимосвязанности протекания процессов порообразования выгоранием и пластической деформации круга на его величину дисбаланса также оказывает влияние и потеря массы при обжиге: коэффициент парной корреляции между ними равен 0,380.

Наибольшее влияние на формирование дисбаланса из рассмотренных характеристик шлифовального круга оказывает его деформация при обжиге – 27,8 % и объемное содержание абразивного зерна (структура) – 18,5 %. В меньшей степени влияет плотность круга – 6,9 %, которая коррелирована с содержанием зерна, и зернистостью круга – 2,9 %.

Указанные выводы, которые основаны на результатах статистического обобщения экспериментальных данных, полностью совпадают с теоретическим прогнозом, полученным в п. 3.5 на основе элементной модели строения абразивного инструмента.

Для исследованных характеристик кругов разработана обобщенная статистическая модель связи в виде логарифмического полинома:

$$\ln m_D = 8,010 + 0,287 \ln A_3 - 0,940 \ln V_3 - 1,327 \ln h_d + 0,0001 \ln \sigma_h - 0,712 \ln \varepsilon_w - 5,696 \ln \gamma. \quad (5.20)$$

Из модели (5.20) следует, что с увеличением зернистости и твердости круга его дисбаланс также возрастает, а при увеличении номера структуры, напротив, дисбаланс круга уменьшается. При анализе и применении данной модели надо также учитывать внутренние связи между самими характеристиками инструмента. Например, объемное содержание зерна V_3 в круге оказывает сильное влияние на его деформацию ε_w (коэффициент парной корреляции равен – 0,956) и плотность γ (0,866). В свою очередь, сильно коррелированы между собой твердость по глубине лунки h_d и ее среднеквадратичное отклонение σ_h (0,663), объемная деформация и плотность круга (–0,778).

По значению коэффициента множественной корреляции (0,672) полученной модели связи m_D с характеристиками круга, можно заключить, что удельный вес неучтенных факторов в данной модели составляет 54,9 %. По данным табл. 5.17 неучтенное влияние других факторов технологии изготовления высокопористых кругов составляет 42,8 %. Неучтенное влияние можно отнести к точности механической обработки шлифовальных кругов, которая окончательно "оформляет" величину их неуравновешенности масс.

Несмотря на условность использованной расчетной оценки влияния факторов строения и изготовления высокопористых кругов на их дисбаланс, полученные значения, в общем, правильно отражают реальность производства абразивного инструмента по величине его дисбаланса.

Обобщая приведенные статистические данные, в целом можно сделать заключение, что на формирование дисбаланса высокопористых шлифовальных кругов равное влияние оказывают причины, обуславливающие изменение внутреннего строения инструмента, и причины внешнего воздействия при его механической обработке. Однако если учесть коррелированность некоторых исследован-

5.17. Взаимосвязь характеристик высокопористых кругов с величиной их дисбаланса

Характеристика инструмента		Коэффициент парной корреляции с m_D	Удельный вклад в m_D , %
Параметр	Диапазон изменения		
Размер зерна A_z , мм	0,1...0,4	0,171	2,9
Объемное содержание зерна, V_z	0,255...0,379	0,43	18,5
Твердость по глубине лунки h_d , мм	3,15...7,57	0,237	0,9
Среднее квадратичное отклонение σ_h , мм	0,05...0,79	-0,042	0,2
Объемная деформация круга ϵ_w , %	1,03...25,47	-0,527	27,8
Плотность γ , г/см ³	1,54...2,03	0,263	6,9
Дисбаланс m_D , г	2...25	—	—

ных характеристик высокопористых кругов, то влияние внутреннего фактора их изготовления необходимо скорректировать в сторону уменьшения.

Для понимания природы формирования дисбаланса были статистически обработаны его измеренные значения у двух партий шлифовальных кругов. Одна партия кругов в количестве 84 штук имела типоразмер 1 300×40×76 с характеристикой 25A 25 CM1 10 K, другая партия в количестве 54 штук – типоразмер 5 350×40×76 с характеристикой 25A 25 CM2 10 K. В первой партии инструмента рассеяние величины дисбаланса составило 3...18 г, во второй партии – 2...26 г.

Характер распределения дисбаланса у этих двух партий шлифовальных кругов показан на рис. 5.19. С достаточно хорошим приближением можно принять, что распределение дисбаланса близко к нормальному. При таком характере распределения средняя величина (или математическое ожидание) дисбаланса инструмента определяется статистически значимыми факторами его производства, т.е. рецеп-

турным составом и точностью изготовления. Влияние случайных возмущающих факторов производства приводит к случайному рассеянию дисбаланса относительно его среднего значения в виде симметричной функции распределения.

Влияние состава и характеристик высокопористых кругов на их дисбаланс.

Для прогнозирования возможной величины дисбаланса высокопористого шлифовального круга необходимо знать влияние компонентов его рецептурного состава на формирование неуравновешенности масс.

На примере изготовления кругов типоразмера 1 350×32×76 различного состава и характеристик были проведены прямые исследования по оценке влияния зернистости, номера структуры, содержания керамической связки и стеклянных микросфер, размеров и содержания фруктовых косточек и других компонентов состава на величину дисбаланса.

В п. 3.4 и табл. 3.20 описано влияние объемного содержания оливковых и персиковых косточек, корундовых и силикатных микросфер и их композиций на

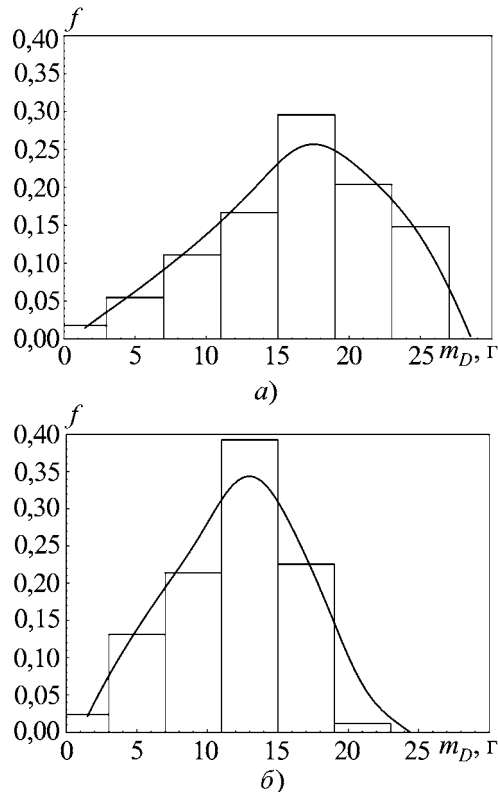


Рис. 5.19. Распределение неуравновешенности масс у шлифовальных кругов прямого профиля с размерами $350 \times 40 \times 127$ (а) и $300 \times 32 \times 76$ (б)

свойства высокопористых кругов, включая их неуравновешенность масс. В зависимости от состава композиций (выгорающий – невыгорающий порообразователь) средняя величина дисбаланса может изменяться от 7 до 23 г, или более чем в 3 раза. Для исследованного типоразмера круга указанный диапазон значений дисбаланса приводит к заметному снижению качества их изготовления: от 1-го до 3-го классов неуравновешенности масс. Наилучшие результаты по величине дисбаланса достигнуты с содержанием по 7 % оливковых молотых косточек и силикатных микросфер.

Экспериментальные данные по величине дисбаланса для одного и того же типоразмера круга в зависимости от его

состава и соответственно эксплуатационной характеристики в отличие от других исследованных свойств имеют чрезвычайно большой диапазон рассеяния. Так, для высокопористых кругов на основе электрокорунда величина дисбаланса изменялась от 2 до 32 г, а на основе карбида кремния – от 2 до 18 г, или в 16 и 9 раз соответственно. Для этих же условий глубина лунки при измерении пескоструйным методом изменялась для корундового инструмента от 2,85 до 7,85 мм или в 2,75 раз, а для карборундовых кругов – от 2,9 до 5,85 мм или в 2 раза. Еще меньше диапазон рассеяния был при измерении другой важной выходной характеристики шлифовальных кругов – их разрывной скорости. Ее значение составило 71,5...139,2 м/с с диапазоном рассеяния в 1,95 раз для высокопористых кругов из электрокорунда и 80,4...126,3 м/с – с диапазоном рассеяния в 1,57 раз для инструмента на основе карбида кремния.

Большая нестабильность значений дисбаланса идентифицируется большими величинами его среднеквадратичных отклонений: от 0,9 до 15,3 г для корундового инструмента и от 1,2 до 6,1 г для кругов из карбида кремния.

Повышенная чувствительность неуравновешенности масс шлифовальных кругов к возмущающему действию разнообразных причин, имеющих случайную природу, приводит к большому разбросу ее значений и затрудняет их прогнозирование. Чтобы свести к минимуму действие дестабилизирующих факторов, при математической обработке экспериментальных данных по дисбалансу была использована процедура рандомизации. Только после этой процедуры возможна линеаризация функций, связывающих величину дисбаланса с рецептурным составом исследованных высокопористых кругов.

Чтобы оценить влияние зернистости круга на его дисбаланс, было изготовлено 12 кругов: по 3 из электрокорунда белого с размерами зерна A_3 0,12; 0,16; 0,25 и 0,4 мм.

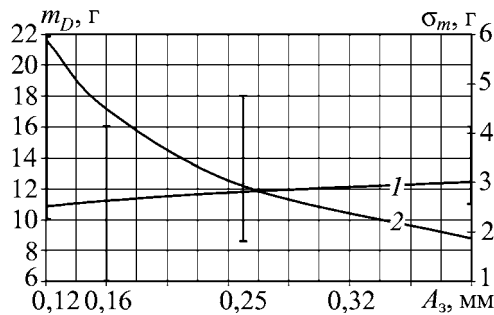


Рис. 5.20. Влияние зернистости электрокорундового круга структуры 12 на дисбаланс (1) и его среднеквадратичное отклонение (2)

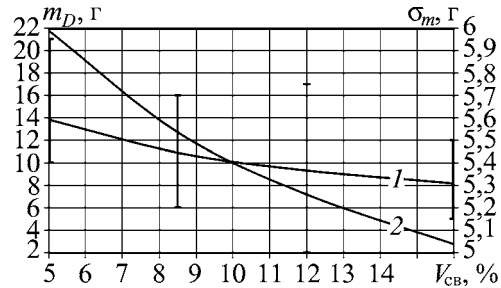


Рис. 5.21. Влияние содержания керамической связки в электрокорундовом круге зернистости 16 и структуры 12 на дисбаланс (1) и его среднеквадратичное отклонение (2)

Все круги имели одинаковый рецептурный состав структуры 12 по содержанию зерна, связки и порообразователей.

В результате изменения зернистости было отмечено заметное изменение значений дисбаланса от 6 до 22 г и степени твердости инструмента от ВМ2 до М3 (средняя глубина лунки составила 4,05...5,57 мм). После сглаживания экспериментальных данных получена функция связи

$$\ln m_D = 5,23 + 0,114 \ln A_3 - 1,533 \ln h_L, \quad (5.21)$$

в которой m_D слабо коррелирована с размерами зерна A_3 ($R = -0,021$) и чуть сильнее с твердостью ($R = -0,427$).

Аналогичным образом были обработаны опытные данные по среднеквадратичным отклонениям дисбаланса σ_m в виде функциональной зависимости

$$\ln \sigma_m = 0,487 \ln h_L - 0,957 \ln A_3 - 1,069, \quad (5.22)$$

где зафиксирована более тесная корреляционная связь с зернистостью ($R = -0,761$) и менее сильная с твердостью ($R = -0,152$).

Для постоянной глубины лунки $h_L = 5$ мм построены зависимости $m_D(A_3)$ и

$\sigma_m(A_3)$, которые представлены на рис. 5.20. На этом же рисунке показаны экспериментально измеренные диапазоны колебания неуравновешенности масс.

При постоянной глубине лунки отмечается незначительное возрастание дисбаланса — на 17,5 % и стабилизация его значений с уменьшением σ_m в 3 раза при увеличении зернистости круга 12-й структуры от 12 до 40. Представленная картина при постоянном значении h_L более корректно отображает связь m_D и σ_m с зернистостью круга.

С увеличением содержания керамической связки от 5 до 16 % объема круга зернистости 16 и структуры 12 наблюдается устойчивая и взаимосвязанная тенденция уменьшения как средних значений дисбаланса на 75 %, так и его среднеквадратичных отклонений почти в 4 раза. Другими словами, увеличение твердости высокопористого круга является благоприятным фактором снижения неуравновешенности масс и стабилизации ее значений (рис. 5.21).

Интересная и важная для производства высокопористого абразивного инструмента закономерность была установлена при анализе влияния объемного содержания зерна V_3 в круге на статические характеристики его неуравновешенности

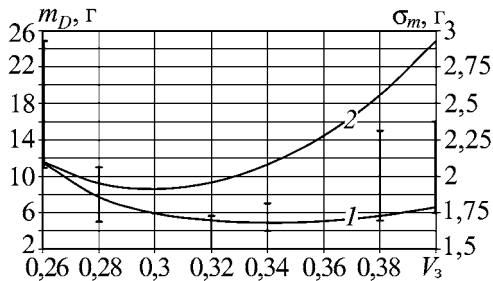


Рис. 5.22. Влияние объемного содержания электрокорундового зерна зернистости 16 на дисбаланс (I) круга и его среднеквадратичное отклонение (2)

масс. При уменьшении относительного значения V_3 от 0,5 (нормальная структура) до фактического значения 0,255 после обжига (структура 18), несмотря на колебания степени твердости круга зернистости 16 от М2 до СМ1 (средняя глубина лунки 3,43...5,67 мм), зависимости $m_D(V_3)$ и $\sigma_m(V_3)$ имеют четко выраженный экстремальный характер:

$$\ln m_D = 13,129 + 1,298 \ln h_{\text{л}} + 25,128 \ln V_3 + 11,676 \ln^2 V_3, \quad (5.23)$$

$$\ln \sigma_m = 5,974 + 1,302 \ln h_{\text{л}} + 12,1 \ln V_3 + 5,005 \ln^2 V_3. \quad (5.24)$$

Корреляционный анализ экспериментальных данных показал высокую степень коррелированности содержания зерна с σ_m ($R = 0,741$) и m_D ($R = 0,424$) и менее тесную связь твердости с этими же величинами (соответственно 0,179 и – 0,203).

Линеаризованные модели $m_D(V_3)$ и $\sigma_m(V_3)$ при постоянной степени твердости МЗ ($h_{\text{л}} = 4,6$ мм) показаны на рис. 5.22. Минимальные прогнозируемые значения неуравновешенности масс для круга из электрокорунда белого зернистости 16

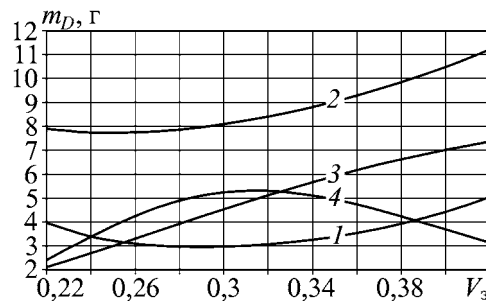


Рис. 5.23. Влияние относительного содержания абразивного зерна на неуровненность масс высокопористых кругов зернистости 16 с глубиной лунки $h_{\text{л}} = 2,5$ мм различного состава

твердостью МЗ соответствуют структуре 14, а ее среднеквадратичного отклонения – структуре 16. При увеличении степени твердости (и уменьшении глубины лунки $h_{\text{л}}$) расчетные значения m_D и σ_m должны уменьшаться в соответствии с моделями (5.23) и (5.24).

При варьировании размерами оливковых косточек, вводимых в электрокорундовый круг зернистости 16 и структуры 12, минимальное значение дисбаланса было отмечено с размером косточек 0,2...0,5 мм. Его среднее значение составило 6 г, что в 1,5...2 раза меньше, чем при введении косточек других исследованных размеров. Для всего диапазона их средних размеров от 0,15 до 1,25 мм среднеквадратичное отклонение дисбаланса практически оставалось постоянным 3...5 г.

При увеличении количества оливковых косточек с размерами 0,2...0,5 мм в объеме круга более чем 6...12 %, стабильность значений дисбаланса заметно снижается: величина σ_m увеличивается более чем в 2,5 раза.

Статистическим анализом комплексного влияния компонентов состава высокопористых кругов из электрокорунда белого на основе выгорающих (оливковые косточки) и невыгорающих (силикатные

микросферы) порообразователей были установлены их корреляционные и регрессионные связи с неуравновешенностью масс и ее среднеквадратичным отклонением.

Обобщение экспериментальных данных позволило по увеличению степени коррелированности с m_D распределить компоненты состава в следующей последовательности: керамическая связка и стеклянные микросферы ($R = -0,395$), зернистость (0,494), содержание силикатных микросфер ($-0,621$), абразивного зерна (0,761) и оливковых косточек (0,817).

Статистическая регрессионная модель связи при этом имеет следующий вид:

$$\ln m_D = 5,264 + 0,366 \ln A_3 - 0,355 \ln V_{\text{св}} - 0,215 \ln V_{\text{мс}} - 5,078 \ln V_{\text{к.ф}} + 27,418 \ln V_3 + 9,455 \ln^2 V_3, \quad (5.25)$$

из которой следует, что неуравновешенность масс возрастает с увеличением зернистости и уменьшается при увеличении остальных компонентов высокопористого инструмента с экстремумом функции $m_D(V_3)$ для кругов структуры 14.

При статистической оценке степени влияния состава высокопористых кругов на стабильность неуравновешенности масс указанная степень тесноты связи возрастает в следующей последовательности: зернистость ($R = 0,19$), содержание связки и стеклянных микросфер ($-0,382$), зерна (0,69), силикатных микросфер (0,698) и оливковых косточек (0,748).

По регрессионной модели связи среднеквадратичное отклонение дисбаланса будет возрастать при увеличении содержания зерна, силикатных микросфер и оливковых косточек, а уменьшаться для кругов повышенной зернистости и с большим содержанием связки.

Доминирующее влияние на формирование дисбаланса и стабильность его

значений оказывают содержание абразивного зерна, выгорающего и невыгорающего порообразователей, т.е. основные компоненты состава, ответственные за изготовление высокопористого абразивного инструмента.

Для практических целей эксплуатации высокопористых кругов с заданными зернистостью, твердостью и номером структуры полезно иметь априорную оценку их неуравновешенности масс, чтобы предвидеть возможные негативные последствия при шлифовании. С этой целью были разработаны математические модели связи неуравновешенности масс высокопористых кругов 4 исследованных групп рецептурных составов с их зернистостью, твердостью и структурой (табл. 5.18).

Выявленный характер влияния характеристики круга на дисбаланс статистически адекватен только для 1 и 2-й, а также для 3 и 4-й групп инструмента, а в целом для высокопористых кругов на основе электрокорунда и на основе карбида кремния они принципиально отличаются. Только при увеличении твердости во всех случаях дисбаланс уменьшается, а характер влияния зернистости и объемного содержания зерна у корундовых и карбидовых кругов полярно отличен друг от друга.

На рис. 5.23 представлены расчетные графики изменения неуравновешенности масс высокопористых кругов на основе электрокорунда белого и карбида кремния зеленого 4 групп различного состава с обозначениями в соответствии с табл. 4.6. Все круги имели зернистость 16 и твердость C1 ($h_L = 2,5$ мм). Кривые на рис. 5.23 отображают достаточно сложную картину связи $m_D(V_3)$ для кругов различного состава, которая получена статистическим обобщением большого массива экспериментальных данных. Можно отметить, что общая закономерность в модели $m_D(V_3)$ для кругов с различными порообразователями отсутствует.

5.18. Математические модели связи неуровновешенности масс высокопористых кругов различных составов с их зернистостью, твердостью и структурой

Номер группы	Математические модели					
1	$\ln m_D = 7,631 + 0,351 \ln A_3 + 0,082 \ln h_{\text{л}} + 9,663 \ln V_3 + 3,901 \ln^2 V_3$					
2	$\ln m_D = 4,535 + 0,168 \ln A_3 + 0,512 \ln h_3 + 3,82 \ln V_3 + 1,376 \ln^2 V_3$					
3	$\ln m_D = 0,828 \ln h_{\text{л}} - 0,477 \ln A_3 - 1,893 \ln V_3 - 1,611 \ln^2 V_3 - 0,066$					
4	$\ln m_D = 1,825 \ln h_{\text{л}} - 0,092 \ln A_3 - 14,556 \ln V_3 - 6,284 \ln^2 V_3 - 8,6$					
Номер группы	Коэффициенты парной корреляции			Оценка адекватности		
	A_3	$h_{\text{л}}$	V_3	КМК	ОД	F-отн.
1	0,069	0,088	0,492	0,572	0,924	0,974
2	0,010	0,148	0,176	0,346	1,540	0,136
3	-0,371	0,110	0,796	0,927	0,246	6,103
4	-0,270	0,785	-0,163	0,975	0,085	19,591

Влияние точности механической обработки высокопористых кругов на их неуровновешенность масс. Точность механической обработки шлифовальных кругов является еще одним релевантным фактором формирования их неуровновешенности масс.

Из погрешностей механической обработки шлифовальных кругов, которые могут оказать влияние на их неуровновешенность масс, можно выделить погрешности размеров, отклонения расположения поверхностей и отклонения формы.

Размеры круга, например, его наружный диаметр, высота и диаметр отверстия, а также различных выточек имеют различные значения в разных сечениях и в

разных направлениях в каждом сечении круга.

Отклонением расположения поверхностей применительно к шлифовальным кругам является отклонение взаимного расположения двух или нескольких поверхностей круга от геометрически заданного. К этому виду погрешности принадлежат непараллельность торцевых поверхностей круга, осей отверстия и наружного диаметра, перпендикулярность оси отверстия по отношению к торцевым поверхностям и др.

К отклонениям формы от геометрически заданной относятся конусообразность, эллипсообразность и другие виды отклонений от цилиндричности и плоско-

стности поверхностей шлифовального круга при его изготовлении.

Другие погрешности обработки – волнистость поверхности, колебания значений шероховатости, обработанных поверхностей – не оказывают заметного влияния на дисбаланс обработанного круга.

Причинами возникновения погрешностей обработки являются негативные проявления многочисленных и разнообразных технологических факторов. К ним можно отнести факторы, в результате действия которых не обеспечивается прямолинейность и цилиндричность перемещения рабочих органов станка, включая различный износ режущего инструмента, нарушается точность установки заготовки шлифовального круга и настройки системы резания и др.

Все известные типоразмеры шлифовальных кругов представляют собой относительно простые конфигурации, точность форм, взаимного расположения и размеров поверхностей которых достигается без особых технологических трудностей.

Между величиной неуравновешенности масс шлифовальных кругов и их точностными параметрами имеются простые зависимости, которые для кругов прямого профиля приведены в табл. 5.19 при различных технологических схемах их механической обработки. Прежде чем рассмотреть формулы для расчета дисбаланса, целесообразно ознакомиться с предваряющими комментариями.

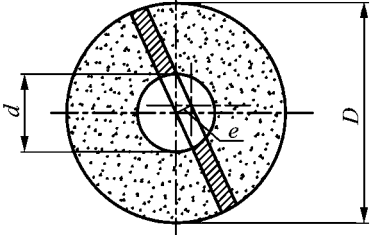
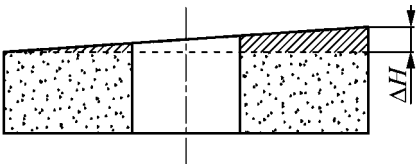
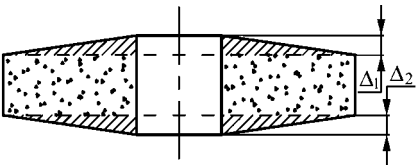
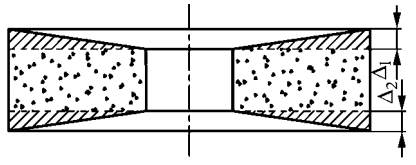
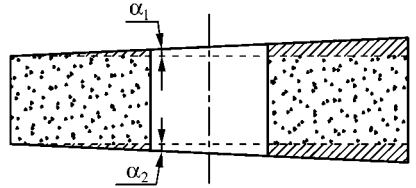
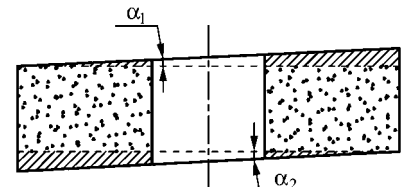
Специфической особенностью механической обработки абразивных кругов является характер обрабатываемого материала и его обрабатываемость резанием. С точки зрения обработки резанием строение абразивного инструмента представляет собой полиморфную дискретно-композиционную структуру с анизотропией таких свойств по обрабатываемой поверхности, которые существенно влияют на сопротивление резанию и изнашиванию режущего инструмента.

Обрабатываемость резанием абразивной массы шлифовальных кругов практически обстоятельно не изучалась, по крайней мере, в известной литературе отсутствуют рекомендации по скоростям резания, выбору инструментальных материалов, геометрии режущего инструмента и другим параметрам обработки в зависимости от ее состава и свойств.

Безусловно, имеется аналогия между механической обработкой шлифовальных кругов алмазными резцами и их правкой алмазными карандашами, которая хорошо теоретически и экспериментально исследована. Основываясь на этой аналогии, можно заключить, что термодинамическая напряженность в зоне резания шлифовальных кругов будет возрастать по мере уменьшения их номера структуры, зернистости и увеличения твердости. Формообразование резанием происходит за счет разрушения абразивных зерен и мостиков связки, поэтому материал абразива также оказывает большое влияние на условия обработки: обрабатываемость резанием инструмента на основе корунда и его модификаций заметно отличается от обрабатываемости шлифовальных кругов из карбида кремния черного и зеленого. Роль материала абразива при этом возрастает с увеличением степени твердости обрабатываемой абразивной массы.

Другим фактором, дестабилизирующим процесс резания шлифовальных кругов, является нестационарность условий обработки. При точении торцевых поверхностей с постоянной частотой вращения шпинделя скорость резания может изменяться до 3...3,5 раз, а скорость изнашивания режущей кромки инструмента при этом будет возрастать не менее чем в 20...30 раз. На станках для токарной обработки шлифовальных кругов отсутствует автоматическая поднастройка системы резания вследствие размерного износа инструмента, поэтому одной из наиболее распространенных погрешностей точности обработки является разновысотность (разнотолщинность) круга.

**5.19. Формирование дисбаланса при механической обработке
шлифовальных кругов**

№ п/п	Технологическая схема обработки	Формирование дисбаланса	Расчет дисбаланса
1	Токарная обработка или шлифование отверстия и наружного диаметра		$m_D = 2\gamma e H (D - d)$
2	Прессование заготовки круга. Подрезание торца круга на токарном станке		$m_D = \frac{\pi}{16} (D^2 - d^2) \Delta H \gamma$
3	Торцевое точение от периферии круга к его центру с сопутствующим износом резца с базированием по отверстию		$m_D = 0$ при $\Delta_1 = \Delta_2$ и $\Delta_1 \neq \Delta_2$
4	Торцевое точение от центра круга к его периферии с базированием по отверстию		$m_D = 0$ при $\Delta_1 = \Delta_2$ и $\Delta_1 \neq \Delta_2$
5	Маятниковое шлифование торца круга при продольном перемещении стола		$m_D = \frac{\pi}{16} \gamma (D^2 - d^2) \times$ $\times (\operatorname{tg} \alpha_1 + \operatorname{tg} \alpha_2)$
6	Планетарная схема торцевого шлифования с последующей обработкой отверстия		$m_D = \frac{\pi}{16} \gamma (D^2 - d^2) \times$ $\times (\operatorname{tg} \alpha_1 - \operatorname{tg} \alpha_2)$ $m_D = 0$ при $\alpha_1 = \alpha_2$ $m_D \neq 0$ при $\alpha_1 \neq \alpha_2$

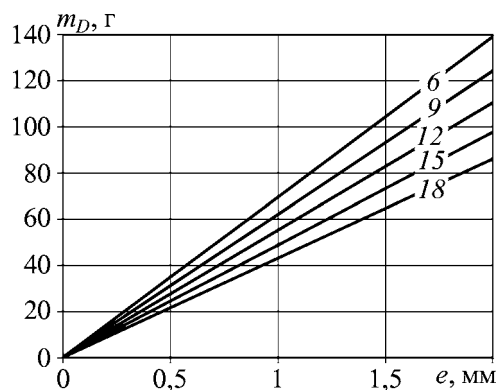


Рис. 5.24. Зависимость дисбаланса шлифовального круга прямого профиля с размерами 500×50×203 от эксцентриситета и номера структуры

На рис. 5.24 показаны зависимости изменения дисбаланса m_D для кругов прямого профиля с размерами 500×50×203 и различными номерами структур от их эксцентриситета e , построенные по расчетной формуле табл. 5.19, п. 1.

Для кругов с такими размерами предельные значения допустимой неуравновешенности масс в соответствии с 4-м классом неуравновешенности равны 100 г для шлифовальных кругов до структуры 8 и 80 г для кругов структуры 9 и выше. Из расчета следует, что круг структуры 6 будет соответствовать требованиям 4-го класса неуравновешенности масс при эксцентриситете, равном 1,44 мм, а для круга структуры 9 необходима более высокая точность обработки, чтобы достигнуть значения $e = 1,29$ мм. Из расчетной модели, однако, следует, что с повышением структурности шлифовального круга возможная точность обработки может уменьшаться: при структуре 12 допустимый эксцентриситет одинаков со значением e для структуры 6, а при структурах 15 и 18 его величина может быть увеличена на 14 и 42,5 % соответственно.

При одинаковой точности механической обработки высокопористые круги оказываются более качественными по неуравновешенности масс, чем шлифо-

вальные круги нормальных структур.

При анализе неуравновешенности масс высокопористых кругов в предыдущем подразделе акцент был сделан на изучение влияния различных рецептурных составов и взаимосвязанных с ним технологических и эксплуатационных свойств на величину дисбаланса. Точность механической обработки при этом в явном виде не учитывалась. Предполагалось, что, если механическая обработка кругов с различным составом осуществлялась в одинаковых технологических условиях, то во всех случаях погрешности формы, взаимного расположения и размеров обработанных поверхностей статистически были равноценны и имели систематический характер.

Изучая влияние точности механической обработки на дисбаланс высокопористых кругов, целесообразно и корректно определять его величину в зависимости от различных точностных погрешностей при постоянном рецептурном составе. В этом случае при достаточно большой выборке статистических данных можно взаимосвязано оценить влияние нестабильности физико-механических свойств инструмента и его точностных параметров на неуравновешенность масс.

Такой методологический подход оправдан и по другой причине. Предложенные расчетные схемы формирования в зависимости от точности механической обработки не в полной мере учитывают возможные отклонения от точности формы рабочих поверхностей шлифовального круга и их взаимного расположения. В реальных условиях помимо отмеченных в табл. 5.19 погрешностей имеют место овальность отверстия и наружного диаметра круга, биение торцевых поверхностей и др.

Еще одно обстоятельство связано с тем, что действие параметров точности формы и взаимного расположения поверхностей может проявляться разнополярно, т.е. действовать на уменьшение и увеличение суммарного дисбаланса одно-

временно. Действие точностных параметров механообработки накладывается на уже имеющуюся в шлифовальном круге разнородность по объему инструмента с соответствующим смещением центра масс от центра его вращения, обусловленных рецептурным составом и погрешностями предшествующих этапов изготовления.

Вследствие изложенного, расчетная величина неуравновешенности масс может быть больше или меньше фактического значения и степень их соответствия зависит от полноты учета действия возмущающих факторов. В этой связи статистическая обработка экспериментальных данных дает возможность более полно оценивать характер и степень влияния на неуравновешенность масс различных факторов изготовления высокопористых шлифовальных кругов, ответственных за ее формирование.

С помощью методов корреляционного и регрессионного анализов была исследована статистическая выборка из 15 кругов прямого профиля с размерами 500×32×203 и с характеристикой 25А 16П МЗ 12 К. При постоянном рецептурном составе изготовленные круги имели заметные отклонения по свойствам. Глубина лунки, измеренная пескоструйным методом, изменялась от 4,1 до 5,6 мм (степень твердости М2...М3), а ее среднеквадратичное отклонение σ_h – от 0,29 до 1,25 мм. Объемная деформация кругов ϵ_w после обжига имела диапазон 0,1...3,2 %, а их разнородность $\Delta H = 0,01...0,51$ мм. Как следствие нестабильности указанных свойств измеренная неуравновешенность масс высокопористых кругов имела также большее рассеяние: от 2 до 26 г, из которых 53,3 % соответствовали 1-му классу неуравновешенности, 40 % – 2-му классу и у одного круга дисбаланс на 1 г превысил допустимое значение 2-го класса.

Данную партию инструмента обрабатывали по торцам на плоскошлифовальной станке дисками с чугунной дробью при их планетарном движении. Измеренная разнородность обработанных

кругов, как показал корреляционный анализ не коррелирована с другими характеристиками (ϵ_w , h_d и σ_h) и является статистически независимой величиной. Так как твердость и ее стабильность не оказывают влияния на разнородность ΔH , то ее рассеяние связано главным образом с точностью и жесткостью исполнительных механизмов станка и условиями базирования обрабатываемого круга.

При постоянном рецептурном составе на неуравновешенность масс круга наибольшее влияние оказывает точностной параметр ΔH ($R = 0,724$) и значительно меньше влияют параметры, связанные с нестабильностью формирования объемной структуры инструмента ($R = 0,044...0,25$).

Регрессионная модель связи неуравновешенности масс с исследуемыми параметрами для рассматриваемой характеристики круга имеет следующий вид:

$$\ln m_D = 8,303 - 0,233 \ln \epsilon_w - 2,664 \ln h_d + 0,888 \ln \sigma_h + 0,497 \ln \Delta H, \quad (5.26)$$

Качество данной модели оценивается коэффициентом множественной корреляции 0,819 при средней ошибке расчета 26,7 %. В ней не учтено около 33 % других возможных точностных параметров.

При средних экспериментальных значениях ϵ_w , h_d и σ_h повышение точности механической обработки и соответствующем снижении ΔH с 0,51 до 0,01 мм позволило бы в соответствии с расчетной моделью (5.26) уменьшить неуравновешенность масс кругов 1 500×32×203 с характеристикой 25А 16П МЗ 12 К с 25 до 4 г или в 6 раз.

В качестве еще одного примера рассмотрим связь неуравновешенности масс для кругов прямого профиля с размерами 500×25×203 одного состава с характеристикой 25А 12П ЗИЗЗ 12 К. В результате измерений 13 кругов были установлены следующие диапазоны погрешностей: по разнородности или непараллельности

5.20. Корреляционная матрица взаимосвязи параметров точности и твердости круга с размерами 500×32×203

Параметр точности	ΔH	ΔD	Δd	e	ЗИ
ΔH	1	-0,264	0,496	0,728	-0,758
ΔD	-0,264	1	-0,331	-0,191	-0,269
Δd	0,496	-0,331	1	0,259	-0,332
e	0,728	-0,191	0,259	1	-0,296
ЗИ	-0,758	-0,269	-0,332	-0,296	1

торцов круга $\Delta H = 0,1 \dots 1,4$ мм; по овальности наружного диаметра $\Delta D = 0,02 \dots 0,1$ мм и отверстия $\Delta d = 0,04 \dots 0,2$ мм; по эксцентриситету (смещение оси отверстия относительно оси окружности периферии круга по биению наружного диаметра) $e = 0,02 \dots 1$ мм. Акустический контроль показал, что по звуковому индексу $ЗИ = 32,3 \dots 33,6$ все круги относятся к одной степени твердости.

Шлифовальные круги с приведенными точностными параметрами имели неуравновешенность масс от 4 до 26 г, в том числе 30,8 % инструмента соответствовали 1-му классу неуравновешенности, 61,5 % – 2-му классу и 7,7 % – 3-му классу.

Корреляционным анализом были установлены взаимосвязи между измеренными параметрами точности и твердости высокопористых кругов, с одной стороны, и степень их влияния на величину неуравновешенности масс, с другой.

В табл. 5.20 приведены результаты анализа в виде корреляционной матрицы параметров точности и твердости по звуковому индексу.

По значению коэффициентов парной корреляции можно судить о статистически значимом взаимном влиянии измеренных и представленных в табл. 5.20 параметров исследуемой группы высоко-

пористых шлифовальных кругов. Из приведенного множества параметров можно выделить только две группы связей: с разновысотностью круга ΔH тесно связаны его эксцентриситет e и твердость по ЗИ.

Наличие зависимости между эксцентриситетом круга и его разновысотностью (или параллельностью торцов) свидетельствует о том, что при обработке наружного и внутреннего диаметров круга в качестве технологической базы были использованы его торцевые поверхности. Что касается связи ΔH с твердостью, то она очевидна, так как чем выше твердость обрабатываемого материала, тем больше сопротивление резанию и, как следствие, его упругий отжим и более интенсивный размерный износ.

Другие параметры точности формы и относительного положения осей и рабочих поверхностей шлифовального круга не коррелированы, т.е. не взаимосвязаны между собой. Отклонения от параллельности торцевых поверхностей круга, например, не связаны с эксцентриситетом осей его отверстия и наружного диаметра или с овальностью этих цилиндрических поверхностей. Поэтому статистическая разнонаправленность их как по направлениям, так и по величинам приводит к тому, что измеряемый дисбаланс шлифо-

вального круга является статистической оценкой сложения и вычитания значений неуравновешенности масс в различных локальных объемах инструмента.

Регрессионным анализом получена статистическая модель связи неуравновешенности масс исследованной группы кругов с их параметрами точности и твердости в виде логарифмического линейного полинома:

$$\ln m_D = 55,376 + 0,184 \ln \Delta H + 0,496 \ln \Delta D + 0,207 \ln \Delta d + 0,127 \ln e - 14,356 \ln 3И, \quad (5.27)$$

для которой коэффициент множественной корреляции составил 0,879, а средняя ошибка аппроксимации экспериментальных и расчетных данных – 23,4 %.

В разработанной модели (5.27) на величину дисбаланса по степени корреляции примерно одинаковое влияние оказывают все ее параметры ($R = 0,388...0,523$) за исключением овальности отверстия Δd : для нее коэффициент корреляции с дисбалансом значительно меньше. Также примерно одинаковое влияние от 18 до 32,6 % параметров точности и твердости и менее 1 % для Δd получено в результате специальной статистической обработки результатов корреляционного анализа.

Для мелкозернистого и более твердого круга 9-й структуры 1 450×20×203 с характеристикой 25А 4П СМ2 9 К достаточно полная идентификация его дисбаланса ограничивается тремя точностными параметрами: радиальным биением наружного диаметра круга ΔD , его разновысотностью ΔH и торцовым биением δH . Измерения на 9 кругах указанных параметров дали следующие результаты: $\Delta D = 0,03...0,25$ мм, $\Delta H = 0,02...0,5$ мм, $\delta H = 0,1...0,4$ мм при изменении неуравновешенности масс от 2 до 24 г (диапазон значений 1...3 классов неуравновешенности).

Увеличение всех указанных погрешностей точности формы и размеров поверхностей шлифовального круга приво-

дит к пропорциональному возрастанию его дисбаланса в соответствии с расчетной моделью:

$$\ln m_D = 5,151 + 0,648 \ln \Delta D + 0,135 \ln \Delta H + 0,5 \ln \delta H. \quad (5.28)$$

Хорошее качество аппроксимации опытных данных оценивается высоким коэффициентом множественной корреляции 0,832 и средней ошибкой в 39,6 % для большого разброса значений: m_D изменяется в 12 раз.

Из полученной корреляционной матрицы можно сделать заключение, что исследуемые параметры точности формы круга коррелированы между собой, но в различной степени. Например, при механической обработке взаимосвязано формирование биения круга по наружному диаметру ΔD и его разновысотности ΔH ($R = 0,654$). В меньшей степени взаимосвязаны радиальное ΔD и торцовое δH биения ($R = 0,222$), а также δH и ΔH применительно к одним и тем же поверхностям круга ($R = 0,315$).

В свою очередь, степень влияния указанных параметров точности формы круга на его дисбаланс по коэффициенту парной корреляции уменьшается в следующей последовательности: ΔD ($R = 0,758$), ΔH ($R = 0,641$) и δH ($R = 0,481$).

Расчетная модель (5.28) интересна тем, что она одновременно рассматривает влияние на дисбаланс двух параметров точности, связанных с высотой круга H . Величина ΔH оценивает разницу в высоте (толщине) круга в различных точках, измеренных штангенциркулем с точностью $\pm 0,02$ мм. Биение торцовой поверхности круга δH оценивается по показаниям щупа индикатора часового типа при его перемещении относительно измеряемой поверхности.

По заводскому варианту круги исследуемого типоразмера и характеристики обрабатывались в следующей последовательности: шлифование торцовых поверхностей, наружного диаметра и раста-

чивание отверстия. При шлифовании наружного диаметра набор из нескольких кругов базировался и крепился на оправке по необработанному отверстию, а при растачивании отверстия круг крепился за наружный диаметр в трехкулачковом патроне.

Был предложен вариант повторной механической обработки наружного диаметра этих же кругов с креплением каждого круга за отверстие в трехкулачковом патроне для уменьшения радиального биения ΔD . В результате повторной обработки средняя величина радиального биения партии кругов уменьшилась с 0,42 до 0,1 мм, а средняя величина дисбаланса этой партии – с 21,2 до 17,8 г или почти на 20 %.

Практика механической обработки шлифовальных кругов на различных заводах свидетельствует о существовании разных подходов к построению маршрута технологического процесса, выбора баз, схем обработки, режущего инструмента и т.д. Не всегда, по мнению автора, используемые технологические процессы и оборудование соответствуют тем принципам, которые стали аксиомой оптимального достижения требуемой точности обработки в технологии машиностроения.

Эти принципы просты и универсальны и давно эффективно используются при изготовлении высокоточных деталей, более сложных по своей конфигурации, чем все известные шлифовальные круги. К основным принципам можно отнести: единство конструкторских, измерительных и технологических баз; постоянство баз, применяемых для обработки; применение самонастраивающихся (адаптивных) и самооптимизирующихся технологических систем резания; максимально возможное количество операций за один установ детали и исключение субъективного фактора управления процессом (действия оператора).

Применительно к механической обработке шлифовальных кругов повышенная их точность может быть обеспечена

точением алмазными резцами с предварительной подготовкой чистовой базы – отверстия круга с последующей обработкой торцов, периферии и различных выточек с базированием только по отверстию.

Параметры режима точения должны быть согласованы с характеристикой обрабатываемого шлифовального круга. На обрабатываемость резанием по величине оптимальной скорости обработки и интенсивности изнашивания алмазного резца большое влияние оказывают материал абразива, его зернистость и твердость.

При точении шлифовальных кругов на основе электрокорунда хромтитанистого, карбида кремния черного и зеленого скорость резания должна быть меньше, чем при обработке кругов аналогичной характеристики на основе электрокорунда белого. С уменьшением зернистости и твердости инструмента также должна снижаться рабочая скорость резания.

Высокопористые круги по сравнению с абразивным инструментом нормальной структуры лучше обрабатываются резанием. Наиболее высокие скорости алмазного точения при минимальной интенсивности изнашивания резца обеспечиваются при обработке высокопористых кругов из электрокорунда белого зернистостью 12...40, твердостью ВМ1...М3 с номерами структуры 10...16.

При проектировании операций механообработки шлифовальных кругов необходимо иметь в виду, что даже хорошо организованная с точки зрения точности обработки операция не устраняет разноточность в объеме инструмента, которая сформировалась на предшествующих этапах технологического цикла его изготовления. Она может свести к минимуму погрешности форм, размеров и взаимного расположения поверхностей шлифовального круга, которые влияют на его неуравновешенность массы.

Для получения минимально возможного дисбаланса абразивного инструмента надо контролировать качество его изго-

товления на всех стадиях от навески массы до измерения неуравновешенности.

5.5. РАЗРЫВНАЯ ПРОЧНОСТЬ ВЫСОКОПОРИСТЫХ ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ

Разрывная прочность или скорость, при которой происходит разрушение шлифовального круга, является, пожалуй, одной из наиболее важных его характеристик, определяющих перспективы использования того или иного класса инструмента в высокопроизводительных процессах абразивной обработки.

Разрывная скорость зависит от многих факторов: формы и размеров инструмента, точности и качества его изготовления, условий эксплуатации и др. В первую очередь, разрывная скорость связана с рецептурным составом и характеристикой шлифовального круга – материалом абразива, его зернистостью, твердостью, прочностью связки, структурностью. Именно состав и объемно-структурное строение абразивного инструмента предопределяют возможный диапазон его эксплуатационных свойств и, прежде всего, рабочую скорость.

Современные шлифовальные станки позволяют вести обработку на скоростях до 150...250 м/с, что в настоящее время может быть реализовано только кругами на металлических (гальванических) связках. По мнению автора, шлифовальные круги и особенно их высокоструктурные модификации на керамических связках, обладая в большинстве случаев, особенно при глубинных схемах обработки, безусловными преимуществами перед инструментом на металлических связках, еще не исчерпали своего потенциала по прочности.

Предпосылки, необходимые для разрушения высокопористых шлифовальных кругов. По образному сравнению Е. Орована, разрушение конструкции – это летальный исход по аналогии с жиз-

недеятельностью, причины и природа которого до сих пор не выяснены до конца.

Обычно принято связывать разрушение материала с его пределом текучести или пределом прочности для условий растяжения. Такой подход допустим для сплошных и однородных по своим свойствам материалов, в которых отсутствуют концентраторы напряжений, в том числе в виде несплошностей строения.

По мнению Т. Екобори, вращающиеся диски из таких материалов, подверженные действию распределенных объемных центробежных сил, уже обречены на разрушение [22]. При таком нагружении сопротивление разрушению вращающегося диска определяется состоянием динамической неустойчивости пластической деформации диска. Напряженное состояние вращающегося диска характеризуется как однородное растяжение его периферийных участков. Результатом деформации этих участков становится увеличение диаметра диска, прямо пропорциональное сужению площади поперечного сечения вдоль образующей. Создаются предпосылки пластической неустойчивости аналогично критериям статической неустойчивости, одним из примеров которой является упругое выпучивание, т.е. потеря равновесия в результате потери жесткости конструкции.

При такой трактовке причины разрушения, согласно расчету, значение разрушающего напряжения должно находиться в интервале между пределом текучести и пределом прочности при растяжении.

Фактическое распределение действующих во вращающемся диске (шлифовальном круге) напряжений отлично от равномерного. Распределение напряжения при вращении шлифовального круга с отверстием от действия центробежных сил рассчитываются из условия равновесия по дифференциальному уравнению

$$\sigma_t - \sigma_r - r \frac{d\sigma_r}{dr} - \frac{\gamma}{g} \omega^2 r^2 = 0, \quad (5.29)$$

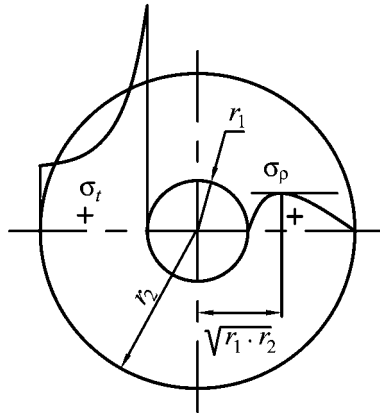


Рис. 5.25. Распределение радиальных σ_r и тангенциальных σ_t напряжений в шлифовальном круге

в котором σ_t и σ_r – соответственно тангенциальное и радиальное напряжения; r – текущее значение радиуса круга; γ – его плотность; g – ускорение свободного падения; ω – частота вращения круга.

Расчет напряжений основывается на равновесии внутренних сил элементов, которые входят в состав круга. После соответствующих преобразований, пренебрегая законом Гука для хрупких материалов, получено решение. На рис. 5.25 показано расчетное распределение радиальных и тангенциальных напряжений в шлифовальном круге с радиусом отверстия r_1 и радиусом наружной поверхности r_2 [23].

Из решения уравнения (5.29) и рис. 5.25 следует, что у отверстия круга максимальное тангенциальное напряжение больше, чем радиальное, максимум которого находится на расстоянии $\sqrt{r_1 r_2}$ от отверстия. Это приводит к тому, что у отверстия шлифовального круга формируется напряженное состояние, которое создает предпосылки для начала его разрушения.

В работе [89] приводится величина максимального тангенциального напряжения у отверстия круга плотностью γ ,

коэффициентом Пуассона μ и соотношением размеров $k = \frac{r_1}{r_2}$, равная

$$\sigma_t^* = \frac{\gamma v_p^2}{g} \frac{3+\mu}{4} \left(1 + \frac{1-\mu}{3+\mu} k^2 \right). \quad (5.30)$$

Для условия $\sigma_t^* = \sigma_p$, т.е. для условия, когда максимальное тангенциальное напряжение достигнет величины разрушающего напряжения, для абразивных кругов на керамических связках ($\mu = 0,25$) рекомендуется разрывную скорость определять по формуле

$$v_p = \left[\frac{4g \sigma_p}{\gamma (3,25 + 0,75k^2)} \right]^{1/2}. \quad (5.31)$$

Наиболее важным параметром в оценке разрывной скорости по (5.31) является прочность абразивной массы шлифовального круга. Она определяется прочностью абразивных зерен и связки, прочностью их соединения, объемно-структурным строением, наличием внутренних дефектов и напряжениями, которые возникают в процессе формования и обжига инструмента. Разрушение круга происходит под действием тангенциальных растягивающих напряжений, поэтому величина σ_p коррелирована с пределом прочности на растяжение материала абразивного круга.

Наиболее заметное влияние на прочность и разрывную скорость круга оказывает материал, размеры и объемное содержание абразива и твердость инструмента. С увеличением зернистости и уменьшением твердости круга его прочность снижается [93]. Предел прочности на разрыв образцов в форме восьмерок больше для высокопористой структуры ($N = 12$) в отличие от нормального ($N = 5$) до 5...8 % и увеличивается до 38 % при возрастании степени твердости от МЗ до С2 [59].

Приведенный теоретический анализ оценки прочности и разрывной скорости шлифовальных кругов основан на положениях механики сплошных сред, поэтому он не учитывает структурного фактора объемного строения абразивного инструмента. В реальных условиях применения кругов с различными номерами структуры, у которых заметным образом изменяется их плотность, разрывная скорость может быть больше или меньше, чем у кругов с нормальной структурой. Это противоречит прогнозируемым величинам σ_t^* и v_p по формулам (5.30) и (5.31), в соответствии с которыми высокопористые круги должны иметь всегда более высокие значения прочности и разрывной скорости, так как у них всегда меньше плотность γ .

Решающую роль в формировании прочностных свойств играет не плотность абразивного инструмента, а его рецептурный состав и строение. Этот же фактор снижает степень влияния размерного параметра k высокопористых кругов на их разрывную скорость.

Имитационные исследования на моделях строения шлифовального круга показали, что действие силы резания при шлифовании не оказывает влияния на напряженное состояние во внутренних точках инструмента [51]. Наибольшие напряжения, которые возникают в шлифовальном круге, дислоцируются вблизи зоны его контакта с обрабатываемым материалом и распространяются на некоторую область. Эта область захватывает несколько слоев абразивных зерен в радиальном направлении. Размеры напряженной зоны возрастают с увеличением нагрузки. Даже при самых тяжелых режимах обработки, когда происходит интенсивное разрушение поверхности круга, напряжения от усилий шлифования не опасны для прочности круга.

Поэтому неожиданные данные, приведенные в работе [86], согласно которым с увеличением глубины резания до

0,3...0,4 мм для кругов с прерывистой периферийной поверхностью и до 0,5...0,6 мм для сплошного инструмента они разрушаются, следует отнести к разрушению не шлифовального круга в целом, а только его рабочей поверхности.

Физический механизм разрушения высокопористых кругов и условия его торможения. В основе разрушения твердых тел лежат механизмы зарождения и развития трещин. Для пластичных или хрупких однородных сплошных материалов механизм разрушения обусловлен особенностями их структурного и субструктурного строения: наличием скоплений дислокаций, межзеренных и межблочных границ, двойников, легирующих элементов и упрочняющих фаз и т.д. Причем для статистически изотропных, сплошных по своему строению материалов, например металлов, субструктурный фактор оказывает превалирующее влияние на механизмы зарождения, развития и торможения трещин разрушения. Для начала разрушения помимо больших растягивающих напряжений необходимо скопление дислокаций критической плотности для создания зародыша трещины и последующего ее расширения и движения.

Разрушение композиционных материалов, к которым относятся абразивные инструменты, в значительной степени определяется фактором их структурного строения, т.е. наличием композиций из зерен, связки и пор. В отличие от сплошных материалов, в абразивном инструменте всегда в большем количестве имеются очаги разрушения в виде пор различных форм и размеров, рассредоточенных по всему объему. Достаточно приложить относительно небольшую нагрузку, чтобы пора превратилась в магистральную трещину разрушения. С другой стороны, пора является концентратом внутренних напряжений в объеме круга, что создает повышенный уровень напряженного состояния в пористых кругах в отличие от инструмента без пор [51]. Неоднородная морфология пор приводит к не-

равномерному распределению напряжений, что по данным работы [22] требует увеличения разрушающих напряжений и тем выше, чем больше градиент напряжений.

По своей физической природе пора, обрамленная прочным соединением зерно-связка, является мощным препятствием для торможения трещины. В.М. Финкель считает, что при встрече трещины с порой (отверстием) происходит моментальное увеличение радиуса ее вершины с падением концентрации напряжений и автоматическим ростом прочности тела с существующей в нем, но остановленной затупленной трещиной [94].

Условия зарождения и развития трещин в высокопористых абразивных кругах взаимосвязаны с характеристиками его структурного строения.

Строение абразивного инструмента по-своему уникально. Оно представляет собой полиморфную дискретно-композиционную структуру, в которой форма, размеры, ориентация и объемное распределение компонентов стохастически неоднородны и имеют различные статистические характеристики. Такое строение предопределено составом абразивной массы и превращениями, которые происходят в ней в процессе изготовления инструмента.

У высокопористого инструмента поровое пространство занимает более половины его объема, что повышает степень свободы в возможных перемещениях компонентов состава и, как следствие, степень неоднородности его объемного строения и анизотропности физико-механических свойств.

Если бы трещина разрушения, которая распространяется в объемной анизотропной структуре шлифовального круга, имела бы нитевидный, микроскопический характер, то даже при лавинообразном развитии она бы достаточно быстро на любом из множества возможных препятствий затормозилась. Но процесс хрупкого и быстротекущего разрушения с не-

прерывной энергетической поддержкой от центробежных сил вращающегося круга и аккумулированного упругого потенциала стремительно развивается за счет расклинивающей трещины.

Установлено, что при разрушении шлифовального круга трещина развивается в радиальном направлении по зонам максимальных концентраций напряжений [51]. В качестве концентраторов напряжений выступают абразивные зерна, поры и связка. Увеличение объемного содержания этих компонентов строения круга повышает уровень напряженного состояния, а их неправильная форма и случайный характер распределения усугубляют его неоднородность.

В случае сильной адгезионной связи абразивного зерна с керамической связкой (например у корундовых кругов) зерно нагружено больше, чем связка, и разрушение идет в основном по зернам. При слабой адгезии зерен, например карбида кремния с керамической связкой, действующие напряжения перераспределяются на связку, которая становится элементом разупрочнения шлифовального круга.

Во всех случаях поры являются сильными разупрочняющими элементами абразивного инструмента, и они вместе с зернами и связкой определяют его прочность.

Наличие множества обломков после разрушения шлифовальных кругов различного строения и характеристик (рис. 5.26) дает основание считать, что процесс их разрушения протекает в результате зарождения нескольких трещин в поверхностных зонах вблизи отверстия с последующим распространением в радиальном направлении и возможным их ветвлении. Если трещина распространяется перпендикулярно к максимальным растягивающим напряжениям, то при скорости, превышающей 0,6 скорости поперечных волн, напряжения перестают быть наибольшими в направлении распространения трещины. Возникает состояние, при котором распространение трещины становится более вероятным в других направ-

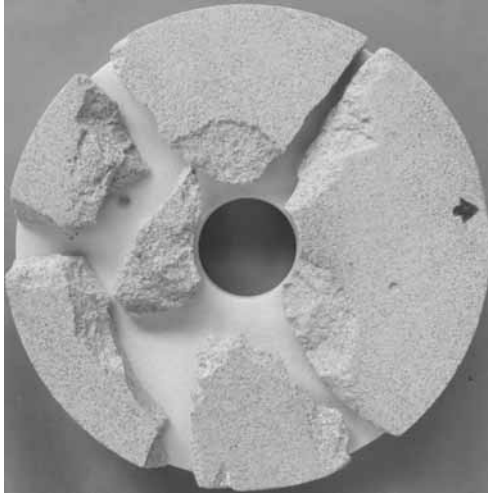


Рис. 5.26. Высокопористый шлифовальный круга после разрушения на испытательной машине

лениях, т.е. трещина в этих условиях будет искривлять свою траекторию. Разветвление движущейся трещины становится фактором необратимости разрушения.

В.М. Финкель, рассмотрев возможные условия торможения трещин включениями, установил, что они эффективно могут препятствовать разрушению при небольших скоростях распространения трещины – примерно до 50 м/с [94]. Это объясняется тем, что главным в торможении трещины является пластическая релаксация, которая максимальна при медленном перемещении. Наибольший эффект торможения достигается в случаях оптимального сочетания размеров включений и расстояний между ними.

Прямые эксперименты по измерению разрывной скорости высокопористых кругов в зависимости от их состава и эксплуатационных характеристик позволили выявить важные закономерности ее изменения.

Влияние строения круга на его разрывную прочность. Основными конструктивными параметрами объемного строения высокопористого абразивного

инструмента и его прочности являются размеры и количество зерен, прочность и объемное содержание связки, а также наличие других твердых компонентов, например, невыгорающих микросфер. Доминирующим параметром конструктивной прочности круга следует признать его пористость: форму, размеры, количество, характер распределения и прочность пор.

Поры присутствуют в любом шлифовальном круге на керамической связке независимо от его структурности. Их может быть много или мало, они могут иметь разнообразные формы и размеры, но именно их присутствие, как показывают исследования, определяет разрывную прочность шлифовальных кругов.

Морфологические и прочностные свойства пор обусловлены вышеприведенными конструктивными параметрами объемного строения абразивного инструмента. С увеличением зернистости и номера структуры размеры и количество пор также возрастают. Объемная пористость повышается при увеличении объемного содержания выгорающих порообразователей, а размеры пор растут после введения более крупных по своим размерам, например, молотых фруктовых косточек. Увеличение твердости при повышенном содержании связки способствует созданию не только более прочной связи между абразивными зёрнами, но и более прочных в конструктивном отношении пор.

О коррелированности размеров пор и объемной пористости шлифовального круга свидетельствуют результаты исследований [91], описанных в главе 1. В п. 3.2 экспериментально было доказано, что при увеличении содержания в объеме круга абразивного зерна, керамической связки и невыгорающих корундовых микросфер (закрытых пор) прочность абразивной массы после обжига возрастает.

В определенной степени установленные закономерности связи прочности высокопористого круга с его объемной пористостью можно объяснить простым соотношением. Объем порового простран-

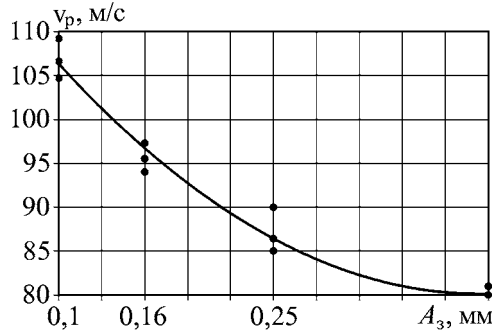


Рис. 5.27. Влияние размера зерен из электрокорунда белого на разрывную скорость круга

ства, которое приходится на одно абразивное зерно, можно определить по формуле

$$w_{\Pi} = \frac{1 - (V_3 - V_{св})}{Z_v} \quad (5.32)$$

через объемное содержание абразива V_3 и связки $V_{св}$, отнесенное к числу зерен в единице объема.

В соответствии со значением Z_v (2.3) получаем

$$w_{\Pi} = 1,5 A_3^3 \left[\frac{1 - (V_3 + V_{св})}{V_3} \right], \quad (5.33)$$

а также средний размер поры, отнесенный к одному абразивному зерну

$$d_{\Pi} = 1,42 A_3 \left[\frac{1 - (V_3 + V_{св})}{V_3} \right]^{1/3}. \quad (5.34)$$

В (5.34) каждая отдельная пора условно рассматривается как объемное образование между зернами и керамической связкой, по форме приближенное к сфере.

По выражению (5.34) можно судить о степени влияния размеров и количества зерен, а также связки на относительную пористость круга, т.е. размера поры, отнесенной к одному абразивному зерну.

Прямым экспериментом (рис. 5.27) установлено, что для электрокорундового

круга структуры 12 с постоянным содержанием связки и зерна средняя разрывная скорость снижается с 107,2 до 80,3 м/с или на 33,5 % при увеличении зернистости от 10 до 40. Средняя глубина лунки после 6 измерений на каждом из трех кругов одного состава составила 4,05... 4,25 мм с изменением в диапазоне $\pm 2,4$ %, т.е. практически оставалась неизменной. Расчетная модель связи для приведенного примера имеет следующий вид:

$$v_p = 65,8 / A_3^{0,21} \quad (5.35)$$

с коэффициентом корреляции 0,984 и средней ошибкой аппроксимации 1,7 %.

При постоянной глубине лунки h_L степень твердости круга изменялась от М3 для зернистостей 10...25 до М1 для зернистости 40.

Ранее (см. пп. 3.3 и 3.4) экспериментально было доказано, что с увеличением объемного содержания керамической связки в круге зернистости 16 и структуры 12 от 5 до 16 %, а степени твердости от ВМ2 до СМ2 разрывная скорость повышается от 92,8 до 106 м/с или на 14 %, т.е. с темпом изменения v_p меньшим, чем по модели (5.35).

Для объяснения установленной разницы можно обратиться к расчетному выражению (5.34). При возрастании зернистости относительная пористость, приведенная к одному зерну, увеличивается от 0,159 до 0,63 мм³ или в 4 раза (пропорционально увеличению размера зерна). В случае повышения содержания связки и твердости размер поры d_{Π} по (5.34) уменьшается от 0,291 до 0,271 мм или только на 7 %.

Принципиально важным для формирования прочностных свойств высокопористых кругов оказывается не столько введение порообразователей, сколько их состав, размеры и количество. Если в электрокорундовый круг зернистости 16 и структуры 12 при содержании связки 8,5 % ввести в качестве выгорающего по-

роообразователя молотые фруктовые косточки с размерами 0,2...0,5 мм и в количестве 14 % объема, то его разрывная скорость будет в среднем равна 82 м/с с персиковыми косточками и 87,1 м/с с оливковыми косточками, т.е. на 6 % больше. При введении невыгорающих порообразователей аналогичного объема разрывная скорость пористого круга заметно увеличивается: до 101,4 м/с с силикатными микросферами и до 110,4 м/с с корундовыми микросферами, что до 35% больше, чем с молотыми фруктовыми косточками.

При возможных четырех комбинациях сочетаний косточки + микросферы с 7%-ным содержанием каждого компонента лучшей, с точки зрения прочностных свойств, является композиция оливковые косточки + корундовые микросферы, у которой разрывная скорость составила 98,3 м/с, или на 13 % больше, чем у композиции персиковые косточки + силикатные микросферы. В данном случае лучшие порообразователи в своем классе обеспечили и наилучшую композицию среди возможных сочетаний. Можно отметить, что у кругов с композицией состава оливковые косточки + корундовые микросферы были также лучшие результаты по объемной деформации, неуровненности масс, с твердостью инструмента на степень больше.

Увеличение объемного содержания оливковых косточек в качестве выгорающего порообразователя с 6 до 14 % снижает разрывную скорость круга с 96,1 до 87,3 м/с или на 10 %. Если же увеличить размеры вводимых косточек с 0,2...0,5 мм до 1...1,5 мм, при постоянном их объемном содержании 12 %, то разрывная скорость круга снизится с 107 до 90 м/с или почти на 20 %.

С увеличением содержания невыгорающих порообразователей, в отличие от фруктовых косточек, разрывная скорость возрастает. Например, при введении стеклянных микросфер в состав круга от 0 до 5,1 % объема его разрывная скорость возросла от 92,8 до 106 м/с или на 14 %. Заметное повышение прочности высокопо-

ристых кругов со структурами 10...22 отмечено при увеличении содержания корундовых и силикатных микросфер.

На основании полученных экспериментальных данных можно теперь сформулировать конструктивные особенности применения выгорающих и невыгорающих порообразователей и требования к ним для повышения прочностных свойств высокопористых шлифовальных кругов. Используемые в них порообразователи можно проранжировать по эффективности упрочнения.

Фруктовые косточки, выгорая в процессе высокотемпературного обжига инструмента, создают в нем разветвленную, сквозную систему каналов выхода газообразных продуктов выгорания на поверхность. Сложная с разнообразными по форме и размерам система пор, хаотично расположенных в объеме, формирует анизотропность физико-механических свойств и напряженно-деформированного состояния высокопористого круга. Следствием такого специфического объемно-структурного строения круга становится, в том числе, его пониженная прочность.

Среди двух вариантов исследованных косточек лучшим по воздействию на прочностные свойства инструмента является вариант применения оливковых косточек. Они в сравнении с персиковыми косточками практически не оставляют при обжиге твердых фракций, которые могли бы повлиять на изменение свойств керамической связи. Поэтому во всех сравнимых случаях, когда в качестве порообразователя используются оливковые или персиковые косточки, более высокая разрывная скорость достигается с вариантом оливковых косточек.

Фруктовые косточки, разупрочняя шлифовальный круг, не могут конкурировать с невыгорающими порообразователями, которые всегда обеспечивают упрочняющий эффект высокопористого абразивного инструмента.

Невыгорающие порообразователи в виде тонкостенных микросфер объединя-

ет их назначение в качестве эффективных препятствий для торможения трещины разрушения. Прочная микросфера правильной геометрической формы создает вокруг себя однородное напряженное поле и является барьером движению трещины, если напряжение у ее вершины не превышает предела прочности препятствия. Наличие "леса" микросфер различного размера и прочности (которая больше для маленьких микросфер с более толстой стенкой) в объеме высокопористого инструмента повышает эффективность торможения трещин, так как возрастает вероятность их взаимной встречи. Сопротивление разрушению будет тем выше, чем больше микросфер в объеме инструмента и чем выше степень их гомогенности.

Среди трех исследованных видов невыгорающих порообразователей предпочтение следует отдать корундовым микросферам. Они тугоплавки и сохраняют свою прочность и форму на всем протяжении цикла изготовления шлифовального круга. Корундовые микросферы, являясь продуктом переработки зерен электрокорунда белого, имеют с ними химическое родство и аналогичным образом взаимодействуют с керамической связкой. Высокая прочность, идеально правильная сферическая форма в сочетании с прочным удержанием в объеме инструмента – в этом основные преимущества корундовых микросфер как упрочняющего порообразователя. Другие их достоинства при формировании технологических и эксплуатационных свойств высокопористых шлифовальных кругов были изложены ранее.

Силикатные микросферы имеют более низкую термостойкость, чем корундовые, и они частично размягчаются при высокотемпературном обжиге. В результате возможное изменение формы, химическое взаимодействие с керамической связкой с последующим ее упрочнением и, как следствие, снижение прочности самих силикатных микросфер уменьшают

упрочняющий эффект их введения в объемную структуру пористого инструмента.

Стекланные микросферы расплавляются при обжиге инструмента. Жидкий расплав, взаимодействуя со связкой, заметным образом упрочняет ее. После охлаждения в объеме инструмента остаются поры, закрытые хрупкой стекловидной массой, – химическим продуктом взаимодействия стекланных микросфер с керамической связкой. Химическое родство и повышенная склонность к взаимодействию этих двух компонентов высокопористой абразивной массы становятся факторами, которые ограничивают возможное содержание стекланных микросфер в качестве порообразователя не более 8...10 % объема шлифовального круга.

Корундовые микросферы могут вводиться в структуру круга в количестве, необходимом для получения заданного номера структуры и вплоть до 26...30. Объемное содержание их в круге должно быть взаимосвязано с содержанием абразивного зерна: с уменьшением количества зерна в круге объем вводимых корундовых микросфер должен быть увеличен.

При использовании корундовых микросфер в качестве порообразователя нет необходимости добавлять другие порообразователи, за исключением стекланных микросфер для упрочнения связки. В случае применения силикатных или стекланных микросфер в количестве более 5...7 % объема круга обязательно надо вводить дополнительно выгорающие порообразователи, например, фруктовые молотые косточки. В противном случае может произойти охрупчивание керамической связки, она потеряет свою эластичность, необходимую для перераспределения режущих зерен на рабочей поверхности круга в процессе шлифования. Признак охрупчивания связки – характерный высокочастотный звук (звон) при простукивании инструмента и его работе.

Опыт изготовления высокопористых кругов на основе различных по составу порообразователей свидетельствует, что

правильное их назначение в сочетании с оптимальным количеством во взаимосвязи с другими компонентами рецептурного состава инструмента становится решающим фактором достижения максимально возможной разрывной скорости и, следовательно, рабочей скорости шлифования.

У высокопористых кругов на основе корундовых микросфер достигается самый высокий уровень разрывной прочности среди всех известных аналогов пористого инструмента на керамических связках. Корреляционный анализ влияния компонентов их состава на разрывную скорость показал, что содержание корундовых микросфер имеет самый высокий коэффициент парной корреляции с v_p , равный $-0,624$, относительно других компонентов. Далее ряд складывается следующим образом: размер абразивных зерен ($-0,595$), их содержание ($0,379$), количество связки ($0,252$) и стеклянных микросфер ($0,079$). Из корреляционной матрицы степени их взаимосвязи выделяются среди прочих сочетания содержания соответственно зерен и корундовых микросфер ($-0,912$), керамической связки и стеклянных микросфер ($0,859$) и абразивных зерен и стеклянных микросфер ($-0,668$).

Зависимость разрывной скорости от характеристики инструмента. При заданных зернистости и твердости регулируемым параметром характеристики круга остается его номер структуры, оптимальное назначение которого окончательно формирует работоспособность инструмента, включая уровень возможных скоростей шлифования.

Зависимость разрывной прочности или скорости высокопористых кругов от их основной характеристики – структурности при использовании различных технологий их изготовления – это решающий фактор конкурентоспособности и технического уровня промышленного применения.

Теория, изложенная в работах [93, 123], и модельные исследования [51] предсказывают, что с уменьшением объемного содержания абразивных зерен

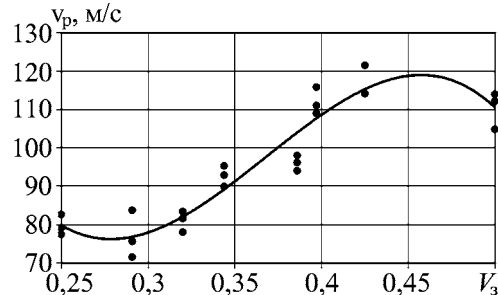


Рис. 5.28. Зависимость разрывной скорости шлифовального круга от относительного содержания абразивных зерен

в круге его прочность должна возрастать. Прямые эксперименты демонстрируют прямо противоположные результаты.

На рис. 5.28 приведены результаты измерения разрывной скорости шлифовальных кругов прямого профиля с размерами $350 \times 32 \times 76$ из электрокорунда белого зернистостью 16. Состав круга на основе силикатных и стеклянных микросфер, оливковых косточек и керамической связки (1-я группа составов по табл. 4.6) в зависимости от объемного содержания зерна подбирался таким образом, чтобы обеспечить одинаковую твердость при минимально возможной деформации в процессе обжига. Добиться постоянной твердости не удалось: степень твердости по глубине лунки изменялась от СМ2 до СТ1 ($h_d = 3,27 \dots 5,55$ мм), а по звуковому индексу – от М2 до С1 (ЗИ = $40,2 \dots 51,5$).

При построении зависимости $v_p(V_z)$ учитывалось фактическое содержание зерна в круге, т.е. принималась во внимание измеренная объемная деформация ϵ_w . Круг структуры 6 с $V_z = 0,5$ был изготовлен по традиционному рецепту: зерно, керамическая связка и увлажнители. Кривая получена компьютерным сглаживанием опытных точек методом среднееквadraticных отклонений.

Прямые измерения (см. рис. 5.28) показывают, что в целом наблюдается устойчивая тенденция к уменьшению разрывной скорости при увеличении струк-

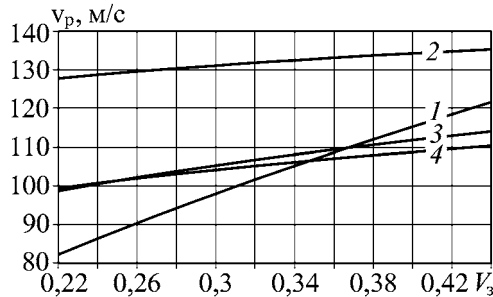


Рис. 5.29. Расчетная зависимость разрывной скорости высокопористых кругов зернистости 16 с твердостью С1 различного состава от объемного содержания абразивного зерна

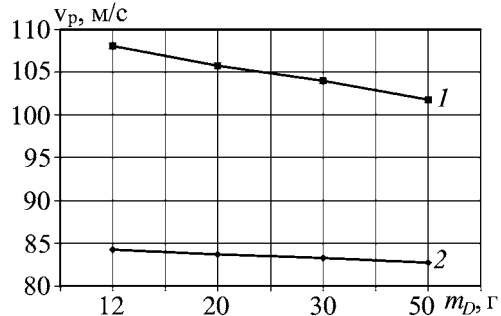


Рис. 5.30. График изменения разрывной скорости круга от его дисбаланса:
1 – закрытая структура; 2 – открытая структура

турности (пористости) шлифовального круга. Отклонения в зависимости $v_p(V_3)$ при $V_3 = 0,5$ и $0,25$ можно отнести к колебаниям твердости инструмента.

Если привести компьютерным моделированием значения разрывной скорости к постоянной твердости по глубине лунки в соответствии с многопараметрической моделью связи v_p с параметрами характеристики круга, то ее изменение от содержания зерен приобретает вид кривой 1 на рис. 5.29. На этом же рисунке представлены графические зависимости $v_p(V_3)$ для других трех исследованных групп составов высокопористых кругов на основе электрокорунда белого и карбида кремния зеленого с соответствующими обозначениями (см. табл. 4.6).

Статистические линеаризованные модели разрывной скорости для различных составов высокопористых кругов от их зернистости, твердости по глубине лунки и объемного содержания зерна приведены в табл. 5.21 вместе с характеристиками качества аппроксимации экспериментальных данных.

Представленные зависимости подтверждают сложный характер влияния состава высокопористого круга на его разрывную скорость. По расчетной модели наиболее низкий уровень прочности среди других составов имеют круги на

основе электрокорунда белого с силикатными микросферами и оливковыми косточками (см. рис. 5.29, кривая 1), но в диапазоне структур 14...20. Самый высокий уровень прочностных свойств высокопористых кругов обеспечивает технология изготовления с корундовыми микросферами. Для кругов на основе карбида кремния зеленого роль порообразователей в формировании прочностных свойств инструмента нивелируется в значительной степени из-за повышенного содержания керамической связки.

По расчетным моделям табл. 5.21 были определены разрывные скорости для некоторых высокопористых кругов, эффективно используемых на операциях профильного и глубинного шлифования замков турбинных лопаток (зернистость 12, твердость ВМ2, структура 12), профильного шлифования зубчатых колес из легированных сталей, а также шлицевых соединений из титановых сплавов (зернистость 16, твердость МЗ, структура 14) и резбошлифования и зубошлифования мелко модульных колес (зернистость 8, твердость СМ2, структура 20).

Разрывные скорости рассчитаны для кругов одинаковых характеристик, но различных 4 составов из электрокорунда белого и карбида кремния зеленого. Данные приведены в табл. 5.22.

**5.21. Математические модели связи разрывной скорости
высокопористых кругов различных составов с их зернистостью,
твердостью и структурой**

Номер группы	Математические модели связи
1	$\ln v_p = 5,150 - 0,187 \ln A_3 - 0,248 h_{\text{л}} + 0,566 \ln V_3$
2	$\ln v_p = 4,807 - 0,227 \ln A_3 - 0,270 h_{\text{л}} + 0,083 \ln V_3$
3	$\ln v_p = 4,740 - 0,210 \ln A_3 - 0,238 h_{\text{л}} + 0,208 \ln V_3$
4	$\ln v_p = 4,432 - 0,220 \ln A_3 - 0,010 h_{\text{л}} + 0,150 \ln V_3$

Номер группы	Коэффициенты парной корреляции			Оценка адекватности		
	A_3	$h_{\text{л}}$	V_3	КМК	ОД	F-отн.
1	-0,557	0,495	-0,508	0,911	0,204	16,273
2	-0,595	0,364	-0,426	0,952	0,131	16,112
3	-0,905	0,302	-0,630	0,980	0,541	41,455
4	-0,902	0,370	0,483	0,935	0,177	11,507

**5.22. Расчетные разрывные скорости высокопористых кругов различных
характеристик и составов**

Номер группы	Характеристика круга	Разрывная скорость, м/с
1	25A 12 BM2 12 K	91,5
2	25A 12 BM2 12 K	124,0
3	64C BM2 12 K	91,9
4	64C BM2 12 K	113,7
1	25A 16 M3 14 K	91,1
2	25A 16 M3 14 K	130,5
3	64C 16 M3 14 K	94,2
4	64C 16 M3 14 K	105,5
1	25A 8 CM2 10 K	127,3
2	25A 8 CM2 10 K	181,7
3	64C 8 CM2 10 K	123,6
4	64C 8 CM2 10 K	127,2

Можно отметить, что для одной и той же характеристики круга разрывная скорость может варьироваться до 40 % в зависимости от принятой технологии их изготовления. От рецептурного состава и характеристики круга зависит его предельная рабочая скорость. Для представленных примеров она изменяется от 80 до 120 м/с, что не всегда может быть обеспечено даже кругами нормальных структур.

Роль дисбаланса в разупрочнении шлифовальных кругов. К шлифовальным кругам, работающим при высоких скоростях резания (70 м/с и более), помимо других условий предъявляются более жесткие требования по их неуровненности массы. Такие требования продиктованы обеспечением безопасной работы с точки зрения повышенного риска разрыва шлифовального круга от действия силы неуровненной массы. Для высокоскоростных кругов устанавливается самый высокий – первый класс неуровненности.

Наличие дисбаланса m_D на расстоянии радиуса наружной поверхности R круга с массой M вызывает смещение центра масс относительно оси вращения на величину $\frac{m_D R}{M}$.

При вращении круга с угловой скоростью ω из-за действия центробежных сил в круге возникают внутренние растягивающие напряжения, действующие на поперечное сечение круга площадью S . Величину этих напряжений можно рассчитать по формуле

$$\sigma = \frac{M x_c \omega^2}{2S}, \quad (5.36)$$

где x_c – координата центра масс.

При наличии дисбаланса координата центра масс шлифовального круга с радиусом наружной поверхности R и отверстия r равна

$$x_c = \frac{4}{3\pi} \left(R + \frac{r^2}{R+r} \right) + \frac{m_D R}{M}.$$

Подставив это выражение в формулу (5.36) после соответствующих преобразований, получаем новую формулу для расчета внутреннего напряжения во вращающемся круге с учетом величины его дисбаланса

$$\sigma = \left(\frac{2}{3} \gamma (R^2 + rR + r^2) + \frac{m_D R}{2(R-r)H} \right) \omega^2 \quad (5.37)$$

или

$$\sigma = \left(\frac{2}{3} \gamma \left(1 + \frac{r}{R} + \frac{r^2}{R^2} \right) + \frac{m_D}{2(R^2 - Rr)H} \right) v^2. \quad (5.38)$$

В выражениях (5.37) и (5.38) масса круга представлена в виде произведения плотности на объем $M = \gamma \pi (R^2 - r^2) H$, а площадь поперечного сечения $S = (R - r)H$, где H – это высота круга.

Полученное выражение (5.38) можно также преобразовать для расчета возможной разрывной скорости при условии, что для данного круга известен предел прочности на растяжение

$$v_p = \sqrt{\frac{\sigma_p}{\frac{2}{3} \gamma \left(1 + \frac{r}{R} + \frac{r^2}{R^2} \right) + \frac{m_D}{2(R^2 - Rr)H}}}. \quad (5.39)$$

Таким образом, разрывная скорость и предел прочности на растяжение, являясь взаимосвязанными характеристиками прочности шлифовального круга, напрямую зависят от плотности, величины дисбаланса и размеров инструмента [82].

Для проверочных расчетов были выбраны круги из электрокорунда белого с зернистостью от 10 до 40, открытой и закрытой структуры с номерами от 6 до 22. Плотность исследованных кругов составляла от 1,51 до 2,20 г/см³, а дисбаланс от 3 до 26 г. При динамических испытаниях шлифовальные круги обеспечили разрывную скорость от 75,6 до 138 м/с.

По результатам испытаний установлено, что изменение дисбаланса в меньшей степени оказывает влияние на разрывную скорость кругов с большей плотностью. Так, например, для круга с закрытой структурой с плотностью $2,19 \text{ г/см}^3$ при увеличении дисбаланса от 12 г (1-й класс неуравновешенности) до 50 г (4-й класс) доля составляющей дисбаланса изменяется с 0,84 до 3,48 %. Максимальное влияние дисбаланса на разрывную скорость отмечено для кругов с открытой структурой и с плотностью $1,54 \text{ г/см}^3$. В этом случае при изменении дисбаланса от 12 до 50 г его доля составляет от 1,8 до 7,52%.

Зависимость разрывной скорости от плотности и дисбаланса круга была установлена также в результате статистического анализа экспериментальных данных. Математические модели связи разрывной скорости v_p с плотностью γ и дисбалансом m_D кругов из электрокорунда белого представляют собой следующие выражения:

для высокопористых шлифовальных кругов с открытой структурой

$$v_p = 46,97 \frac{\gamma^{1,082}}{m_D^{0,02}},$$

и для высокопористых шлифовальных кругов с закрытой структурой

$$v_p = 98,09 \frac{\gamma^{1,357}}{m_D^{0,042}}.$$

В качестве примера на рис. 5.30 показан график изменения разрывной скорости в зависимости от дисбаланса для круга с плотностью $1,77 \text{ г/см}^3$. По результатам статистического анализа на основе корреляционных оценок установлено, что влияние дисбаланса на разрывную скорость составляет 15...20 %.

Полученная расчетная формула (5.39) для разрывной скорости позволяет на этапах проектирования и изготовления оценить степень влияния дисбаланса

шлифовального круга на его возможную рабочую скорость.

В рассмотренных моделях разрывной скорости для высокопористых кругов различных составов (см. табл. 5.21) в явном виде не учитывается влияние неуравновешенности масс. Ее влияние по корреляционному анализу на разрывную скорость не столь статистически значимо: значение коэффициента парной корреляции колеблется от 0,187 до 0,449 в зависимости от состава круга, в отличие от влияния зернистости, твердости и структурности круга.

В прогнозных оценках возможной разрывной скорости высокопористых кругов ее уменьшение за счет неуравновешенности массы можно учесть соотношением

$$v_p^* = \frac{v_p}{m_D^\alpha},$$

где показатель степени α зависит от принятой технологии изготовления высокопористых кругов. Для 1-й группы составов $\alpha = 0,034$, для 2-й – 0,03, для 3-й – 0,036 и для 4-й – 0,196.

Влияние масштабного фактора на разрывную скорость инструмента. Современная физика твердого тела рассматривает разрушение как стохастический процесс, вероятность начала и характер протекания которого обусловлены в числе других факторов и объемом разрушаемого тела [22]. Между разрушающим напряжением σ_m и объемом W обычно принимается зависимость вида

$$\sigma_m \sim W^{-1/\delta}, \quad (5.40)$$

где δ – некоторая константа.

Такое же выражение для масштабного фактора выводится в теории предельных значений.

Из (5.40) следует, что с увеличением объема разрушаемого тела, нагрузка разрушения должна уменьшаться.

Для определения роли масштабного фактора в изменении разрывной скорости были изготовлены две партии кругов двух

5.23. Влияние размеров шлифовальных кругов на их свойства

Характеристика круга	Размеры круга	v_p , м/с	W , см ³	γ , г/см ³	ε_w , %	h_{Δ} , мм	m_D , г
99BA 80 K 10 V 25A 16 CM1 10 K	200×20×20	126,7	622	2,06	0,61	3,5	6
	350×32×76	119	2918	2,09	1,18	3,4	9
	600×50×203	135	12513	2,07	0,02	3,4	47
99BA 180 L 10 V 25A 6 CM2 10 K	200×20×20	146,6	622	2,15	1,26	2,9	–
	350×32×76	148	2918	2,18	2,53	2,9	3
	600×50×203	147,6	12513	2,10	0,26	3,0	20

Примечание. Характеристика кругов дана в обозначении фирмы Carborundum Electrite a.s. и в отечественном варианте.

различных рецептур и соответственно характеристик трех типоразмеров каждого состава. Основные свойства этих кругов, включая разрывную скорость, представлены в табл. 5.23. Влияние масштабного фактора в нашем примере обусловлено не только изменением объема шлифовального круга в 20 раз, но и различием значений коэффициента $k = \frac{d}{D}$. По (5.31) уве-

личение k приводит к уменьшению разрывной скорости шлифовального круга. Для исследованных кругов значения k изменялись от 0,1 до 0,34, что также негативно должно сказаться на прочностных свойствах высокопористых кругов.

Анализ представленных в табл. 5.23 результатов дает основание сделать заключение о том, что в диапазоне исследованных условий по зернистости, твердости и размерам инструмента его объем и значение отношения $\frac{d}{D}$ не оказывают

заметного влияния на разрывную скорость. Ее рассеяние, несмотря на относительно большую неуравновешенность масс для кругов диаметром 600 мм, который можно рассматривать в качестве дополнительного негативного фактора, не превысило 6,5 % для круга с характери-

стикой 25A 16 CM1 10 K и составило менее 1 % для круга с характеристикой 25A 6 CM2 10K. Указанное рассеяние можно отнести к статистической погрешности измерения разрывной скорости круга.

В заключение можно отметить, что разрывная скорость высокопористых кругов, так же, как и инструмента с нормальной структурой, зависит от множества факторов, которые определяются как технологическими особенностями их изготовления, так и характеристикой абразивного инструмента. При этом необходимо различать шлифовальные круги по абразивному материалу: для высокопористых кругов на основе электрокорунда разрывная скорость при одной и той же зернистости, твердости и номере структуры всегда будет больше, чем для инструмента на основе карбида кремния.

Разрывная и соответственно рабочая скорости круга будут тем больше, чем меньше его зернистость и номер структуры и выше степень твердости. Наибольшие рабочие скорости – до 140 м/с – можно обеспечить при шлифовании высокопористыми кругами зернистостью 6...10, со структурами 9...12 и твердостью CM1...CT1. Инструмент с такими характеристиками, как правило, предназначен для прецизионной обработки ответствен-

ных деталей, в том числе после их химико-термической обработки.

Высокопористые круги с размерами зерна 0,12...0,16 мм, твердостью ВМ2...М3 и с номерами структуры 10...16 могут обеспечить рабочую скорость до 110 м/с. Круги с такими характеристиками эффективны при профильном глубинном и чистовом шлифовании фасонного режущего инструмента, замков турбинных лопаток, зубчатых колес и шлицевых соединений и т.д. с удалением припуска до 10 мм за один или несколько проходов. Они также эффективны при бесприжоговом шлифовании по схемам маятниковой обработки с удалением припуска до 0,5...1 мм.

Для операций чернового шлифования высокопористыми кругами зернистостью 25...40 на керамических связках скорость обработки может достигать 70...80 м/с.

В исследованиях, результаты которых описаны в данном разделе, экспериментально измеренная разрывная скорость высокопористых кругов составила 79,8...168 м/с. При тестовых заводских испытаниях на разрыв высокопористого круга 180×20×20 с характеристикой 25А 16 СМ2 12 К5 перед операцией внутреннего шлифования дорожки подшипника он не разорвался при скорости 188 м/с – предельной испытательной скорости разрывной машины. По-видимому, масштабный фактор сильнее сказывается при диаметре круга менее 100 мм, чем в исследованном и описанном диапазоне 200...600 мм.

При назначении рабочей скорости шлифовального круга необходимо учитывать государственные стандарты и стандарты фирм-производителей, которыми устанавливаются коэффициенты запаса прочности. Его величина может колебаться от 1,1 до 1,5 для наиболее распространенных в производстве условий шлифования на станках с закрытой зоной обработки. В России его величина, как правило, больше, чем это допускается за рубе-

жом. Из-за указанного несоответствия могут возникать разногласия между отечественным потребителем и зарубежным изготовителем по предельной рабочей скорости, особенно для скоростей обработки более 63 м/с.

Прочностные исследования проводились на кругах стандартных конструкций прямого профиля без упрочнения отверстия и других технологических приемов и усовершенствований. Изучалось только влияние рецептурного состава и характеристики инструмента на свойства, качество и экологичность изготовления. Использование специальных приемов может дополнительно повысить разрывную скорость высокопористых кругов не менее чем на 20...40 % [51, 93, 123].

5.6. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ВЫСОКОПОРИСТЫХ КРУГОВ ИЗ РАЗЛИЧНЫХ АБРАЗИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Был выполнен сравнительный анализ технологических и эксплуатационных свойств высокопористых шлифовальных кругов одного типоразмера 1350×32×76 одинаковой зернистости 16 и структуры 12, но из различных абразивных материалов. В качестве абразивов были использованы (обозначения фирмы Carborundum Electrite a.s.): электрокорунды белый 99А, хромтитанистый 98А, циркониевый 97ЕА и SG-модификация в виде микрокристаллического корунда 99SA в композиции 50 % SG + 50 % 99А, а также карбид кремния черный 48С и зеленый 49С.

В состав корундовых шлифовальных кругов входили по объемному содержанию 38 % абразива, 14 % керамической связки, а в качестве порообразователя корундовые и стеклянные микросферы. Состав инструмента на основе карбида кремния отличался повышенным содержанием связки – 18 % и другими количественными соотношениями аналогичных порообразователей.

Каждая из исследованных рецептур была изготовлена с учетом своих технологических особенностей по составу керамической связки и температурному режиму обжига. Из-за указанных особенностей не удалось получить для всех кругов из различных абразивных материалов одинаковую степень твердости, хотя в целом приближение достаточно близкое: все высокопористые корундовые круги имели степень твердости МЗ/СМ1, а инструмент на основе карбида кремния – СМ2/С2 в зависимости от метода измерения твердости.

Приведенные в табл. 5.24 сведения дают возможность сравнить технологические и эксплуатационные свойства высокопористых кругов из различных абразивов, что безусловно имеет практический интерес для их изготовления и применения. Для сопоставления в таблице приведены также аналогичные сведения по инструменту нормальной структуры на специальной высокопрочной керамической связке.

По каждой рецептуре было изготовлено 3 образца, что позволило оценить статистические характеристики свойств: диапазон рассеяния, среднее значение, среднеквадратичное отклонение и коэффициент вариации.

Исследованные высокопористые круги на основе различных модификаций корунда имеют практически одинаковые технологические свойства по усилию прессования и деформации и близкие значения по разрывной скорости (в пределах ошибки измерения $\pm 1,83$ м/с), за исключением инструмента на основе микрокристаллического корунда SG. При его изготовлении усилие прессования было в 3 раза больше, а достигнутая разрывная скорость – на 20 % меньше.

Можно отметить достаточно большое рассеяние по неуравновешенности масс: от 3 до 25 г для корундовых кругов. Однако этот выходной параметр качества изготовления кругов вообще отличается

большим разбросом (см. п. 5.4). В нашем случае колебания неуравновешенности масс обусловлены его зависимостью от деформации круга при его прессовании, которая измеряется по "уплотнению" высоты H относительно расчетной. Чем больше указанная деформация, тем больше величина измеренного дисбаланса круга.

Высокопористые круги на основе карбида кремния зеленого и черного по технологичности изготовления и эксплуатационным свойствам показали близкие результаты по усилию прессования, деформации, твердости и разрывной скорости. Для этой группы кругов разрывная скорость оказалась до 17 % меньше, чем для корундовых кругов структуры 12, но примерно на одном уровне с кругами на основе микрокристаллического корунда.

По характеристике экологичности изготовления – потере массы при обжиге ΔM , все круги показали результаты, обусловленные количеством содержащейся в них керамической связки. Карборундовые круги имели в своем составе связки на 28,5 % больше, чем корундовые круги, и соответственно степень выгорания абразивной массы у них до 24 % выше. Этот вывод подтверждает и величина ΔM для круга нормальной структуры: потеря массы у него уменьшается пропорционально количеству керамической связки.

Оценка неуравновешенности масс по классу дает относительно стабильные значения для всех кругов. Только все циркониевые круги имели дисбаланс в соответствии с 1-м классом неуравновешенности, для остальных составов, включая электрокорундовые круги нормальной структуры, его величина соответствовала 1-му классу неуравновешенности для 1...2-го образцов, а для остальных – 2-му классу.

Можно отметить очень важный результат в приведенном исследовании: круги структуры 12 на основе электрокорунда белого, хромтитанистого и циркониевого с применением невыгорающих

**5.24. Технологические и эксплуатационные свойства высокопористых кругов
из различных абразивных материалов и их стабильность**

Технологические и эксплуатационные свойства	Свойства кругов на основе									
	99А структура 6	99А	97ЕА	98А	99SА	48С	49С	Структура 12		
		20	20	20	60	20	20			
Усилие прессования, МПа	197	20	20	20	60	20	20			
Плотность абразивной массы, г/см ³	2,31	2,03	1,98	1,99	1,90	1,81	1,80			
Плотность круга после обжига, г/см ³	2,20	1,97	1,93	1,91	–	1,82	1,81			
Деформация при прессовании, %	0,4	4,4	1,4	3,1	0	1,1	0,5			
Объемная деформация при обжиге ϵ_v :										
диапазон изменения, %	0,3...0,53	2,34...2,42	2,23...2,42	1,99...2,54	–	5,34...6,05	5,74...6,16			
среднее значение, %	0,4	2,4	2,7	2,2	–	5,7	6,0			
среднеквадратичное отклонение, %	0,013	0,034	0,30	0,26	–	0,29	0,17			
коэффициент вариации, %	3,2	1,4	11,1	19,7	–	5,1	2,9			
деформация, %:										
по D	0,04	0,64	0,69	0,59	–	1,54	1,77			
по H	0,12	1,03	1,21	0,96	–	2,50	2,30			
по d	0,11	0,35	0,23	0,20	–	1,19	1,08			
Потеря массы ΔM , %	5,0	5,28	5,29	5,93	–	6,50	6,53			
Твердость по глубине лунки h_d :										
диапазон изменения, мм	3,5...4,0	3,3...4,9	4,03	3,79	4,35	3,04	3,08			
среднее значение, мм	3,72	4,35								
среднеквадратичное отклонение, мм	0,17	0,19	0,18	0,23	0,19	0,19	0,13			
коэффициент вариации, %	4,5	4,4	4,5	5,1	4,3	6,2	4,2			

Продолжение табл. 5.24

Технологические и эксплуатационные свойства	Свойства кругов на основе							
	99A	99A	97EA	98A	99SA	48C	49C	Структура 12
	Структура 6							
Твердость по звуковому индексу:								
среднее значение	51,7	47,4	47,7	46,5	44,8	57,2	57,7	
среднеквадратичное отклонение	0,022	0,013	0,012	0,016	0,012	0,030	0,023	
коэффициент вариации	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,05	0,04	
Степень твердости	CM1/C1	M3/CM1	M3/CM1	CM1/CM1	M3/CM1	CM2/C2	CM2/C2	
Неуравновешенность масс m_D :								
диапазон изменения, г	7...25	8...19	4...6	12...18	8...16	3...15	9...15	
среднее значение, г	16	14	5	16	13	7	12	
среднеквадратичное отклонение, г	7,3	5	0,9	2,6	3,4	5,4	2,5	
коэффициент вариации, %	24,6	35,7	18,0	16,2	26,1	77,1	20,8	
Разрывная скорость v_p :								
диапазон изменения, м/с	104,8...113,9	121,1...123	117,4...119,3	114,2...132,3	97,5...104,8	103,7	103,3...108,8	
среднее значение, м/с	110,2	121,7	118	121,4	101,2	103,7	105,7	
среднеквадратичное отклонение, м/с	3,96	0,86	0,87	7,81	2,97	0	2,27	
коэффициент вариации, %	3,6	0,7	0,7	6,4	2,9	0	2,1	

5.25. Технологические и эксплуатационные свойства высокопористых кругов из карбида кремния зеленого и черного и их стабильность

Технологические и эксплуатационные свойства	Свойства кругов на основе карбида кремния			
	зеленого		черного	
	структура 10	структура 20	структура 10	структура 20
Усилие прессования, МПа	177	20	163	20
Плотность абразивной массы, г/см ³	1,87	1,68	1,88	1,64
Плотность круга после обжига, г/см ³	1,81	1,62	1,82	1,59
Деформация при прессовании, %	0,55	14,4	0,37	13,0
Объемная деформация при обжиге ϵ_v , %:				
диапазон изменения	2,07...2,56	11,44...11,92	2,44...3,12	11,6...12,41
среднее значение	2,25	11,64	2,74	11,94
среднеквадратичное отклонение	0,22	0,20	0,29	0,34
коэффициент вариации	9,56	1,74	10,4	2,86
деформация, %: по D	0,44	3,21	0,52	3,28
по H	1,32	5,31	1,64	5,50
по d	0,31	1,09	0,41	0,9
Потеря массы ΔM , %	3,3	3,7	3,3	3,1
Твердость по глубине лунки h_d , мм:				
диапазон изменения, мм	2,7...3,4	3,3...4,9	2,7...3,8	3,2...3,9
среднее значение, мм	3,11	3,66	3,04	3,63
среднеквадратичное отклонение, мм	0,18	0,39	0,23	0,22
коэффициент вариации, %	5,7	10,7	7,5	6,0
Твердость по звуковому индексу:				
среднее значение	59,4	49,6	59,2	50,3
среднеквадратичное отклонение	0,015	0,026	0,041	0,022
коэффициент вариации	0,02	0,05	0,07	0,04
Степень твердости	CM2/CT1	CM1/M3	CM2/CT1	CM1/CM1

Продолжение табл. 5.25

Технологические и эксплуатационные свойства	Свойства кругов на основе карбида кремния			
	зеленого		черного	
	структура 10	структура 20	структура 10	структура 20
Неуравновешенность масс m_D :				
диапазон изменения, г	3...16	2...5	6...18	7...12
среднее значение, г	12	4	13	10
среднеквадратичное отклонение, г	6,1	1,2	5,1	2,2
коэффициент вариации, %	50,8	30	39,2	22
Разрывная скорость v_p :				
диапазон изменения, м/с	114...117,7	87,2...96	109,7...118,9	92,8...98,2
среднее значение, м/с	117,0	92,5	113,4	95,8
среднеквадратичное отклонение, м/с	2,27	3,84	3,96	2,21
коэффициент вариации, %	1,9	4,1	3,5	2,3

порообразователей могут шлифовать при скорости резания на 10 % больше, чем более твердый круг нормальной структуры. Уровень рабочих скоростей для них равен 80...100 м/с в зависимости от требований российского или зарубежных стандартов.

Более высокий уровень скоростей шлифования обеспечивают также высокопористые круги на основе микрокристаллического корунда, карбида кремния зеленого и черного – до 63 м/с.

Повышенная скорость обработки указанным инструментом сочетается с их более широким диапазоном по области и эффективности применения.

Относительно полученных значений разрывной скорости для кругов из различных абразивных материалов можно дать следующие объяснения [51]. Прочность шлифовального круга и соответственно его разрывная скорость зависят от

твердости или, другими словами, от прочности связи абразивного зерна с керамической связкой. Адгезия между зернами и связкой с наличием переходной реакционной зоной существенно влияет на общее напряженное состояние шлифовального круга. В отличие от слабой адгезионной связи зерен со связкой, когда основную нагрузку от центробежных сил воспринимает связка, при значительной адгезии большая часть нагрузки – до 68 % – перераспределяется на зерна в объеме инструмента. Только оставшиеся 32 % действующей нагрузки приходится на связку.

Шлифовальные круги с сильной адгезионной связью будут прочнее, чем круги, имеющие слабую связь зерен со связкой. В этом объяснение более высокой разрывной скорости на основе электрокорунда в сравнении с кругами из карбида кремния, несмотря на их более высокую

твердость по глубине лунки и звуковому индексу.

Для инструмента со значительной адгезией между его компонентами напряженное состояние и прочность зависят от прочности зерен, которая и определяет разрывную скорость кругов из различных модификаций электрокорунда при одной и той же их твердости. В этом причина пониженной разрывной скорости кругов на основе микрокристаллического корунда в сравнении с другими корундовыми аналогами.

Практический интерес представляют также полученные результаты по технологическим и эксплуатационным свойствам высокопористых кругов на основе карбида кремния зеленого и черного. Эти круги изготавливались с применением силикатных микросфер и оливковых молотых косточек (3-я группа составов по табл. 4.6) двух структур: 10-й и 20-й. Рецептурные составы по содержанию связки и порообразователей по этим структурам были идентичны для двух видов абразивного материала. Широкий диапазон объемного содержания зерна круга от 0,22 до 0,42 дает возможность сравнения как технологичности их изготовления, так и по

возможным эксплуатационным свойствам (табл. 5.25).

Сравнительный анализ представленных в табл. 5.25 экспериментальных данных позволяет констатировать принципиальную возможность изготовления высокопористых кругов структур 10...20 из карбида кремния зеленого и черного на основе композиции из выгорающих и невыгорающих порообразователей. Это также возможно и на основе применения только невыгорающих порообразователей – корундовых микросфер.

Исследованные технологические и эксплуатационные свойства двух типов кругов 10-й и 20-й структур практически не отличаются по своим значениям. Исключение составляет только уменьшение средней неуравновешенности масс для круга из карбида кремния зеленого структуры 20 до 4 г относительно $m_D = 10$ г для аналога из карбида кремния черного и некоторое несоответствие по разрывной скорости. Для круга структуры 10 из карбида кремния зеленого она на 3 % больше, чем у аналога из черного карбида кремния, а у кругов структуры 20 наоборот: разрывная скорость на 3,5 % больше у высокопористого круга из зерна карбида кремния черного.

Глава 6

ШЛИФОВАНИЕ ДЕТАЛЕЙ И ИНСТРУМЕНТА ИЗ КОНСТРУКЦИОННЫХ И БЫСТРОРЕЖУЩИХ СТАЛЕЙ

6.1. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ ВЫСОКОПОРИС- ТЫХ КРУГОВ ПРИ ШЛИФОВАНИИ

Высокопористый абразивный инструмент, в основном, применяется на операциях шлифования. Шлифование – это наиболее распространенный в машиностроении процесс. Среди других методов абразивной обработки его выделяет высокая производительность съема материала и возможность обеспечения повышенных требований качества обработки, точности формы и размеров ответственных деталей.

В настоящее время процесс шлифования успешно конкурирует с методами лезвийной обработки, заменяя такие процессы, как фрезерование, строгание, протягивание, особенно при резании труднообрабатываемых материалов: никелевых, титановых, твердых сплавов и др.

Современные тенденции совершенствования процессов шлифования заключаются в повышении скоростей резания – до 100 м/с и выше, увеличении глубины резания – до 10 мм за проход и более, отказе от применения смазочно-охлаждающих жидкостей (экологически чистое сухое шлифование). Реализация указанных тенденций находится в прямой зависимости от эксплуатационных возможностей применяемого абразивного инструмента.

Преимущества шлифовальных кругов, достигнутые в результате освоения новой технологии их изготовления, в сочетании с особенностями строения высокопористого абразивного инструмента открывают и новые возможности существенного повышения эффективности про-

цессов обработки с их применением. Проведенные испытания и практика внедрения высокопористого абразивного инструмента закрытой структуры в промышленности являются тому подтверждением.

Наибольший эффект достигается, как этого и следовало ожидать, при обработке конструкционных материалов, чувствительных к структурно-фазовым превращениям и термодинамическим дефектам, характерным для шлифования – прижога, сколам и трещинам.

Шлифование конструкционных сталей. Конструкционные стали различных классов занимают наибольший удельный вес среди обрабатываемых материалов в машиностроении, поэтому повышение производительности и качества их обработки является существенным резервом улучшения экономических показателей и конкурентоспособности машиностроительной продукции.

В лабораторных условиях ВНИИАШ были проведены сравнительные испытания новых высокопористых кругов с характеристикой 25А 25 СМ1...СМ2 14 К5 ПГ и кругов с 8-й структурой со сферо-рундом в качестве порообразователя.

Шлифовальные круги типоразмера 1 250×32×76 испытывали с целью оценки эксплуатационных параметров по экспресс-методике на операциях плоского и круглого наружного шлифования на станках мод. 3Е711ИБ и "Дж. Шипман 1070". Испытания проводились на материалах: сталь ШХ15 (60...62 HRC), сталь Р6М5 (60...62 HRC), сталь 12Х18Н10Т, сталь 40Х (40...44 HRC), при следующих режимах: скорость круга $v_{кр} = 35$ м/с, глубина шлифования $t = 0,01...0,1$ мм на двойной

ход, поперечная подача $S_{\text{поп}} = 1,0 \dots 2,5$ мм/дв.ход, продольная подача $S_{\text{пр}} = 1,0 \dots 1,5$ м/мин, скорость детали $v_d = 10 \dots 20$ м/мин (плоское шлифование), $v_d = 30$ м/мин (круглое шлифование).

Результаты испытаний показали, что шлифовальные круги, изготовленные по новой рецептуре, по сравнению с кругами из сфериокорунда обеспечивали:

- на операциях плоского шлифования повышение коэффициента шлифования при обработке сталей ШХ15, Р6М5 в 1,5 раза, коррозионно-стойкой стали 12Х18Н10Т в 1,2...1,5 раза.
- на операциях круглого наружного шлифования при обработке стали 40Х коэффициент шлифования увеличивается в 1,3 раза, стойкость кругов выше до двух раз.

Также были проведены сравнительные испытания кругов при глубинном шлифовании образцов из различных марок сталей. Эксперименты выполнялись на специальном глубинном плоскошлифовальном станке мод. 3Е721ГВ1. Скорость шлифования во всех опытах составляла $v_{\text{кр}} = 17$ м/с. Испытывались круги типоразмера 1 300×16×127 различных характеристик. Правка кругов осуществлялась алмазно-металлическим карандашом. Шлифование проводилось со смазочно-охлаждающей жидкостью. В качестве СОТС применялся водный раствор нитрата натрия (0,3 %) и триэтаноламина (0,3 %).

Критерий оценки стойкости кругов – появление прижогов на шлифованной поверхности. Испытания проводились кругами с прямым и угловым профилем.

При шлифовании стали 40Х на режиме $v_d = 100$ мм/мин, $t = 2,0$ мм коэффициент шлифования с учетом правки для новых шлифовальных кругов был в 1,3 раза выше, чем для кругов с наполнителем из фруктовых косточек и в 1,8 раза выше, чем для кругов с наполнителем из перлита, а стойкостная наработка увеличилась до двух раз.

При шлифовании стали Х12М (55...60 HRC) на режиме $v_d = 75$ мм/мин,

$t = 0,8$ мм коэффициент шлифования увеличился в 1,5...1,8 раза, а стойкостная наработка в 2 раза.

В этих испытаниях использовались высокопористые круги характеристик 24А 10 ВМ2 12 К5 ПГ и 24А 40 М2 12 К5 ПГ, которые сравнивали с высокопористыми кругами на перлите 24А 10 М1 10 К5 ПГ/ П 40-20, 24А 10 М1 12 К5 ПГ/ П 40-15 и на фруктовых косточках 24А 40 М2 10 К5 ПГ/ КФ 40-10, 24А 10 ВМ2 10 К5 ПГ/ КФ 40-15.

Помимо указанных сталей 40Х и Х12М новым инструментом хорошо обрабатывалась нетермообработанная сталь Х18Н9Т. При постоянной скорости резания скорость детали изменялась в диапазоне 50...100 мм/мин, а глубина обработки за один проход от 0,4 до 2 мм.

По результатам испытаний было отмечено также, что силовые и тепловые нагрузки на алмазные зерна правящего карандаша имеют меньшие значения при правке нового высокопористого инструмента, разрушение связующих мостиков происходит легко, так как в процессе правки без охлаждения нет характерного звука и светящейся точки в зоне контакта. Общая нагрузка на круг при шлифовании конструкционных низколегированных сталей с твердостью 40...45 HRC на 15...25 % меньше в зависимости от режима обработки, однако износ при этом увеличивается пропорционально интенсивности съема металла.

При профильном шлифовании технико-экономические показатели у высокопористых абразивных кругов с корундовыми микросферами на 10...15% выше, чем у кругов, изготовленных на основе молотых фруктовых косточек.

Высокопористые шлифовальные круги закрытой структуры при маятниковом и глубинном шлифовании сталей, как показали испытания во ВНИИАШ, превосходят по своим эксплуатационным свойствам отечественные аналоги инструмента, изготовленного на основе перлита и фруктовых косточек.

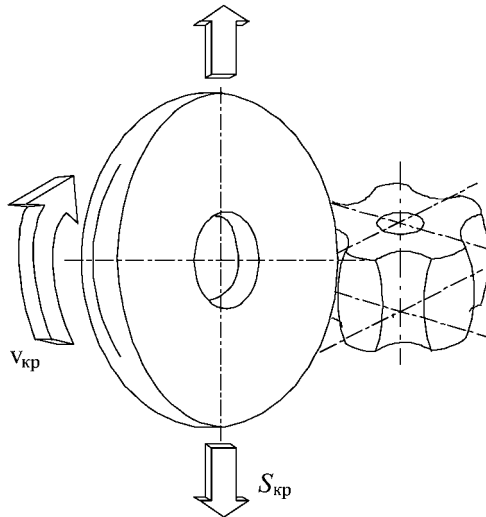


Рис. 6.1. Маятниковое шлифование дорожек обоймы наружного шарнира

Бесприжоговое шлифование дорожек качения обоймы наружного шарнира. На автомобильном заводе были проведены производственные испытания новых высокопористых абразивных кругов повышенного качества с целью уменьшения прижогов при шлифовании дорожек качения обоймы наружного шарнира. Схема обработки детали автомобиля показана на рис. 6.1.

Испытания проводились в два этапа. На первом этапе выявлялась характеристика круга, обеспечивающая высокое качество обработанной поверхности.

Для испытаний были выбраны и изготовлены шлифовальные круги двух характеристик: 25А 25П СМ1 12 К5 и 25А 25П С1 12 К5 типоразмера 1 135×19,5×52.

Маятниковое шлифование на станке фирмы "Эксцелло" при обработке дорожек качения обоймы наружного шарнира (материал обрабатываемой детали: сталь АС14ХГН) выполнялось при использовании охлаждения 3%-ным раствором "Конвекс" на следующих режимах: скорость круга $v_{кр} = 45$ м/с, подача круга $S_{кр} = 1000$ град/мин, глубина резания $t = 0,2$ мм. Режимы правки круга: скорость

правлящих роликов $v_{рол} = 300$ об/мин, подача $S_{пр} = 10$ мм/мин, глубина правки $t_{пр} = 0,02$ мм.

Критерием оценки работоспособности круга являлся визуальный контроль появления прижогов (по величине отношения количества деталей, обработанных с прижогом, к общему количеству обработанных деталей (в %) и токовая нагрузка).

Испытания проводились в сравнении с высокопористым шлифовальным кругом импортного производства с характеристикой 25А 16П СМ1 10 К5, который использовался при изготовлении деталей данного типа.

В результате испытаний установлено следующее.

После шлифования кругами с характеристикой 25А 25П СМ1 12 К5 1116 дорожек качения у 186 деталей количество деталей с зафиксированными прижогом составило менее 2 %. Появление прижогов не имело закономерного характера. Токовая нагрузка при шлифовании составляла величину до 5 А.

При испытании более твердых кругов с характеристикой 25А 25П С1 12 К5 токовая нагрузка была выше 6,5 А, при этом частота появления прижогов резко увеличилась и испытания этих кругов были прекращены.

При шлифовании серийными кругами с характеристикой 25А 16П СМ1 10 К5 количество деталей с прижогом на момент проведения испытаний находилось в пределах до 5 %. Токовая нагрузка достигала 6,5 А.

В результате сравнительного анализа было установлено, что круги типоразмера 1 135×19,5×52 с характеристикой 25А 25П СМ1 12 К5 обеспечивают снижение токовой нагрузки при шлифовании в 1,3 раза и более высокое качество обработки, поэтому они были рекомендованы для последующих испытаний.

На втором этапе заводских испытаний выявлялся оптимальный рецептурный состав круга, обеспечивающий минималь-

6.1. Характеристики качества высокопористых кругов и их эффективности при шлифовании дорожек качения обоймы наружного шарнира

Рецепт круга	Стабильность твердости σ_{H_1} , мм	Относительная объемная деформация ε_v , %	Дисбаланс m_D , г	Токовая нагрузка I , А
№ 1	0,43	6,23	4	—
№ 2	0,25	4,22	3	3,5...4,5
№ 3	0,34	5,39	3,5	3,5...4,5
№ 4	0,52	13,17	5	До 5

ную деформацию инструмента при его изготовлении и при сохранении достигнутых результатов по качеству обработки. Для выбора рецептуры шлифовального круга с минимальной деформацией при обжиге были изготовлены круги характеристики 25А 25П СМ1 12 К5 типоразмера 1 135×19,5×52 трех рецептур с различными комбинациями и объемным содержанием порообразующих наполнителей (корундовых и стеклянных микросфер).

Полученный диапазон свойств шлифовальных кругов рецептов 1, 2, 3 составил: глубина лунки 3,3...3,6 мм; СКО глубины лунки 0,25...0,52 мм и дисбаланс круга 3...5 г.

Критерием оценки деформации кругов при обжиге являлась относительная объемная деформация, которая обеспечивала требуемые размеры инструмента без его дополнительной механической обработки. Результаты сравнивались с относительной объемной деформацией кругов, испытанных на первом этапе (рецепт № 4).

Результаты статистической обработки полученных данных представлены в табл. 6.1.

В результате проведенных исследований установлено, что относительная объемная деформация у кругов, изготовленных по рецептам № 2 и № 3 меньше, чем у кругов, изготовленных по рецептам № 1 и № 4. Шлифовальные круги по рецепту № 2 имеют относительную дефор-

мацию по объему круга при обжиге в 3,1 раза меньше по сравнению с кругами рецепта № 4, и в 2,4 раза по сравнению с кругом по рецепту № 3.

Критическая допустимая объемная деформации для структуры 12 составляет 5,26 %, и следовательно, только рецепт № 2 обеспечивает сохранение заданной структуры инструмента в процессе его изготовления.

При сравнении качества высокопористых кругов по показателю стабильности твердости можно заключить, что круг, изготовленный по рецепту № 2, имеет стабильность твердости в объеме инструмента в 2,1 раза выше, чем по рецепту № 4. Это обеспечивается за счет увеличения содержания корундовых микросфер до 20 % и увеличении времени смешивания высокопористой абразивной массы в 1,2 раза.

Все испытанные шлифовальные круги соответствовали 1–2-му классу неуравновешенности масс, что удовлетворяло техническим требованиям на обработку.

Абразивные круги одной характеристики 25А 25П СМ1 12 К5, но двух рецептур № 2 и № 3 были выбраны для последующих производственных испытаний. Они проводились в одинаковых условиях и по методике, описанной выше.

В результате проведенных производственных испытаний установлено следующее.

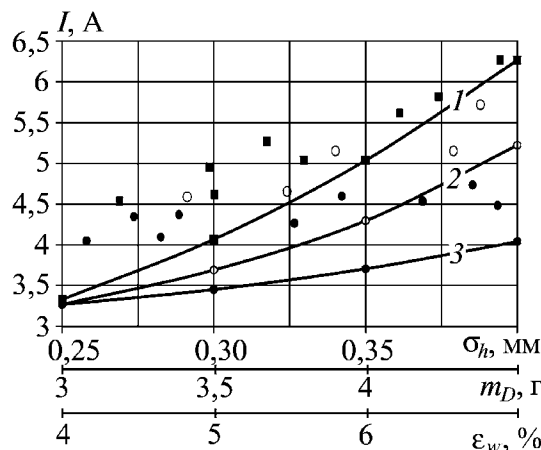


Рис. 6.2. Влияние показателей качества круга на токовую нагрузку при шлифовании:
1 — σ_h ; 2 — m_D ; 3 — ϵ_w

Кругами, изготовленными по рецепту № 2 снова было обработано 1116 дорожек качения у 186 обойм наружного шарнира. Прижоги при шлифовании не наблюдались. Токовая нагрузка составила от 3,5 до 4,5 А в зависимости от припуска.

При испытании кругов такой же характеристики по рецепту № 3 прижоги при шлифовании также не наблюдались, токовая нагрузка была аналогичной от 3,5 до 4,5 А в зависимости от припуска. Точность обработки во всех случаях соответствовала требованиям чертежа детали, разброс геометрических размеров составил 0,001...0,003 мм.

Высокопористые круги рецептур № 2 и № 3 показали в конечном итоге одинаковые результаты несмотря на различный состав кругов. Это дает основание полагать, что введение корундовых микросфер в структуру шлифовального круга сохраняет его режущий потенциал, несмотря на изменение свойств по деформации и стабильности твердости.

По результатам производственных испытаний и статистической обработки полученных данных была разработана математическая модель связи показателей качества высокопористых кругов — твер-

дости σ_h , неуравновешенности масс m_D и объемной деформации ϵ_w — с выходной характеристикой процесса шлифования — токовой нагрузкой I :

$$\ln I = 4,185 + 1,104 \ln \sigma_h + 0,895 m_D + 0,325 \ln \epsilon_w. \quad (6.1)$$

Характеристики адекватности полученной математической модели составляют: КМК 0,923, остаточная дисперсия 0,425, F-отношение 492,021. Графическое представление полученной модели показано на рис. 6.2.

Наибольшее влияние на токовую нагрузку и, следовательно, на вероятность появления прижогов на обработанной поверхности оказывают стабильность твердости ($R = 0,976$) и дисбаланс круга ($R = 0,926$). Нестабильность срезаемого слоя материала при увеличении дисбаланса приводит к нестабильности силы резания и, следовательно, токовой нагрузки и увеличению количества прижогов. В меньшей степени влияет на токовую нагрузку при шлифовании объемная деформация круга при обжиге ($R = 0,848$).

Прецизионное шлифование. Были проведены испытания высокопористых

абразивных кругов на операциях прецизионного шлифования деталей типа "шток", "втулка", изготовленных из сталей 45X14H14B2M и 95X18Ш после азотирования (не менее 700 HV). Основанием для испытания послужила низкая кромкоустойчивость применяемых на заводе кругов с характеристикой 25A 25H CM2 6 K при круглом наружном шлифовании деталей указанного типа. Низкая размерная стойкость шлифовальных кругов приводила к быстрому износу абразивного инструмента и, соответственно, к его частой правке и замене.

Имело место также скалывание азотированных отсечных кромок при их шлифовании кругами с характеристикой 25A 8П CM2 6 K после предварительной лезвийной и абразивной обработок и азотирования штоков.

Для повышения эффективности обработки были предложены шлифовальные круги с высокими номерами структур.

Отсечные кромки штоков обрабатывались на круглошлифовальном станке модели КШ-3К высокопористым кругом прямого профиля размером $400 \times 10 \times 127$ с характеристикой 92A 6П CM2 10 K. Шлифование проводилось на следующих режимах: $v_{кр} = 35$ м/с; $v_d = 7 \dots 9$ м/мин; $t = 1 \dots 3$ мкм/об.дет.; удаляемый припуск составлял не более 0,3 мм на сторону. Зона резания охлаждалась 3%-ным раствором на основе "Москвинола" с расходом 5...6 л/мин.

Контроль точности штоков, шлифованных высокопористыми кругами, показал, что все детали отвечали требованиям чертежа по точности обработки: перпендикулярность торца относительно главной оси составила не более 0,05 мм, радиус скругления во впадине не более 0,3 мм, $Ra = 0,32 \dots 0,63$ мкм.

Шлифование наружной цилиндрической поверхности и торца втулок из стали 95X18Ш после азотирования осуществлялась на станке Livnica Kikinda высокопористыми кругами с характеристиками 92A 6 CM1 10 K и 92A 12 CM2 10 K. Втулки

обрабатывались на следующих режимах: $v_{кр} = 30$ м/с; $v_d = 9 \dots 15$ м/мин; $t = 1 \dots 3$ мкм/об.дет.; $S_{пр} = 0,5 \dots 2,5$ м/мин. Для охлаждения зоны резания применялся 3%-ный раствор на основе "Москвинола" с расходом 5...6 л/мин. Правка шлифовального круга осуществлялась алмазным карандашом.

В ходе контроля качества втулок было установлено, что для обработанных цилиндрических поверхностей $Ra = 0,32 \dots 0,63$ мкм, а для торцов $Ra = 0,63 \dots 1,25$ мкм.

Результаты испытаний (табл. 6.2) показали, что применение высокопористого абразивного инструмента на операциях шлифования азотированных деталей позволило сократить, по сравнению с ранее применяемыми кругами с нормальной структурой, время обработки за счет уменьшения числа правок. Стойкость круга по количеству деталей, обработанных между правками, возросла в 1,5...2 раза. Сокращение числа правок, в свою очередь, привело к снижению расхода шлифовальных кругов ориентировочно до 5...6 раз.

Использование технологии прецизионного шлифования с применением высокопористых абразивных кругов позволило сократить количество бракованных деталей по сколам кромок с 10 до 2 % от общего количества деталей в партии. Процесс шлифования протекает в благоприятном термодинамическом режиме, что исключает появление прижогов и шлифовочных микротрещин. За счет увеличения скорости вращения детали возможно повышение производительности процесса при одновременном уменьшении вероятности появления прижогов на обработанной поверхности.

Для прецизионного шлифования азотированных деталей рекомендованы высокопористые абразивные круги на керамической связке из электрокорунда хромтитанистого, зернистостью 6...12, твердостью CM1...CM2 со структурой 10.

6.2. Результаты прецизионного шлифования высокопористыми кругами

Операция	Материал	Стойкость круга, детали		Глубина правки круга, мм		Количество дета- лей, обрабатывае- мых одним кругом			Ra, мкм	
Тип шлифовального круга		1	2	1	2	1	2	1	2	
Шлифование кромок	45X14N14B2M	16	10	До 0,1	До 0,3	4000	830	0,32	1,25	
Шлифование кромок		10	6	До 0,1	До 0,3	2500	500	0,32	1,25	
Шлифование наружного диа- метра		24	12	До 0,1	До 0,3	6000	1000	0,16	0,63	
Шлифование кромок		15	8	До 0,1	До 0,3	3750	665	0,32	1,25	
Тип шлифовального круга		3	4	3	4	3	4	3	4	
Шлифование наружного диа- метра и торца	95X18	1	0,5	До 0,1	До 0,3	250	42	0,32	1,25	
Шлифование наружного диа- метра и торца	95X18	1	0,5	До 0,1	До 0,3	250	42	0,32	1,25	
Шлифование наружного диа- метра	95X18	1	0,5	До 0,1	До 0,3	250	42	0,16	1,25	
Шлифование наружного диа- метра	95X18	1	0,5	До 0,1	До 0,3	250	42	0,16	1,25	
Шлифование наружного диа- метра	45X14N14B2M	2	0,5	До 0,1	До 0,3	500	42	0,32	1,25	
Шлифование наружного диа- метра	95X18	1	0,5	До 0,1	До 0,3	250	42	0,32	1,25	

Примечание. В таблице приняты следующие обозначения типов кругов: 1. 400×20×127 92A 6 CM2 10 K – высокопористый круг; 2. 400×20×127 25A 16П CM1 6 K5; 3. 400×40×127 92A 6 CM2 10 K – высокопористый круг; 4. 400×40×127 25A 25П CM1 6 K5.

6.2. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ШЛИФОВАНИЯ ПОДШИПНИКОВ

В трудоемкости производства подшипников операции шлифования имеют наибольший удельный вес – до 85... 90 % от общего времени их изготовления. При этом стремление повысить эффективность шлифования подшипников путем усовершенствования схем обработки, форсирования режимов резания и автоматизации процессов всегда ограничивалось эксплуатационными возможностями применяемого инструмента.

Лабораторные исследования. Для исследования эксплуатационных возможностей шлифовальных кругов с высокими номерами структур были проведены эксперименты по врезному наружному шлифованию закаленной стали марки ШХ15.

Для этого были изготовлены круги прямого профиля из электрокорунда белого зернистостью 16, твердостью СМ1 на керамической связке размерами 250×25×76. Абразивный инструмент указанной характеристики имел 3 варианта номера структуры: 6, 12, 16.

Шлифование с охлаждением осуществлялось при постоянной скорости круга, равной 45 м/с, со скоростью врезания 0,26 и 0,64 мм/мин.

Результаты измерения тангенциальной P_z и нормальной P_y составляющих силы резания, удельной производительности шлифования q и шероховатости обработанной поверхности по параметру Ra представлены на рис. 6.3.

Для принятой схемы врезного шлифования, характерной для обработки подшипников, сила резания уменьшается при увеличении номера структуры. Для структур 12 и 16 она оказалась практически одинаковой – 56,5 Н, что в 1,4 раз меньше, чем при обработке кругом структуры 6. При этом тангенциальная составляющая P_z последовательно уменьшается с увеличением номера структуры, а нормальная составляющая P_y , так же, как

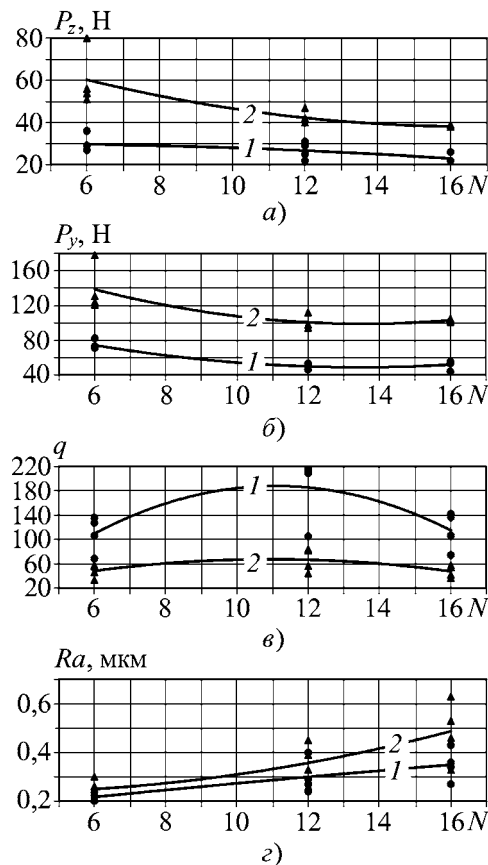


Рис. 6.3. Влияние номера структуры шлифовального круга на тангенциальную (а), нормальную (б) составляющие силы резания, удельную производительность (в) и шероховатость обработанной поверхности (г) при шлифовании с подачей на врезание 0,26 мм/мин (1) и 0,64 мм/мин (2)

и суммарная сила резания, стабилизируется, начиная с структуры 12 круга.

С точки зрения эффективности шлифования в целом, предпочтительней вести обработку кругами структуры 12, которые обеспечили удельную производительность в 1,4...1,7 раз больше, чем при шлифовании кругом нормальной структуры.

Как и ожидалось, шероховатость обработанной поверхности возрастает с увеличением номера структуры круга. Так, безусловно, должно и быть при одинако-

вой его твердости, так как расстояния между режущими зернами возрастают, а их количество в зоне шлифования уменьшается. При максимальной скорости резания, применяемой для чистовой обработки, шероховатость при изменении номера структуры от 6 до 16 сохраняется в пределах одного класса.

В результате сопоставления всех описанных показателей, а также с учетом других скоростей круга и обработки без охлаждения указанными кругами трех структур, можно сделать вывод, что для данных условий врезного шлифования закаленной стали ШХ15 оптимальной является структура 12.

Заводские испытания. В производстве подшипников предъявляются повышенные комплексные требования к износостойкости и размерной стойкости абразивного инструмента в сочетании с требованиями гарантии безприжоговой обработки поверхностей с шероховатостью до $Ra = 0,32$ мкм и ниже и с точностью (некруглость, конусность) до 1 мкм и менее.

В производственных условиях испытания проводились с целью сравнения эксплуатационных показателей высокопористых кругов с показателями стандартного круга нормальной структуры с характеристикой 24А 16П СМ1 6 К5 Б. Все испытанные высокопористые круги были одного типоразмера 1 80×40×20 и одной 12-й структуры с характеристиками: 24А 16 СМ1 12 К5, 24А 16 С1 12 К5, 91А 16 СМ1 12 К43 и 24А 16 М3 12 К43, которые предварительно были испытаны на разрывную прочность при скорости 110 м/с на испытательном стенде.

Испытания проводились на внутришлифовальном автомате мод. МЕ 385. В качестве образцов использовались кольца подшипника типа 2007122 М/02, предварительно шлифованные, материал – сталь ШХ15 (60...65 HRC).

Автоматический цикл шлифования совмещает черновую и чистовую обработку и выполняется в следующей последовательности:

1. Черновая обработка.
2. Получистовая обработка.
3. Правка круга.
4. Чистовая обработка.
5. Выхаживание.

Цикл задается прибором активного контроля БВ 6119, команды прибора настроены на распределение припуска по этапам обработки следующим образом:

1. Черновая обработка – 0,4...0,15 мм.
2. Получистовая обработка – 0,15...0,07 мм.
3. Чистовая обработка – 0,07...0,03 мм.
5. Выхаживание – 0,03...0 мм.

Управление циклом осуществлялось прибором адаптивного управления мощностью привода подачи КУ-64, который имеет следующие уровни срабатывания команд:

1. Контроль врезания на "подскоке".
2. Конец первой форсированной подачи.
3. Уровень черновой подачи.
4. Аварийный.
5. Конец выхаживания.
6. Конец второй форсированной подачи.

Режимы шлифования:

- скорость круга $v_{кр} = 75$ м/с;
- припуск, снимаемый при шлифовании, 0,4 мм на диаметр.

Значения скоростей подач, установленные в программе:

- первая черновая – 0,6 мм/мин;
- вторая черновая – 0,25 мм/мин;
- первая форсированная подача – 3 мм/мин;
- вторая форсированная подача – 0,6 мм/мин,
- чистовая подача – 0,15 мм/мин;
- применяемая СОТС – 6%-ный раствор НГЛ.

Приведенное описание технологической операции и режимов шлифования подшипников в автоматическом цикле характерно для всех отечественных подшипниковых заводов. Поэтому специфика формирования операций шлифования

подшипников и их описание сохранено при последующем изложении результатов производственных испытаний.

Эксплуатационные возможности кругов определялись по времени черновой обработки, шероховатости шлифованной поверхности и наличию на ней прижогов. Время черновой обработки определялось по кривой записи цикла самописцем НЗ27-1. Для выявления прижогов производилось травление образцов 3%-ным раствором азотной кислоты. Результаты испытаний представлены в табл. 6.3.

Наилучшие результаты показали круги с характеристиками 24А 16П СМ1 12 К5 и 91А 16П СМ1 12 К43, которые обеспечивают: рабочую скорость шлифования 75 м/с, шероховатость обработанной поверхности в пределах технических требований к детали, повышение производительности черновой обработки в 1,3...2,1 раза за счет возможности работы без прижогов на более жестких режимах, чем стандартный круг нормальной структуры.

В производственных условиях другого завода высокопористый круг 1 12×4×3 с характеристикой 24А 5 СМ2 12 К5 на станке "Сенталайн В-2" с применением охлаждения "Транскулт-70" на операции окончательного шлифования дорожек качения в автоматическом режиме обеспечил шероховатость обработанной поверхности $Ra = 0,32$ мкм, некруглость в пределах 0,2 мкм при отсутствии прижогов (скорость круга 56,5 м/с, частота вращения детали 300 мин⁻¹ и подача 0,06 мм/мин).

Были проведены также заводские испытания опытных партий высокопористых абразивных кругов различных рецептур. Всего испытано около 3000 кругов, изготовленных по 41 рецептурам, с диапазоном изменения характеристик инструмента: по зерну 24А, 25А, 91А, 95А; по твердости от М3 до С1 со структурами 8, 10...14.

Испытания проводились на операциях высокоскоростного шлифования ($v_{кр} = 80$ м/с) посадочных отверстий внутренних колец и дорожек качения наружных колец радиальных подшипников из закаленной подшипниковой стали ШХ15.

Охлаждение зоны резания содовонитритным раствором "ВНИПП-76".

Следует отметить, что производственные испытания проводились при действии ряда неблагоприятных факторов: увеличенный местный припуск на шлифование (до 0,9 мм на диаметр), применение неэффективной СОТС при достаточно интенсивных режимах обработки.

Получены следующие результаты испытаний по различным операциям обработки подшипников.

Шлифование отверстий. Проведены испытания высокопористых кругов типоразмера 1 50×25×16 характеристики 91А 16П СМ2 12 К5. Шлифование производилось на внутришлифовальных автоматах мод. СИБ-3Б и СИБ-3/1Б САС на операциях предварительного и окончательного шлифования посадочных отверстий колец.

Режим предварительной обработки на станке модели СИБ-3Б: скорость резания – 80 м/с; общий припуск – 0,53 мм; путь чистовой подачи – 0,1 мм; черновая подача – 1 мм/мин; чистовая подача – 0,75 мм/мин; компенсация на износ круга – 0,025 мм; правка круга в начале цикла; оперативное время – 30 с.

Режим окончательной обработки на станке модели СИБ 3/1Б САС: скорость резания – 80 м/с; общий припуск – 0,15 мм; путь чистовой подачи – 0,025 мм; путь тонкой подачи – 0,015 мм; ускоренная подача – 2 мм/мин; черновая подача – 1,2 мм/мин; чистовая подача – 0,5 мм/мин; компенсация на износ круга – 0,025 мм; правка круга в начале цикла; оперативное время – 21 с.

По результатам испытаний на технологических режимах завода опытные круги указанной характеристики стабильно обеспечивали размерную и геометричес-

6.3. Результаты испытаний высокопористых шлифовальных кругов

Характеристика круга	Цикл 1			Наличие прижогов	Цикл 2		
	Время обработки, с	Ra, мкм	Время обработки, с		Ra, мкм	Наличие прижогов	
24А 16П СМ1 12 К5	39	0,26	Нет	33	0,28	Нет	
24А 16П С1 12 К5	39	0,24		32	0,26		
24А 16П СМ1 12 К43	41	0,36		29	0,32		
24А 16П М3 12 К43	34	0,21		–	–		
24А 16П СМ1 6 К5Б	42	0,29		32	0,30		Есть
Цикл 3				Цикл 4			
Время обработки, с	Ra, мкм	Наличие прижогов	Время обработки, с	Ra, мкм	Наличие прижогов		
25	0,28	Нет	22	0,32	Есть		
22	0,26	Есть	21	0,38			
20	0,30	Нет	16	0,32			
–	–	–	–	–	–		
22	0,30	Есть	18	0,40	Есть		

Примечание. Круг 24А 16П М3 12 К43 на циклах № 2, 3, 4 осыпается катастрофически.

кую точность, качество обработанной поверхности. Значение параметра шероховатости Ra изменялось от 0,25 мкм до 0,43 мкм в начале работы и на изношенном диаметре круга соответственно. За счет высокой пористости опытные круги значительно эффективнее базовых (25А 16П СМ1 6 К5 Б) в части обеспечения бесприжогового шлифования.

Высокопористые круги характеристики 91А 16П СМ2 12 К5 после испытания были внедрены в основное производство.

Высокопористые круги характеристик: 25А 16П СМ1 14 К5; 95А 16П М3 11 К5; 95А 16П М3 13 К5; 24А 16П СМ1 13 К5; 24А 16П СМ2 13 К5 типоразмеров 1 50×25×16, 1 40×25×16 были испытаны на операции шлифования посадочных отверстий колец. Обработка производилась на внутришлифовальных автоматах мод. СИБ-3Б и СИБ-3/1Б САС в одну операцию.

Принятый режим обработки: скорость резания – 80 м/с; общий припуск – 0,62 мм; путь чистовой подачи – 0,06 мм; черновая подача – 1,2...2 мм/мин; чистовая подача – 0,6 мм/мин; компенсация на износ круга – 0,03 мм; правка круга в середине цикла; оперативное время – 25...29 с.

Высокопористые круги всех испытанных характеристик обеспечили размерную и геометрическую точность, качество обработанной поверхности в соответствии с требованиями чертежа, и во всех случаях – бесприжоговое шлифование.

Шлифование дорожек качения. Высокопористые круги типоразмеров 1 63×12×20, 1 80×15×20, 1 80×18×20 испытывались на операциях предварительного и окончательного шлифования на внутришлифовальных автоматах мод. ЛЗ-193А, СИБ-3Е, СИБ-3/1Е САС. По результатам лабораторных и производственных испытаний лучшие эксплуатационные показатели получены с применением высокопористых кругов следующих

характеристик: 24А 16П СМ1 13 К5 и 24А 16П СМ2 13 К5.

Режим предварительной обработки: скорость резания – 80 м/с; общий припуск – 0,6...0,7 мм; путь чистовой подачи – 0,12 мм; черновая подача – 3 мм/мин; чистовая подача – 0,6 мм/мин; компенсация на износ круга – 0,03 мм; правка круга в начале цикла; оперативное время – 25 с.

Режим получистовой обработки: скорость резания – 80 м/с; общий припуск – 0,15...0,2 мм; путь чистовой подачи – 0,06 мм; путь тонкой подачи – 0,01 мм; черновая подача – 3 мм/мин; чистовая подача – 0,5 мм/мин; тонкая подача – 0,25 мм/мин; компенсация на износ круга – 0,025 мм; оперативное время – 22 с.

Режим чистовой обработки: скорость резания – 80 м/с; общий припуск – 0,15...0,2 мм; путь чистовой подачи – 0,03 мм; путь тонкой подачи – 0,01 мм; черновая подача – 2,3 мм/мин; чистовая подача – 0,5 мм/мин; тонкая подача – 0,15 мм/мин; компенсация на износ круга – 0,05 мм; оперативное время – 33 с.

По результатам испытаний на технологических режимах завода высокопористые круги обеспечили заданную размерную точность и качество обработанной поверхности: шероховатость $Ra = 0,45...0,62$ мкм; отклонение от круглости $W = 0,55...2,5$ мкм; волнистость $W_z = 0,85...1,3$ мкм. Методом холодного травления прижоги на обработанных кольцах не установлены.

Следует отметить, что применение прогрессивной СОТС "Ризол" позволило полностью исключить прижоги на опытных кругах всех рецептов, в том числе показавших отрицательные результаты на обычной СОТС, а также повысить качество обрабатываемой поверхности (среднее значение шероховатости снизилось на 15...20 %).

На операции окончательного шлифования дорожек качения были проведены сравнительные испытания высокопористых кругов типоразмера 1 63×12×20 с корундовыми микросферами марки "Т" со

6.4. Результаты испытаний высокопористых кругов с корундовыми и силикатными микросферами

Характеристика круга	Марка микросфер; плотность, г/см ³	Результаты испытаний		
		Ra, мкм	W, мкм	Wz, мкм
24A 16 CM1 13 K5	T; 0,59	0,45...0,79	1,1...2,1	0,8...2,1
24A 16 CM1 13 K5	T; 0,70	0,5...0,62	0,93...1,7	1,0...1,3
24A 16 CM2 13 K5	Filite 52/7S; 0,7	0,45...0,61	0,55...2,5	0,85...1,2
24A 16 CM2 13 K5	Filite PG; 0,7	0,52...0,68	1,1...2,1	1,2...1,3
Заводской круг 24A 16 CM1 6 K5 S с пропиткой серой	—	0,35...0,64	1,4...2,2	1,3...1,8

средними размерами 103 мкм (плотность 0,7 г/см³) и 171 мкм (плотность 0,59 г/см³) и с силикатными микросферами марок Filite PG и Filite 52/7S.

Круги были изготовлены с одинаковым объемным содержанием керамической связки K5 – 10 %, но твердость у кругов с силикатными микросферами оказалась на одну степень выше, чем у кругов с корундовыми микросферами. Результаты испытаний кругов по качеству обработки приведены в табл. 6.4.

В отличие от заводского варианта обработки с серийно выпускаемым шлифовальным кругом нормальной структуры, когда на обработанной поверхности появлялись прижоги, высокопористые круги всех составов обеспечили бездефектную обработку и более высокую точность формы детали.

Целью испытаний на другом подшипниковом заводе являлось определение возможности высокопроизводительного шлифования новыми высокопористыми кругами по сравнению с серийно изготавливаемыми шлифовальными кругами.

В результате заводских испытаний кругов различных размеров и характеристик и на различных операциях шлифова-

ния подшипников установлено следующее.

1. Круг типоразмера 1 50×25×16 с характеристикой 25A 16 CM1 10 K5 был испытан на операции предварительного шлифования отверстия внутренних колец на станке мод. 3485. При этом режим обработки составил: скорость круга – 62 м/с; скорость изделия – 103 м/мин; подача черновая – 1,9 мм/мин; подача чистовая – 0,35 мм/мин; припуск на обработку – 0,55 мм; периодичность правки круга – на каждом кольце; компенсация на износ – 0,025 мм; длительность цикла обработки – 0,5 мин.

Применяемый круг по технологии аналогичного типоразмера 1 50×25×16 имел характеристику 25A 16П CM2 7K. При испытаниях высокопористого круга подачи были завышены по отношению к технологическим на 38 %. Геометрические параметры поверхности, обработанной новым инструментом, были стабильны и соответствовали техническим условиям. Холодным травлением прижогов на обработанной поверхности не выявлено.

2. Круг типоразмера 1 45×20×16 с характеристикой 24A 16 CM1 12 K5 был испытан на операции предварительного

шлифования дорожки качения наружных колец М67010 на станке мод. МС 6М. При этом режим обработки составил: скорость круга – 56 м/с; скорость изделия – 82 м/мин; подача черновая – 0,85 мм/мин; подача чистовая – 0,25 мм/мин; припуск на обработку – 0,56 мм; периодичность правки круга – на каждом кольце; компенсация на износ – 0,020 мм; длительность цикла обработки – 0,55 мин.

Применяемый круг по технологии аналогичного типоразмера 1 45×16×10 имел характеристику 25А 16П СМ2 7 К. Рабочие подачи при шлифовании высокопористым кругом были завышены по сравнению с технологическими на 35%.

Контролем установлено, что геометрические параметры обработанной поверхности деталей были стабильны и соответствовали требованиям чертежа. Шероховатость обработанной поверхности составила $Ra = 0,35$ мкм. Холодным травлением на обработанной поверхности прижогов не выявлено.

3. Круг типоразмера 1 55×20×16 с характеристикой 24А 16 СМ1 13 К5 был испытан на операции предварительного шлифования дорожки качения наружных колец на станке модели 3485. При этом режим обработки составил: скорость круга – 52 м/с; скорость изделия – 101 м/мин; подача черновая – 1,2 мм/мин; подача чистовая – 0,3 мм/мин; припуск на обработку – 0,574 мм; периодичность правки круга – на каждом кольце; величина компенсации – 0,025 мм; длительность цикла обработки – 0,67 мин.

Применяемый на данной операции круг по технологии типоразмера 1 55×20×16 имел характеристику 25А 16П СМ1 7 К. При испытаниях рабочие подачи были завышены по сравнению с технологическими на 32 %. После шлифования высокопористым кругом претензий к точности и качеству обработки не было.

4. Высокопористый круг типоразмера 1 55×20×16 с характеристикой 25А 12 СМ1 10 К5 был испытан на операции чистового шлифования дорожки ка-

чения наружных колец подшипника на станке мод. 3485. При этом режим обработки составил: скорость круга – 52 м/с; скорость изделия – 101 м/мин; подача черновая – 0,7 мм/мин; подача чистовая – 0,25 мм/мин; припуск на обработку – 0,12 мм; периодичность правки круга – на каждом кольце; компенсация на износ круга – 0,020 мм; длительность цикла обработки – 0,55 мин.

Применяемый круг по технологии нормальной структуры типоразмера 1 55×20×16 имел характеристику 25А 16П СМ2 7 К. Рабочие подачи при испытаниях были повышены по сравнению с технологическими на 43 %.

Точность и качество обработки соответствовали требованиям чертежа.

5. Круг типоразмера 1 50×20×16 с характеристикой 25А 12 СМ1 12 К5 был испытан на операции чистового шлифования дорожки качения наружных колец на станке модели 3485. При этом режим обработки составил: скорость круга – 52 м/с; скорость изделия – 101 м/мин; подача черновая – 0,6 мм/мин; подача чистовая – 0,25 мм/мин; припуск на обработку – 0,12 мм; периодичность правки круга – на каждом кольце; величина компенсации – 0,020 мм; длительность цикла обработки – 0,6 мин.

По технологии на этой операции применяется круг типоразмера 1 55×20×16 с характеристикой 25А 16П СМ2 7 К. Рабочие подачи были завышены по отношению к технологическим на 38 %. Несмотря на это требования по точности и качеству обработки были выполнены.

Были также проведены производственные испытания высокопористых кругов типоразмеров 1 50×11...25×10 с абразивным зерном 25А и 95А с зернистостью 16, 20 и 32, твердостью М2, М3 и СМ1 и со структурами 10 и 12 на керамической связке К5. Предварительно они были протестированы на стенде СИП-40 на механическую прочность при частоте вращения 80 000 мин⁻¹ или 209,3 м/с. Из 25 испытанных кругов ни один не разорвался,

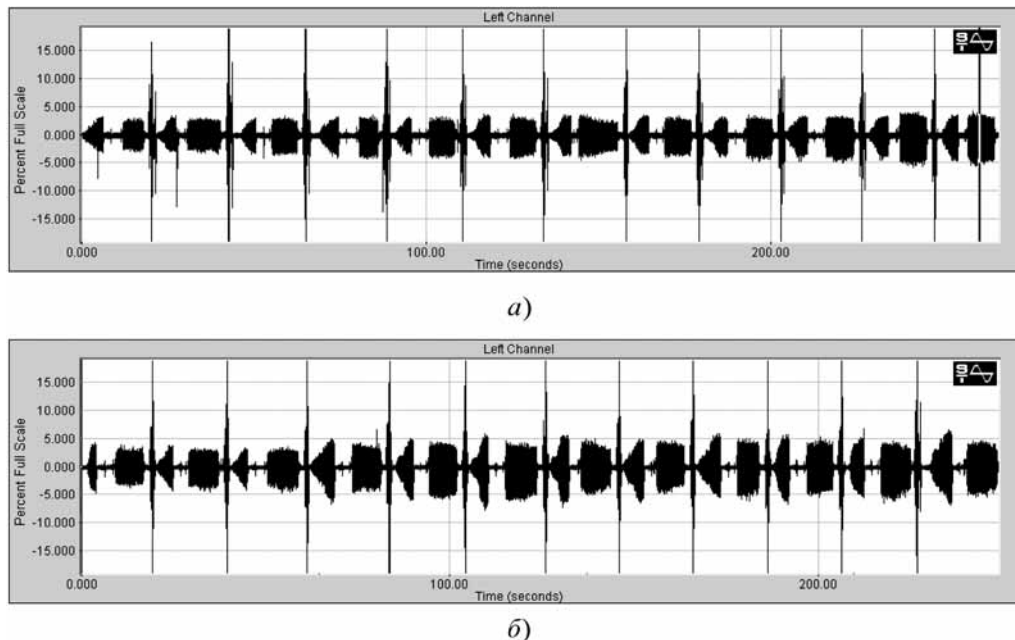


Рис. 6.4. Увеличение уровня вибраций за период стойкости круга:

a – стандартный круг; *б* – высокопористый круг

что дает возможность назначить им рабочую скорость резания до 140 м/с.

При их испытаниях получены следующие результаты.

При обработке посадочного отверстия подшипника кругами типоразмера 1 50×25×10 с характеристиками 25A 16 CM1 12 K5 и 95A 16 CM1 12 K5 на станке мод. СИВ 3/1 САС на режиме шлифования: скорость круга – 78 м/с, скорость изделия – 118 м/мин, подача – 0,8 мм/мин; достигнутые погрешность формы и волнистость были в допустимых пределах, шероховатость обработанной поверхности $Ra = 0,32$ мкм. Прижоги отсутствовали, а стойкость кругов составила 250...300 обработанных колец.

Обработка желоба наружных колец подшипника на станке мод. СИВ 3/1 САС кругами типоразмера 1 50×11×10 с характеристиками 25A 8 M3 12 K5 и 25A 16 CM2 12 K5 на режиме шлифования: скорость круга – 78 м/с, скорость изделия –

120...150 м/мин, черновая подача – 2,3 мм/мин, чистовая подача – 0,4 мм/мин, подача выхаживания – 0,01 мм/мин обеспечила следующие показатели:

– для характеристики круга 25A 8 M3 12 K5: отклонение от круглости – 0,92...1,37 мкм (при допустимой 2,6 мкм); волнистость – 0,8 мкм; шероховатость – $Ra = 0,45...0,5$ мкм и стойкость круга – 196 шлифованных колец;

– для характеристики круга 25A 16 CM1 12 K5: отклонение от круглости – 0,61...0,84 мкм; шероховатость – $Ra = 0,55...0,6$ мкм и стойкость круга – 180 обработанных колец.

На этом же заводе в производственных условиях были проведены другие по своему характеру испытания высокопористого абразивного инструмента.

Круги типоразмера 1 55×9×10 с характеристикой 25A 12П M3...CM1 12 K были установлены на внутришлифовальном станке мод. SIW4E для операции оконча-

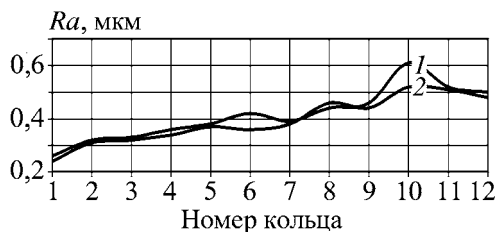


Рис. 6.5. Изменение шероховатости поверхности дорожек качения колец за период стойкости круга нормальной структуры:

1 — база; 2 — противобаза

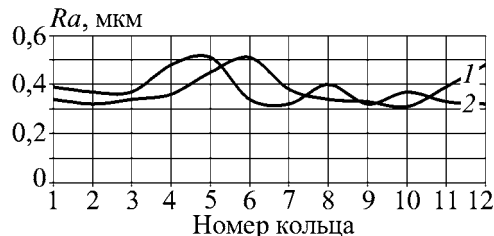


Рис. 6.6. Изменение шероховатости поверхности дорожек качения колец за период стойкости высокопористого круга:

1 — база; 2 — противобаза

тельного одновременного шлифования двух дорожек качения наружного кольца радиально-упорного подшипника. Материал: сталь ШХ15, 62...64 HRC. Режимы работы станка: частота вращения круга — 18000 об/мин (окружная скорость круга — 51,8 м/с), частота вращения детали — 60 об/мин, общий припуск на операцию составляет 0,14 мм.

С целью изучения стойкости круга была исключена правка круга в цикле. Стойкость круга оценивалась путем наблюдения за увеличением погрешности формы в осевом и радиальном сечениях детали, шероховатостью, увеличением неоднородности поверхностного слоя, выявляемым вихретоковым методом, повышением уровня вибраций по мере возрастания величины удаленного припуска (рис. 6.4).

Размеры годных деталей после обработки должны составлять: $\varnothing 60,575 \pm 0,01$; величина и профиль радиуса $R5,25 \pm 0,08$; отклонение от круглости 2,5 мкм; прижоги не допускаются. Шероховатость в пределах по $Ra = 0,32$ мкм. Измерения геометрии осуществляли на приборах "Толиронд-30" и "Толиронд-73" с проведением гармонического анализа. Точность формы дорожки качения измерялась на приборе MPTR-20C. Качество поверхностного слоя оценивалось на установке вихретокового контроля ПВК-К2, позволяющей

выявлять локальные и периодические изменения в структуре и напряженности поверхностного слоя.

Амплитуда колебаний за период стойкости круга увеличилась. После двенадцатого кольца шлифование было прекращено, так как возник брак по положению дорожек качения относительно базового торца. Это связано с осыпанием круга. Данный факт был отмечен для серийных и высокопористых кругов.

Ниже приведены графики изменения шероховатости для высокопористых кругов (рис. 6.5) и для кругов, применяемых в настоящее время на заводе (рис. 6.6).

Графики приведены для двух дорожек качения (базовой и противобазовой). Базовой является сторона, обращенная к магнитному кольцу шлифовального станка.

После измерения геометрических параметров было проведено исследование микроструктуры поверхностного слоя дорожек качения на приборе вихретокового контроля ПВК-К2. Результаты исследования были сведены в таблицы. На рис. 6.7 и 6.8 изображены наиболее показательные вихретоковые образы дорожек качения колец, обработанных кругами нормальной структуры.

Результаты вихретокового контроля коррелируются с измерениями геометрических параметров поверхностей дорожек

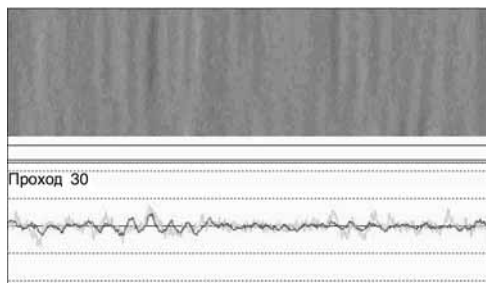


Рис. 6.7. Вихретоковый образ дорожки качения первого кольца после шлифования кругом нормальной структуры

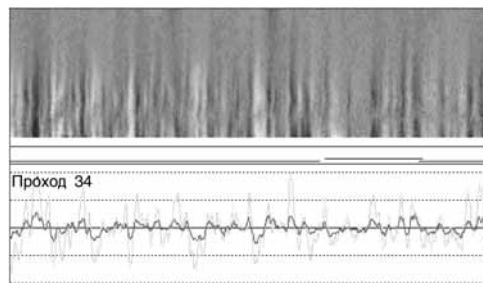


Рис. 6.8. Вихретоковый образ дорожки качения десятого кольца после шлифования кругом нормальной структуры

качения. Так, например, при измерении геометрии именно на кольцах 1 и 10 были отмечены повышенная шероховатость и некруглость.

На рис. 6.9 и 6.10 показаны результаты вихретокового контроля колец, обработанных высокопористыми кругами. Микроструктура дорожек качения имеет стабильный характер, прижоги отсутствуют у всей партии из 12 обработанных деталей.

По результатам сравнительных испытаний было установлено, что высокопористые шлифовальные круги с характеристикой 25А 12П МЗ...СМ1 12 К во всех случаях скоростного шлифования обеспечивают бесприжоговую обработку с вы-

полнением всех требований по точности формы и размеров обработанных поверхностей.

Обобщая результаты заводских испытаний и внедрения высокопористых кругов, можно сделать следующие выводы. Разработанные для условий подшипникового производства характеристики высокопористых кругов имеют следующие преимущества:

- высокая механическая прочность, что позволяет применять круги на операциях высокоскоростного шлифования;
- повышенная пористость инструмента позволяет значительно снизить вероятность появления прижогов при увеличении производительности обработки;

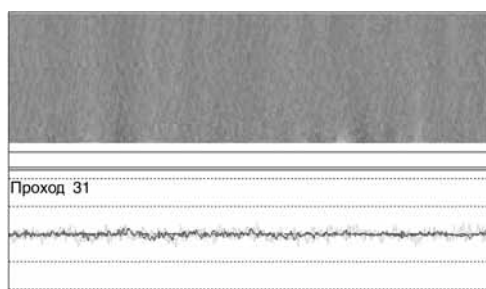


Рис. 6.9. Вихретоковый образ дорожки качения первого кольца после шлифования высокопористым кругом

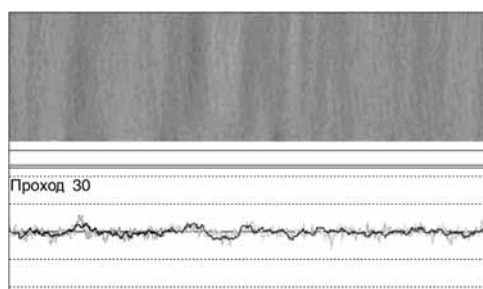


Рис. 6.10. Вихретоковый образ дорожки качения десятого кольца после шлифования высокопористым кругом

- эксплуатационные характеристики высокопористых кругов позволяют применять их без дополнительной пропитки серой;
- при эксплуатации высокопористых кругов снижается износ дорогостоящего алмазного правящего инструмента;
- вследствие снижения неуравновешенности масс высокопористых кругов увеличивается срок службы опор шлифовальных электрошпинделей.

6.3. ШЛИФОВАНИЕ СЛОЖНО-ФАСОННОГО ИНСТРУМЕНТА

Шлифование сложнофасонного инструмента (круглые и плоские протяжки, фрезы, долбяки, накатники и т.д.) часто сопровождается появлением дефектов поверхностного слоя в виде прижогов, микротрещин и пр. Одним из направлений снижения термодинамического воздействия на зону резания является, как уже подчеркивалось, применение высокопористых шлифовальных кругов.

Были проведены производственные испытания высокопористых абразивных кругов при шлифовании сложнофасонных протяжек из различных закаленных быстрорежущих сталей. Цель производственных испытаний – определение возможности использования высокопористых абразивных кругов на операциях профильного шлифования протяжек, а также выбор оптимальных характеристик инструмента и режимов шлифования, обеспечивающих требования по качеству, точности и производительности обработки. Для испытаний и внедрения были разработаны специальные рецептурные составы шлифовальных кругов с широким диапазоном технологических свойств на основе различных порообразующих наполнителей.

Высокопористые круги различных типоразмеров были изготовлены в диапазоне диаметров от 80 до 400 мм и высоты от 14 до 40 мм. Всего 186 кругов семи различных характеристик из абразивных материалов: электрокорунд белый марки

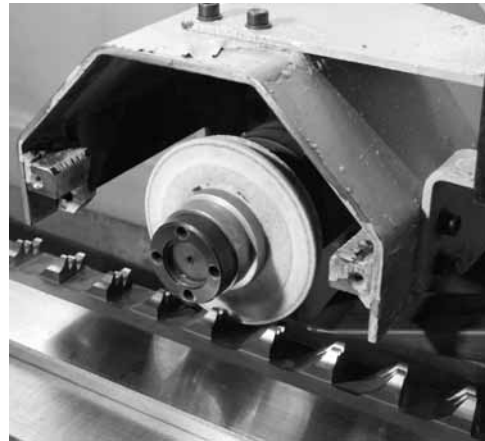


Рис. 6.11. Профильное шлифование протяжки высокопористым кругом

25А, электрокорунд хромтитанистый марки 92А и поликристаллическая модификация электрокорунда SG с зернистостью 10, 12 и 16, твердостью BM1...CM2, номерами структур 10, 12, 14, 16 на керамической связке.

Испытания проводились на станке мод. "Profimat 412" фирмы Blohm при шлифовании многосекционных фасонных плоских протяжек из быстрорежущих сталей P18 (63...65 HRC), P12Φ2K5M3-МП (66...68 HRC), P9M4K8-МП (63...66 HRC) и P6M5K5-МП (63...66 HRC). Обработка включала в себя предварительное и окончательное профилирование фасонных поверхностей протяжек шлифованием после закалки и отпуска (рис. 6.11).

Режимы шлифования изменялись в следующем диапазоне:

- скорость круга 25...30 м/с;
- скорость подачи стола 30...12 000 мм/мин;
- глубина резания 0,005...1 мм/ход.

Циклическая правка шлифовальных кругов осуществлялась алмазными роликами PCD производства фирмы Dr. Kaiser Diamantwerkzeuge (Германия) по мере необходимости восстановления профиля рабочей поверхности с величиной съема от 0,005 до 0,27 мм. Зона шлифования охлаждалась водным раствором эмульсии

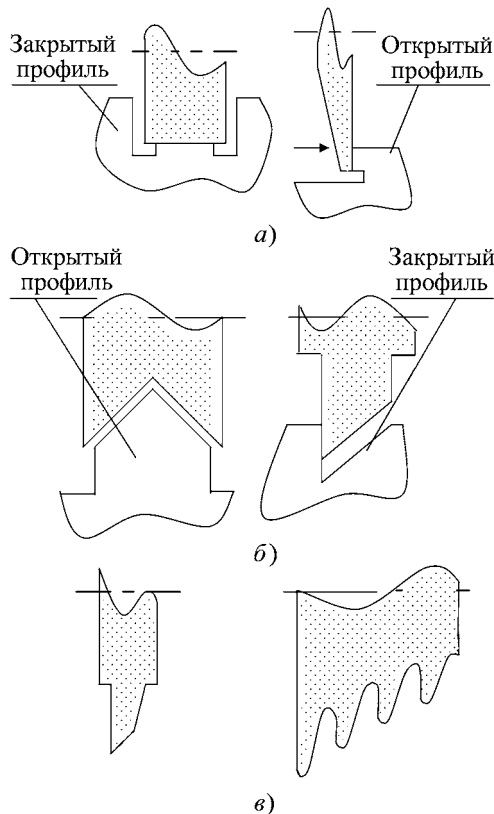


Рис. 6.12. Условная классификация обрабатываемых профилей плоских протяжек:

а – простой профиль; *б* – сложный профиль;
в – форма режущей части профильных абразивных кругов

"Укринол", подаваемой под давлением 0,65 МПа с расходом до 20 л/мин. Условия охлаждения зависели от формы обрабатываемого профиля протяжки, режимов и схемы шлифования.

В ходе испытаний оценивалась способность шлифовальных кругов к формированию сложных профилей повышенной точности при правке, их размерная стойкость и состояние рабочей поверхности круга в процессе обработки, фактическая производительность шлифования. Во всех случаях проверялось соответствие геометрических параметров профиля и шероховатости обработанной поверхности требованиям чертежа, фиксировалось на-

личие прижогов и микротрещин визуально и люминесцентным контролем.

Профильное шлифование фасонного инструмента имеет ряд специфических особенностей. Так, например, точное фасонное профилирование абразивных кругов возможно только специальным правящим инструментом, уникальным в своем роде. При этом абразивный инструмент должен легко правиться и не иметь склонность к засаливанию. Сложность обрабатываемого профиля оказывает решающее влияние на схему подачи охлаждающей жидкости и ее необходимый расход. На рис. 6.12 приведена условная классификация элементарных форм обрабатываемых профилей применительно к обработке протяжек. Открытые профили отличаются лучшей обрабатываемостью по сравнению с закрытыми из-за свободного доступа СОТС в зону обработки, что способствует более интенсивному отводу тепла и стружки из зоны резания.

Высокая геометрическая точность сложнофасонного инструмента, его габаритные размеры и форма накладывают ряд ограничений на выбор типоразмера и характеристики абразивного инструмента. Для крупногабаритных односекционных протяжек можно применять круги больших диаметров – до 400...450 мм, а для мелкогабаритных многосекционных протяжек только малых диаметров до – 80...100 мм.

Установлено, что высокопористые шлифовальные круги всех исследованных характеристик легко подвергаются правке с формированием сложных и точных профилей. Рабочая поверхность кругов после правки ровная, без сколов и заметных вырывов. Точность формируемого профиля на круге определяется механизмом правки и точностью геометрических параметров правящих роликов. Для профилирования высокопористых абразивных кругов могут быть рекомендованы алмазные правящие ролики с наружным диаметром $\varnothing 150$ мм и посадочным диаметром $\varnothing 52$ мм

с углом профиля $\alpha = 15...20^\circ$ и радиусами профиля при вершине $R = 0,16; 0,25$ и 1 мм. Ролики, предназначенные для чистового профилирования, должны иметь по периферии вставки кристаллов из натуральных алмазов, а ролики для предварительного профилирования должны обладать алмазоносным слоем.

На предварительном этапе испытаний была проверена возможность шлифования заготовки с глубиной обработки от $0,05$ до 1 мм за один проход с последующим профилированием ручья протяжки с глубиной от $0,005$ до $0,1$ мм при скорости стола 30 мм/мин. Использовались круги с характеристиками 92A 12 M3 16 K и 99SA80G12V (зерно SG, зернистость 16, твердость BM2, структура 12), которые хорошо себя зарекомендовали при глубинном шлифовании зубчатых колес.

Испытаниями установлено, что на форсированных режимах шлифования протяжек при принятых схемах крепления заготовки и подаче СОТС возможно появление прижогов и микротрещин на вертикальных обрабатываемых поверхностях.

В дальнейшем испытания высокопористых абразивных кругов при обработке протяжек производились только методом маятникового шлифования с глубиной резания $0,005...0,01$ мм/ход при скорости подачи стола $5...12$ м/мин.

Установлено, что высокопористые шлифовальные круги из электрокорунда белого 25A зернистостью $10...16$, твердостью M1...M3 и структурой $12...16$ во всех случаях обработки полного рабочего профиля протяжек из закаленных быстрорежущих сталей марок: P18, P6M5K5-МП, P9M4K8-МП, а также стали P12Ф2K5M3-МП обеспечили заданную точность формы и геометрических размеров (допуск на размер $0,04$ мм) и шероховатость обработанной поверхности ($Ra = 0,2...0,4$ мкм) в соответствии с требованиями чертежа. Применяемый высокопористый абразивный инструмент обладает достаточной размерной стойкостью и не склонен к за-

саливанию. Контролем качества поверхностного слоя прижогов и микротрещин на обработанных поверхностях протяжек не обнаружено.

Возможность шлифования полного рабочего профиля протяжки сокращает машинное и вспомогательное время, необходимое для его изготовления, до $3...5$ раз.

Для бесприжоговой профильной обработки протяжек с площадью поперечного сечения зуба у основания гребня $25...80$ мм² рекомендуются следующие характеристики высокопористых кругов, параметры режима шлифования и правки инструмента.

Обработка протяжек из быстрорежущих сталей P18 и P12Ф2K5M3-МП.

Предварительное шлифование: характеристика круга – 25A 10...12П M2 12 K5; скорость круга – 27 м/с; скорость подачи стола – $8...10$ м/мин; глубина обработки – $0,01...0,02$ мм/ход; скорость алмазного ролика – $20,4$ м/с; величина правки – $0,015...0,02$ мм; периодичность правки – после $10...20$ проходов при обработке с максимальной глубиной и после $30...40$ проходов при обработке с минимальной глубиной.

Чистовое шлифование: характеристика круга – 25A 10П M2 12 K5; скорость круга – 25 м/с; скорость подачи стола – $7...9$ м/мин; глубина обработки – $0,001...0,007$ мм/ход; скорость алмазного ролика – $20,4$ м/с; величина правки – $0,01...0,015$ мм; периодичность правки – после $40...50$ проходов при обработке с максимальной глубиной и после $60...70$ проходов при обработке с минимальной глубиной.

Обработка протяжек из быстрорежущих сталей P6M5K5-МП и P9M4K8-МП.

Предварительное шлифование: характеристика круга – 25A 10...12П M3 12 K5; скорость круга – 27 м/с; скорость подачи стола – $10...12$ м/мин; глубина обработки – $0,01...0,02$ мм/ход; скорость алмазного ролика – $20,4$ м/с; величина правки – $0,025...0,03$ мм; перио-

дичность правки – после 10... 20 проходов при обработке с максимальной глубиной и после 40...50 проходов при обработке с минимальной глубиной.

Чистовое шлифование: характеристика круга – 25А 10П МЗ 12 К5; скорость круга – 25 м/с; скорость подачи стола – 9...11 м/мин; глубина обработки – 0,001...0,01 мм/ход; скорость алмазного ролика – 20,4 м/с; величина правки – 0,01...0,015 мм; периодичность правки – после 50... 60 проходов при обработке с максимальной глубиной и после 80...100 проходов при обработке с минимальной глубиной.

Увеличение твердости применяемого абразивного инструмента от М2 до МЗ повышает его размерную стойкость на 20 %, но при изготовлении сложных профилей с тонким сечением гребней повышение твердости может вызвать появление незначительных прижогов на вертикальных участках профиля.

Для бесприжоговой обработки протяжек с площадью поперечного сечения зуба у основания гребня 5...25 мм² рекомендуются следующие характеристики высокопористых кругов, параметры режима шлифования и правки инструмента.

Обработка протяжек из быстрорежущих сталей Р18 и Р12Ф2К5МЗ-МП. Предварительное шлифование: характеристика круга – 25А 10...12П М1 12 К5; скорость круга – 27 м/с; скорость подачи стола – 7...9 м/мин; глубина обработки – 0,01...0,02 мм/ход; скорость алмазного ролика – 20,4 м/с; величина правки – 0,015...0,02 мм; периодичность правки – после 10...20 проходов при обработке с максимальной глубиной и после 30...40 проходов при обработке с минимальной глубиной.

Чистовое шлифование: характеристика круга – 25А 10П М1 12 К5; скорость круга – 25 м/с; скорость подачи стола – 6...8 м/мин; глубина обработки – 0,001...0,007 мм; скорость алмазного ролика – 20,4 м/с; величина правки –

0,01...0,015 мм; периодичность правки – после 40...50 проходов при обработке с максимальной глубиной и после 60...70 проходов при обработке с минимальной глубиной.

Обработка протяжек из быстрорежущих сталей Р6М5К5-МП и Р9М4К8-МП. Предварительное шлифование: характеристика круга – 25А 10...12П М2 12 К5; скорость круга – 27 м/с; скорость подачи стола – 9...10 м/мин; глубина обработки – 0,01...0,02 мм/ход; скорость алмазного ролика – 20,4 м/с; величина правки – 0,025...0,03 мм; периодичность правки – после 10...20 проходов при обработке с максимальной глубиной и после 40...50 проходов при обработке с минимальной глубиной.

Чистовое шлифование: характеристика круга – 25А 10П М2 12 К5; скорость круга – 25 м/с; скорость подачи стола – 7...9 м/мин; глубина обработки – 0,001...0,01 мм/ход; скорость алмазного ролика – 20,4 м/с; величина правки – 0,01...0,015 мм; периодичность правки – после 50...60 при обработке с максимальной глубиной и после 80...100 проходов при обработке с минимальной глубиной.

За величину правки в приведенных рекомендациях принята толщина абразивного слоя, которая удаляется со шлифовального круга при его правке.

Для случаев обработки ручья протяжки со сложным профилем, имеющим малые углы профилирования или вертикальные участки обрабатываемой поверхности, целесообразно применять высокопористые круги твердостью М1...М2, при этом необходимо уменьшить скорость стола на 15...20 %.

При шлифовании протяжек без подачи СОТС (водный раствор) зону резания необходимо охлаждать сжатым воздухом, а глубина обработки в этом случае не должна превышать 0,005 мм/ход.

Указанные рекомендации обеспечивают бездефектное шлифование (при качественной предшествующей термообработке) протяжек из закаленных быстро-

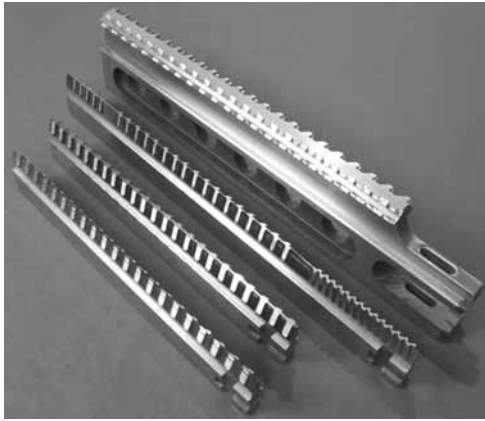


Рис. 6.13. Протяжки, обработанные высокопористыми кругами



Рис. 6.14. Профильное шлифование протяжки кругом из микрокристаллического корунда

режущих сталей указанных марок с параметрами шероховатости обработанных поверхностей $Ra = 0,16...0,32$ мкм.

Рекомендуемые условия обработки обеспечивают следующий коэффициент шлифования (отношение съема металла к износу инструмента) для быстрорежущих сталей марок:

- Р18 и Р12Ф2К5МЗ-МП – 4...6;
- Р6М5К5-МП и Р9М4К8-МП – 5...7.

С учетом предварительного профилирования и перепрофилирования в процессе правки расход шлифовальных кругов составляет 2...4 см³ абразива на 1 см³ удаленного металла. Некоторые обрабатываемые детали представлены на рис. 6.13.

В производственных условиях была проверена возможность профильного шлифования елочного профиля плоской протяжки шлифовальным кругом из микрокристаллического корунда структуры 10 с характеристикой 99SA 180 K 10 V (зернистость 8, твердость CM1, связка – керамическая) и с размерами 100×55×20.

Протяжка из быстрорежущей стали марки Р12МЗФ2К5-МП, закаленной до твердости 66...68 HRC, обрабатывалась по всему профилю полной высотой шли-

фовального круга. Рабочая поверхность инструмента была спрофилирована алмазным обкатывающим роликом типа NC20 фирмы Dr. Kaiser Diamantwerkzeuge по программе ЧПУ непосредственно на профилешлифовальном станке мод. 1250 CNC фирмы Brand (рис. 6.14).

Исследованный диапазон режимов шлифования составил: скорость круга 20...30 м/с, продольная подача стола 1,5...2,5 м/мин при постоянной глубине резания 0,01 мм.

Наилучшие результаты по параметрам шероховатости, а также точности обработки и размерной стойкости шлифовального круга были обеспечены на режиме шлифования: $v_{кр} = 25$ м/с, $S_{пр} = 2$ м/мин и $t = 0,01$ мм.

Таким образом, было установлено и подтверждено внедрением, что высокопористыми абразивными кругами можно шлифовать полные сложнофасонные профили протяжек из закаленных быстрорежущих сталей, обеспечивая эффективную бездефектную и точную обработку в соответствии с требованиями чертежа.

Производственные испытания на операциях плоского профильного шлифования фасонных протяжек из быстроре-

жущей стали Р6М5 (62...65 HRC) проведены высокопористым шлифовальным кругом типоразмера 1 400×40×127 с характеристикой 25А 16 М2 12 К. Основанием для проведения испытаний была необходимость оснащения нового станка для профильного глубинного шлифования высококачественным абразивным инструментом, обеспечивающим требуемое качество обработанной фасонной поверхности протяжек и производительность.

Обработка проводилась на плоскошлифовальном станке мод. CF-412 фирмы Maјевича на следующих режимах: скорость шлифовального круга – 30 м/с, глубина шлифования за проход – 0,15 мм, скорость продольной подачи стола – 3 м/мин.

Профилирование и правка шлифовального круга производилась накатыванием фасонным роликом из быстрорежущей стали Р6М5 на режимах: частота вращения ролика – 47 мин⁻¹, подача при правке (черновая) – 0,01 мм/об.круга, чистовая – 0,005 мм/об.круга.

В качестве СОТС использовался 1,5%-ный водный раствор эмульсии "Blasocut 4000" фирмы Blaser.

После обработки партии фасонных протяжек (44 шт.) было установлено, что высокопористый шлифовальный круг легко подвергается накатке профиля и дальнейшей правке, устойчиво держит профиль на протяжении всего цикла обработки. Размеры поверхностей обработанных деталей и шероховатость соответствовали техническим требованиям (допуск прямолинейности не более 0,004/500 мм, допуск плоскостности не более 0,006/500 мм, $Ra = 0,63$ мкм), прижогов не обнаружено.

Высокопористые шлифовальные круги были также испытаны при плоском шлифовании деталей из труднообрабатываемой закаленной штамповой стали Х12М1 (57...63 HRC). Ранее для обработки деталей из этих сталей, а также деталей с высокой твердостью после азотирования применялись шлифовальные круги из

электрокорунда марок 91А...95А. Попытка использования на этих операциях шлифовальных кругов отечественного производства нормальной структуры с характеристиками 25А 40 М1 7 К5 и 25А 50 М3 7 К5 привела к появлению прижогов на обработанной поверхности. Круги быстро теряли свои режущие свойства и требовали частой правки, что увеличивало вспомогательное время и расход абразивного материала, тем самым, снижая производительность шлифования.

Производственные испытания проводились при плоском шлифовании гильотинных ножей высокопористыми шлифовальными кругами типоразмера 1 600×80×305 двух характеристик 25А 40 М1 12 К и 25А 40 СМ1 12 К.

Шлифование комплекта из трех ножей заготовок размером 1080×123 мм производилось на специальном продольно-шлифовальном станке мод. 20FS3030 фирмы Waldrich Coburg (Германия) на следующих режимах: скорость шлифовального круга – 35 м/с, глубина шлифования за проход – 0,01...0,04 мм, скорость продольной подачи стола – 30 м/мин, поперечная подача круга – 10...40 мм/дв.ход. Правка шлифовальных кругов производилась алмазным карандашом с подачей 1000 мм/мин, глубина правки – 0,07 мм. Шлифование проводилось с охлаждением 3%-ным водным раствором эмульсии ВЭЛС-1.

В ходе испытаний определялось максимальное число проходов, которое можно выполнить до снижения режущих свойств круга или появления дефектов на обрабатываемой поверхности. Фиксировалась потребляемая мощность шлифования, а также фактический съем материала в начале цикла обработки на первой заготовке и в конце обработки на третьей заготовке. Качество обработанной поверхности определялось визуально по эталонному образцу.

В результате производственных испытаний установлено, что при шлифовании гильотинных ножей кругами с харак-

теристиками 25А 40 МЗ 7 К5 и 25А 50 МЗ 7 К5 максимальная фактическая глубина шлифования составляла 0,015 мм с поперечной подачей 10 мм/дв.ход, при этом круг необходимо было подвергать правке после 1...2 проходов; шлифовальный круг с характеристикой 25А 40 СМ1 12 К позволяет форсировать режимы обработки (увеличить глубину шлифования и поперечную подачу в 2 и более раз) при сохранении требований по качеству обработанной поверхности и вести обработку без правки в течение 5...6 проходов, тем самым уменьшить число правок инструмента за цикл обработки.

6.4. ШЛИФОВАНИЕ РЕЗЬБЫ

Резьбошлифование – один из самых экономичных методов изготовления точных резьб. К настоящему времени известны и применяются в производстве три метода профилирования резьбы шлифовальными кругами: продольное шлифование однопрофильным (однониточным) или многопрофильным (многониточным) кругами и врезное шлифование многопрофильным инструментом [87, 99].

Шлифование резьб (наружной, внутренней и конической) выполняют по предварительно нарезанному или накатанному профилю или шлифованием на полную его высоту одно- или многониточными профильными резьбошлифовальными кругами.

Шлифование резьбы производится при строгой согласованности движений: один оборот детали должен соответствовать перемещению профильного круга на один шаг. Круг устанавливается под углом, равным углу подъема резьбы по среднему диаметру. Подачу на глубину шлифования производят на каждый ход стола.

Шлифование резьбы многониточным кругом производят за один или несколько рабочих ходов. Круг имеет заборный конус и состоит из двух-, трех- или четы-

рехпрофильных кругов иногда разной твердости: более твердых – для предварительной обработки и более мягких – для чистового шлифования. Эту схему применяют, например, при шлифовании винтов с одно- и многозаходными резьбами. При шлифовании резьб многониточным кругом достигается меньшая точность обработки, чем при профилировании однониточным кругом.

Для шлифования резьб эффективно применяются многониточные эльборовые круги. Процесс шлифования осуществляется по целой заготовке с продольной подачей кругом, имеющим заборный конус. Число ниток на круге выбирается из условия удаления полного припуска за один рабочий ход. Глубина резания на каждую заборную нитку круга назначается такой, чтобы дефектный слой на каждой предыдущей нитке не превышал припуск, который будет удален последующими нитками [99].

В производственных условиях были проведены испытания высокопористого абразивного инструмента, разработанного и изготовленного специально для профилирования резьб на накатных роликах.

Накатывание резьбы является прогрессивным безотходным методом обработки, который находит широкое применение в различных отраслях машиностроения. Его эффективность находится в прямой зависимости от качества и точности профилирующих накатных роликов, при изготовлении которых обычно применяют эльборовые шлифовальные круги на керамических связках. Однако высокая стойкость эльборового инструмента и большие трудности с его правкой ставят проблему поиска альтернативного метода обработки.

Использование для этих целей абразивных кругов нормальной или плотной структур на керамических связках не всегда оправдано при профилировании мелкомодульных резьб на роликах из закаленных сложнолегированных сталей типа 6Х6ВЗМФС. Это связано с низкой произ-

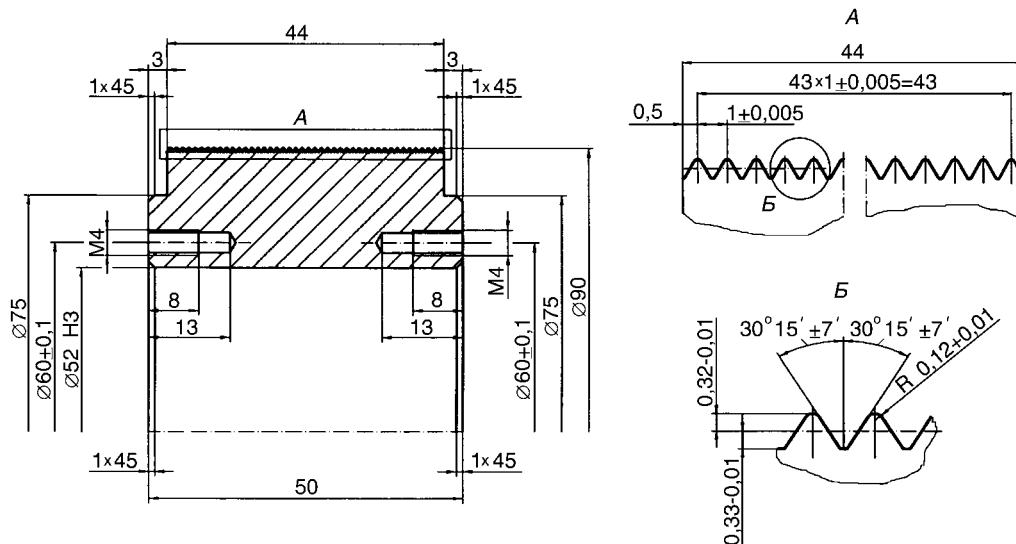


Рис. 6.15. Алмазный правящий ролик

водительностью процесса и появлением дефектов шлифовочного характера – прижогов, сколов и микротрещин.

При испытаниях оценивались эксплуатационные возможности абразивного инструмента различных характеристик в сравнении с применяемыми на заводе шлифовальными кругами из эльбора.

Для испытаний были изготовлены высокопористые круги типоразмера 1 350×40×160 следующих характеристик: из электрокорунда белого 25А 8П СМ1 12К, 25А 6П МЗ 12К, 25А 3П М1/М2 10К и карбида кремния зеленого 64С 6П МЗ 12К, 64С 3П М1/М2 10К, 64С М20 СМ1 9К.

Исследованный диапазон характеристик позволил оценить производительность и качество профилирования резьбы в зависимости от материала абразива, его зернистости, твердости круга и номера структуры.

Для сравнения был испытан также шлифовальный круг из карбида кремния зеленого с характеристикой 11С 500 Е/Ф

20 VPO30G, рекомендованный и изготовленный для профилирования накатных роликов австрийской фирмой Rappold Winterthur.

Испытания проводились на станке мод. RG-500 фирмы Reishauer при шлифовании резьбонакатного ролика из закаленной стали 6Х6ВЗМФС (58...60 HRC), предназначенного для изготовления крепежных шпилек с шагом резьбы $S = 1,0 + 0,04$ мм. Обработка включала в себя полное предварительное и окончательное шлифование (по целому) фасонного профиля ролика после предварительного шлифования заходного конуса. Циклическая правка круга выполнялась дважды при профилировании одной детали.

Для операции резьбошлифования был спроектирован и изготовлен специальный профильный алмазный ролик (рис. 6.15).

Схема профилирования резьбы шлифовальным кругом показана на рис. 6.16.

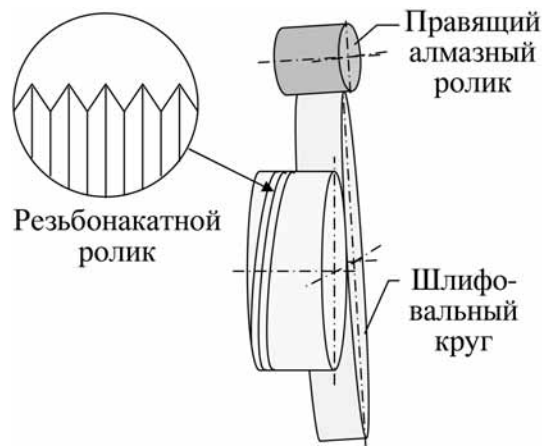


Рис. 6.16. Схема профилирования резьбы шлифовальным кругом

Исследованные режимы шлифования абразивными кругами были идентичны применяемым режимам обработки накатных роликов кругами из эльбора (тип: 1А1-1 350×8×160×10×3 с характеристикой ЛО 63/50 СТЗ К) и изменялись на следующих режимах: скорость круга 25...35 м/с; глубина резания 0,005...0,05 мм; продольная скорость подачи ролика 1...2 мм/об. Зона шлифования охлаждалась раствором сульфозрезола.

В ходе испытаний оценивалась способность шлифовальных кругов к формированию сложных профилей повышенной точности при правке, их размерная стойкость и состояние рабочей поверхности круга в процессе обработки. Для профилирования выбранной для испытаний детали необходимо было обеспечить профиль рабочей поверхности шлифовального круга с радиусами при вершинах не более 0,05 мм. Во всех случаях визуально фиксировалось наличие прижогов и микротрещин на обработанной поверхности.

Предварительно была проверена возможность получения точного профиля на рабочей поверхности круга в зависимости от его характеристики. Для этого каждый круг профилировался накаткой из закаленной стали Р18, у которой профиль

резьбы был сформирован "наостро" однониточным шлифовальным кругом из эльбора. Контроль точности профиля осуществлялся трижды: на станке при профилировании абразивного круга накатником и профилировании шлифовальным кругом обрабатываемой детали, а также вне станка при контроле геометрических параметров резьбы на готовой детали с помощью универсального измерительного микроскопа "УИМ-21".

Выяснилось, что характеристика шлифовального круга оказывает существенное влияние на формирование точного профиля при прочих равных условиях. Имеется прямая связь между зернистостью высокопористого шлифовального круга и минимальным радиусом впадины, которую можно с его помощью получить: чем меньше зернистость инструмента, тем меньше получаемый радиус впадины.

Установлено, что высокопористые абразивные круги всех исследованных характеристик легко подвергаются правке с формированием сложного и точного профиля. Рабочая поверхность круга после правки формировалась без сколов и практически во всех случаях обеспечивала точное профилирование резьбы.

Шлифовальный круг с характеристикой 11С 500 Е/Ф 20 VPO30G, предложенный фирмой Rappold Winterthur, трудно править, но он обеспечивает минимальный радиус при вершинах – 0,01 мм, в отличие от кругов с другими характеристиками. Однако этот круг из карбида кремния зеленого в аналогичных условиях испытаний не обеспечивал процесс профилирования даже на самых мягких режимах шлифования. На всех исследованных режимах обработки были зафиксированы прижоги на обрабатываемой поверхности ролика.

Предложенные круги с характеристиками 64С 6П МЗ 12 К и 25А 6П МЗ 12 К обеспечивают точное и качественное профилирование рабочей поверхности накатного ролика на режимах шлифования эльборовыми кругами. При этом у инструмента из карбида кремния зеленого более высокий режущий потенциал, чем у инструмента из электрокорунда белого. В сравнении с эльборовыми кругами правка абразивного круга должна производиться в 4...8 раз чаще.

В заключение можно отметить, что разработан, изготовлен и испытан абразивный инструмент, который обеспечивает точное и качественное профилирование рабочей поверхности накатных роликов на режимах шлифования, которые применяются при обработке эльборовыми кругами. После шлифования отсутствовали прижоги и микротрещины на обработанной резьбовой поверхности ролика.

Производственными испытаниями установлено, что профильное шлифование абразивными кругами целесообразно производить высокопористым инструментом из карбида кремния зеленого на керамической связке твердостью МЗ со структурой 12 при назначении зернистости в зависимости от геометрических требований резьбового профиля. Зернистость шлифовального круга при профилировании резьбы имеет очень большое значение,

так как размер абразивного зерна не должен быть больше, чем радиус впадины резьбового профиля.

Круги предложенной характеристики имеют размерную стойкость до 1,5...2 раз больше, чем известный абразивный инструмент, применяемый для аналогичных целей.

6.5. ОПЫТ ШЛИФОВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ЗАКАЛЕННЫХ ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ БЕЗ ОХЛАЖДЕНИЯ

Исследования по сухому шлифованию закаленных легированных сталей. Исследования проводились при плоском шлифовании подшипниковой стали марки ШХ15 (62...64 HRC), быстрорежущей стали Р18 (62...64 HRC) и стали 16ХЗНВФМБ-Ш (39...40 HRC), применяемой для изготовления высоконагруженных зубчатых колес.

Целью исследований было установление принципиальной возможности и рациональных условий сухого шлифования, т.е. без применения смазочно-охлаждающих жидкостей, закаленных легированных сталей различного назначения.

Для этого были разработаны рецептурные составы высокопористых шлифовальных кругов на керамической связке из электрокорунда белого марки 25А зернистостью 10, 12 и 16, твердостью в диапазоне ВМ1...СМ2 и номерами структуры 7, 12...16. Круги прямого профиля с размерами 200×20×51 изготовлены по экологически безопасной технологии с применением невыгорающих порообразователей в виде полых микросфер различного состава и размеров.

Образцы из указанных марок сталей с размерами 20×20×20 мм обрабатывались на плоскошлифовальном станке мод. ЛШ-322 на режимах, обычно применяемых при шлифовании с охлаждением.

Исследованный диапазон режима сухого шлифования следующий:

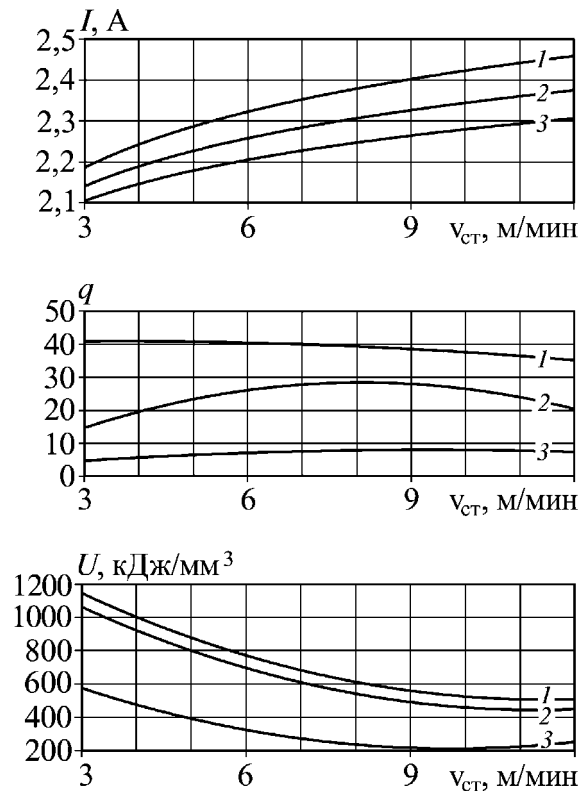


Рис. 6.17. Влияние скорости подачи стола на характеристики процесса сухого шлифования легированных сталей абразивным кругом 25А 12П ВМ2 16 К5 при $t = 0,005$ мм/дв.ход:
1 – ШХ15; 2 – 16ХЗНВФМБ-Ш; 3 – Р18

– скорость шлифовального круга $v_{кр} = 27$ м/с;
– глубина шлифования $t = 0,005$ и $0,01$ мм/ дв.ход;
– скорость подачи стола $v_{ст} = 3, 6, 9$ и 12 м/мин.

В качестве показателей, характеризующих эффективность процесса шлифования, были приняты: минутный съём материала, скорость изнашивания круга, удельная производительность шлифования, а также показатели стабильности процесса, выраженные среднеквадратичными отклонениями минутного съёма материала σ_m , скорости изнашивания круга σ_k и удельной производительности σ_q .

Измерение износа абразивного круга производилось путем переноса рабочего профиля на тонкую пластину и последующим измерением величины износа на микроскопе БМИ-1 при 50-кратном увеличении. Удельная производительность шлифования определялась как отношение минутного съёма материала к скорости изнашивания круга. Термодинамические характеристики процесса оценивались по токовой нагрузке I на приводе главного движения станка, тангенциальной P_z и нормальной P_y составляющих силы резания.

Кроме того, в каждом случае определялась удельная энергоемкость процесса

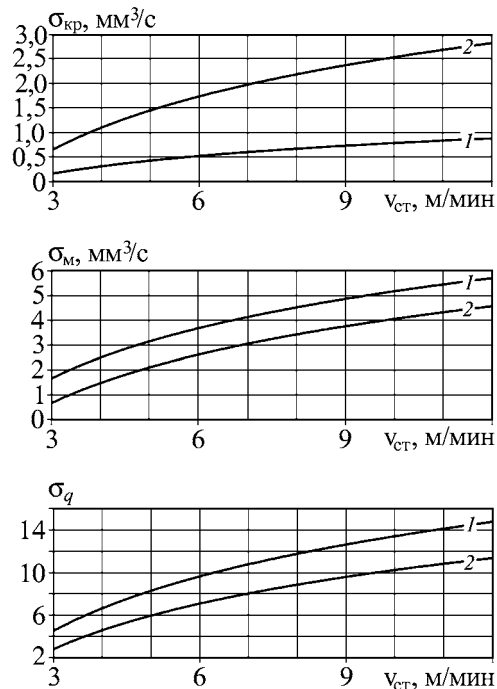


Рис. 6.18. Влияние скорости подачи стола на стабильность характеристик процесса сухого шлифования легированной стали 16ХЗНВФМБ-Ш при глубине обработки $t = 0,005$ мм/дв.ход абразивными кругами:
 1 – 25А 12П М2 16 К5; 2 – 25А 12П ВМ2 16 К5

U (кДж/мм³), выраженная отношением мощности шлифования P_w к минутному съему материала Q_m .

Измерение шероховатости обработанной поверхности производилось на приборе "Профилограф-профилометр" тип А1 мод. 252.

Получены экспериментальные результаты по изменению токовой нагрузки, удельных производительности и энергоемкости процесса шлифования сталей ШХ15, 16ХЗНВФМБ-Ш и Р18 в зависимости от скорости подачи стола при глубине обработки 0,005 и 0,01 мм/дв.ход. Можно отметить, что с увеличением скорости подачи стола $v_{ст}$ возрастает токовая нагрузка I и уменьшается удельная энергоемкость U , причем при глубине резания $t = 0,01$ мм/дв.ход интенсивность увели-

чения I и снижения U выше, чем при $t = 0,005$ мм/дв.ход.

Характер изменения удельной производительности q от подачи стола зависит от глубины резания: при $t = 0,01$ мм/дв.ход за счет более интенсивного износа шлифовального круга q монотонно уменьшается. При $t = 0,005$ мм/дв.ход характер зависимости $q(v_{ст})$ определяется обрабатываемостью стали, т.е. характер этой зависимости для каждой исследованной стали имеет свои особенности. Кроме того, эти эксперименты проводились весьма мягкими кругами с мелким зерном с характеристикой 25А 12П ВМ2 16 К5, для которого глубина резания 0,005 мм является более оптимальной, чем $t = 0,01$ мм/дв.ход, и именно при этих условиях были достигнуты наибольшие значения удельной про-

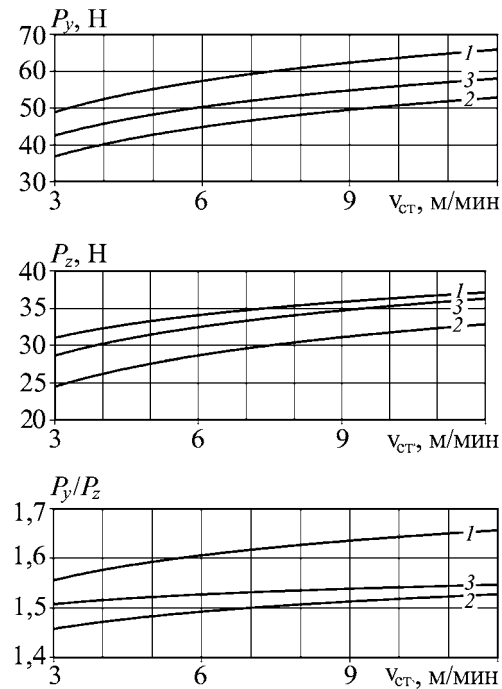


Рис. 6.19. Влияние скорости подачи стола на величину составляющих силы резания при сухом шлифовании быстрорежущих сталей абразивным кругом 25А 10П МЗ 12 К5 при $t = 0,005$ мм/дв.ход:
 1 – Р18; 2 – Р6М5К5-МП; 3 – Р9М4К8-МП

изводительности шлифования всех трех исследованных сталей.

Представленные результаты дают возможность сравнительной оценки обрабатываемости этих сталей сухим шлифованием. Энергетические затраты возрастают для сталей в следующей последовательности: Р18, 16ХЗНВФМБ-Ш и ШХ15, а наибольшая удельная производительность, напротив, обеспечивается при обработке стали ШХ15 (см. рис. 6.17).

Для описанных условий сухого шлифования были исследованы среднеквадратичные отклонения по минутному съему σ_m , износу круга σ_k и их отношения – удельной производительности шлифования σ_q , чтобы оценить стабильность процесса в зависимости от глубины резания и скорости подачи стола.

Зависимость исследованных характеристик стабильности от режима шлифования носит достаточно сложный характер, но в целом можно утверждать, что увеличение t и $v_{ст}$ для всех обработанных легированных сталей приводит к увеличению рассеяния характеристик процесса и нестабильной работе абразивного инструмента.

При обработке стали 16ХЗНВФМБ-Ш сравнивали работоспособность двух высокопористых кругов, которые различались только степенью твердости (ВМ2 и М2), и в этих условиях оценивали стабильность процесса. Более твердый круг обеспечивает более высокие значения токовой нагрузки I и, вследствие более высокой износостойкости, дает более высокие значения удельной производитель-

ности шлифования q . Шлифовальный круг с твердостью M2 более эффективно работает по сравнению с кругом твердостью BM2.

Однако несмотря на увеличение твердости на 2 степени, шлифовальный круг с характеристикой 25A 12П M2 16 K5 не обеспечивает стабильности процесса сухого шлифования при форсировании его режимов (рис. 6.18). Среднеквадратичные отклонения съема материала, износа круга и удельной производительности обработки во всем исследованном диапазоне режима сухого шлифования возрастают.

Аналогичные исследования были проведены при шлифовании без охлаждения закаленных быстрорежущих сталей марок P6M5K5-МП (63...66 HRC) и P9M4K8-МП (65...67 HRC). На рис. 6.19 в качестве примера показано влияние скорости продольной подачи стола на величину составляющих силы резания P_y и P_z и их отношение.

В условиях шлифования без охлаждения подтвердился тот факт, что с увеличением номера структуры и одновременным увеличением твердости высокопористого абразивного круга характеристики процесса резания улучшаются. Установлено, что более твердые высокопористые круги с крупным зерном обеспечивают более эффективное шлифование по скорости съема материала при высоких режимах обработки и высокую удельную производительность на низких режимах обработки. Более высокая стабильность протекания процесса сухого шлифования обеспечивается применением мягких и мелкозернистых высокопористых кругов на низких режимах шлифования и твердых кругов со средним размером зерна на средних режимах шлифования. Работа на интенсивных режимах, несмотря на отсутствие прижогов, приводит к преждевременному износу инструмента, повышению шероховатости обработанной поверхности и, следовательно, уменьшает эффективность применения данных кругов.

Проведенный анализ шероховатости обработанных поверхностей показал, что с увеличением твердости и уменьшением зернистости высокопористого абразивного круга шероховатость обрабатываемых поверхностей уменьшается, а при уменьшении твердости абразивных кругов и увеличении их зернистости она резко возрастает. Изменение режимов обработки также оказывает большое влияние на шероховатость обработанных поверхностей, при этом изменение глубины обработки в большей степени воздействует на изменение шероховатости, чем изменение подачи.

Сравнительные рентгенографические исследования поверхностного слоя деталей после обработки с обильным охлаждением и после шлифования без охлаждения подтвердили возможность бездефектной обработки легированных сталей высокопористыми кругами специальной структуры без применения охлаждения.

Необходимо отметить, что при шлифовании закаленных легированных сталей, включая и быстрорежущие, кругами нормальной структуры без применения охлаждения диапазон режимов бездефектной обработки существенно меньше аналогичного диапазона режимов шлифования высокопористыми кругами специальной структуры.

Выявленные закономерности процесса сухого шлифования абразивными кругами показали, что легированные стали можно эффективно обрабатывать высокопористыми кругами специальной структуры без применения смазочно-охлаждающих технологических сред.

Формирование поверхностного слоя при шлифовании быстрорежущих сталей без охлаждения. Целесообразность применения шлифования без охлаждения как экологически безопасного процесса обработки определяется, главным образом, возможными негативными последствиями формирования поверхностного слоя обработанной детали. Только при обеспечении гарантированного каче-

ства изготовления можно оценивать его с точки зрения экологической безопасности и технико-экономической эффективности.

Формирование поверхностного слоя детали, обрабатываемой шлифованием, происходит под воздействием взаимного влияния теплового и силового факторов, интенсивность которых определяется силой резания. Тенденция использования высокопористых кругов, динамическое воздействие которых на обрабатываемую поверхность детали существенно (до 1,3...1,5 раза) меньше, чем у шлифовальных кругов нормальной структуры, создает предпосылки уменьшения негативного воздействия температурно-силового фактора процесса шлифования на свойства поверхностного слоя. Однако отсутствие охлаждения зоны резания вносит элемент неопределенности в характер и условия совокупного термодинамического воздействия на обрабатываемый материал.

В этой связи представляет большой научный и практический интерес сравнительный анализ влияния условий шлифования с охлаждением и без него на свойства поверхностного слоя обработанной детали.

В качестве обрабатываемых материалов были выбраны закаленные быстрорежущие стали марок P18, P6M5K5-МП и P9M4K8-МП, которые чувствительны к структурным и фазовым превращениям при шлифовании. Обработка образцов размером 20×20×20 мм после закалки и отпуска производилась при плоском шлифовании на станке мод. ЛШ-322 шлифовальными кругами типоразмера 1 200×20×76. Шлифование образцов производилось по всей его ширине на режиме, применяемом в заводских условиях для заточки сложнофасонного инструмента: скорость круга 27 м/с, скорость продольной подачи стола 10 м/мин и глубина обработки 0,005 мм/дв.ход. Состояние поверхностного слоя исследовали после 10 проходов при постоянном режиме шлифования.

Для шлифования с охлаждением был использован шлифовальный круг с нормальной структурой и с характеристикой 25A 16П СМ2 7 K5, применяемый на производстве. Охлаждение зоны резания производилось 2%-ным содовым раствором, обеспечивающим наибольший охлаждающий эффект по сравнению с масляными эмульсиями.

Сухое шлифование образцов из закаленных быстрорежущих сталей выполнялось на аналогичном режиме, т.е. с одинаковой производительностью высокопористым кругом с характеристикой 25A 16П М2 14 K5.

Сравнительные исследования поверхностного слоя образцов после двух вариантов обработки включали в себя анализ микроструктуры, измерение микротвердости и рентгенографический анализ. Микроструктура поверхностного слоя изучалась при увеличении 300, измерение микротвердости обработанной поверхности производилось на приборе ПМТ-3. Рентгеновская съемка обработанной поверхности образцов выполнялась на аппарате "ДРОН-3" с использованием программы "Ехргсум".

Обработка рентгенограмм осуществлялась с учетом рекомендаций, изложенных в [48].

При съемке использовали монохромное $\text{Co } \alpha$ -излучение с графитовым монохроматором отраженного пучка с характеристиками: напряжение на аноде трубки $U = 40$ кВ, ток на аноде трубки $I = 35$ мА, ширина щелей – 1 и 0,5 мм, постоянная времени $RC = 1$ с.

Съемку осуществляли по точкам в угловом интервале 2θ , равном 11° ; от 44 до 55° , шаг съемки $0,05^\circ$. Экспозиция на точку съемки 10 с.

Рентгенограммы поверхностей образцов приведены на рис. 6.20, 6.21.

После записи рентгенограммы выполнялось графическое разделение линий мартенсита (110)-(101)(011) и остаточного аустенита (111) для определения количества последнего по формуле:

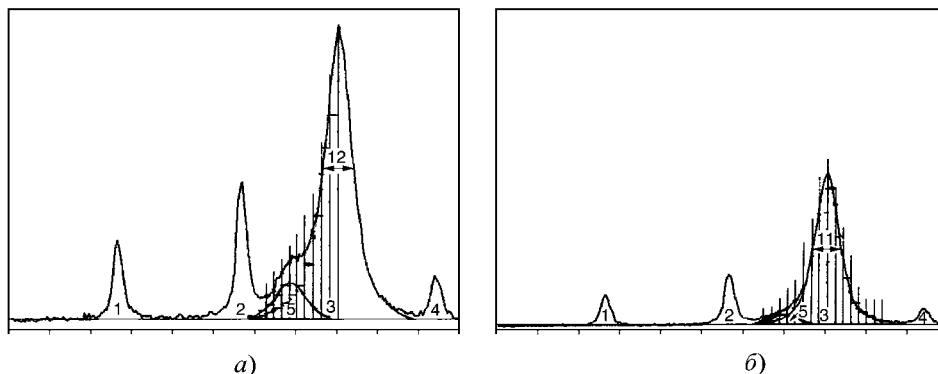


Рис. 6.20. Рентгенограммы поверхностного слоя образцов из стали Р18 шлифованных:
а – без применения смазочно-охлаждающих сред; *б* – при обильном охлаждении 2%-ным содовым раствором

$$A_{\text{ост}} = \frac{3S_{\text{оа}}}{2S_{\text{м}} + 3S_{\text{оа}}} 100 \%,$$

где $S_{\text{оа}}$ – площадь под линий (111) остаточного аустенита, $S_{\text{м}}$ – площадь под линиями (110)-(101)(011) мартенсита.

Погрешность измерений $A_{\text{ост}}$ не превышает 10 %.

В табл. 6.5 приведены результаты измерения микроструктуры обработанной поверхности образцов из быстрорежущих сталей Р18, Р6М5К5-МП и Р9М4К8-МП, а результаты обработки рентгенограмм представлены для сталей Р18 и Р6М5К5-МП.

Комплексный анализ представленных характеристик дает возможность установить механизм формирования по-

верхностного слоя закаленных быстрорежущих сталей при сухом шлифовании в сравнении с обработкой с охлаждением.

Известно, что закаленные легированные стали при шлифовании претерпевают существенные структурные и фазовые превращения, которые приводят к изменению физико-механических свойств поверхностного слоя обработанных деталей [10, 21, 41, 99]. Быстрый нагрев мартенситной структуры выше критической температуры превращений вызывает ее переход в аустенит. Структурные превращения сопровождаются изменением тетрагональной решетки аустенита. Верхний,

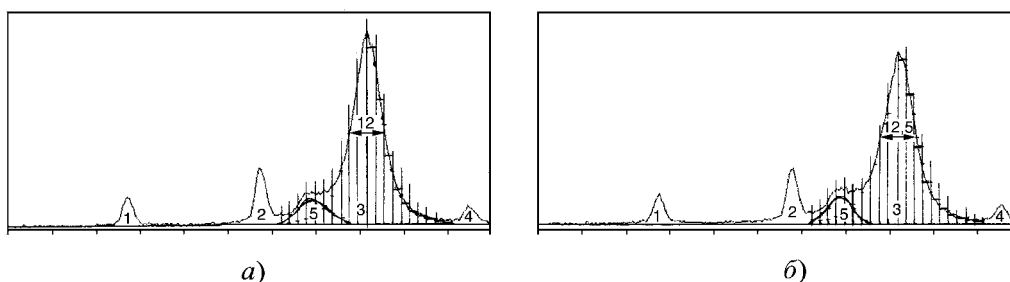


Рис. 6.21. Рентгенограммы поверхностного слоя образцов из стали Р6М5К5-МП шлифованных:
а – без применения смазочно-охлаждающих сред; *б* – при обильном охлаждении 2%-ным содовым раствором

6.5. Свойства обработанной поверхности после сухого шлифования и шлифования с охлаждением

Сталь	Условия шлифования	Микротвердость, МПа	Остаточный аустенит, %	Ширина линии мартенсита, мин	Период решетки мартенсита, °А
P18	—	9770/8970	15,6	46,87	2,885
	С охлаждением	7940/8970	7,9	43,00	2,883
P6M5K5-МП	—	11190/11700	15,2	46,87	2,875
	С охлаждением	11190/11700	14,2	48,80	2,878
P9M4K8-МП	—	9770/11700	—	—	—
	С охлаждением	8970/11700	—	—	—

Примечание. В числителе приведена микротвердость обработанной поверхности, в знаменателе – середины образца.

вторично закаленный, слой лежит обычно на слое отпущенного металла, который по мере углубления постепенно переходит через все стадии отпуска в исходную структуру закалки. Это объясняется воздействием нижележащих нагретых слоев металла. Теплота, выделяющаяся при шлифовании, оказывает на шлифованную поверхность упрочняющее действие, которое проявляется в образовании вторично закаленного слоя повышенной твердости. Одновременно с этим проявляется и разупрочняющее действие теплоты, выражающееся в отпуске поверхностно закаленного слоя. Однако при небольшой глубине слоя, находящегося под влиянием высоких температур, превалирует упрочняющее действие теплоты.

В случае если имеет место большая глубина нагрева, то наблюдается уменьшение поверхностной твердости и уменьшение толщины вторично закаленного слоя под воздействием отпуска поверхностного слоя обрабатываемой детали.

По мнению автора работы [21], роль теплового фактора в формировании свойств поверхностного слоя при шлифо-

вании является более существенной, чем влияние силового фактора. Таким образом, механизм формирования свойств поверхностного слоя закаленных быстрорежущих сталей при сухом шлифовании и обработке с охлаждением СОТС предопределен условиями и интенсивностью нагрева и охлаждения.

Практически во всех исследованных случаях наблюдается снижение поверхностной микротвердости, что свидетельствует об образовании отпущенного слоя.

При шлифовании стали P6M5K5-МП снижение поверхностной микротвердости оказалось одинаковым для обоих вариантов обработки, а для стали P9M4K8-МП после шлифования без охлаждения микротвердость поверхности была незначительно (на 9 %) больше, чем после обработки с СОТС.

Одинаковая микротвердость поверхности для стали P6M5K5-МП коррелируется с содержанием остаточного аустенита: его содержание в обоих случаях практически одинаково, разница 7 % находится в пределах ошибки измерения.

Более высокая поверхностная микротвердость (на 9 %) больше, чем для серд-

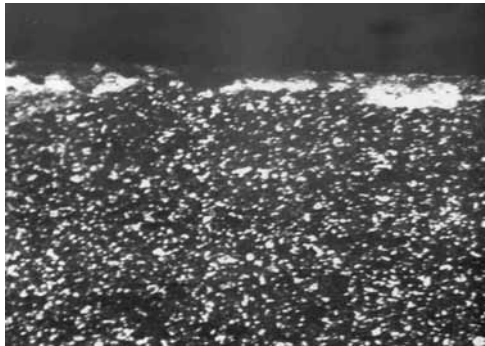
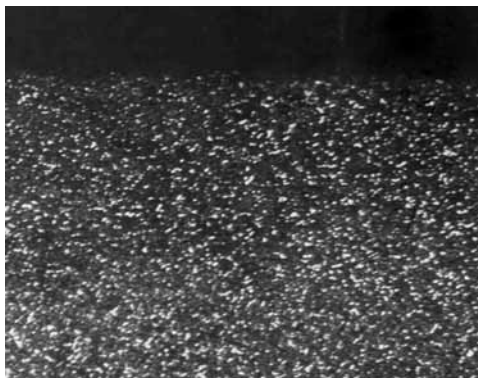
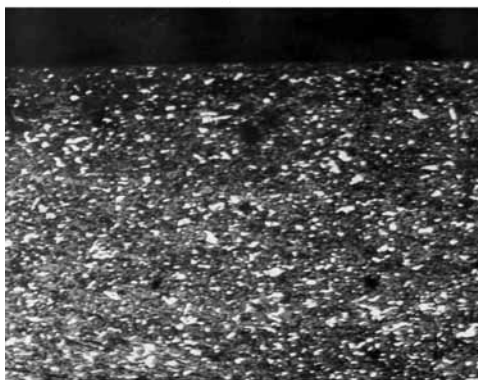


Рис. 6.22. Микроструктура стали Р9М4К8-МП при шлифовании с применением COTC



а)



б)

Рис. 6.23. Микроструктура после шлифования высокопористым кругом стали марки:
а – Р6М5К5-МП, б – Р9М4К8-МП

цевины образца, свидетельствует об образовании вторично закаленного слоя на поверхности быстрорежущей стали Р18 после ее шлифования без охлаждения. Этот факт подтверждает и повышенное содержание остаточного аустенита в поверхностном слое.

Исследованием микроструктуры поверхностных слоев различных сталей установлено наличие зонального изменения структуры в виде белой нетравящейся полосы (предположительно прижога) на образцах из сталей Р18 и Р9М4К8-МП после шлифования кругом нормальной структуры с охлаждением. При шлифовании образцов высокопористым кругом без охлаждения изменений в микроструктуре поверхностного слоя не обнаружено (рис. 6.22, 6.23).

Другие структурные изменения в поверхностном слое сталей Р18 и Р6М5К5-МП после двух вариантов шлифования составили: ширина линии мартенсита – в пределах 4...9 %, период решетки – меньше 1 %.

Прежде чем сделать заключение о влиянии сухого шлифования на формирование свойств поверхностного слоя закаленных быстрорежущих сталей, необходимо учесть следующее обстоятельство. Исследования проводились на постоянном режиме шлифования независимо от характеристики инструмента и марки обрабатываемой стали, т.е. без его корректировки. Однако прямые измерения показали, что сила резания, а, следовательно, и термодинамическое воздействие при шлифовании стали Р18 на 35 %, а стали Р9М4К8-МП на 17 % больше, чем при аналогичных условиях обработки стали Р6М5К5-МП. Соответственно и условия формирования свойств поверхностного слоя этих сталей при одинаковом режиме шлифования будут различными. При оптимизации условий шлифования можно обеспечить минимальные негативные последствия для качества обработки или гарантировать их отсутствие.

Это подтверждают результаты, приведенные в данной работе прямых экспериментальных исследований.

Опыт применения сухого шлифования прецизионных деталей. Проведены производственные испытания процесса шлифования без охлаждения деталей гидроагрегатов из закаленных легированных сталей высокопористыми абразивными кругами.

На основе анализа технических требований, предъявляемых к деталям гидроагрегатов, и технологических возможностей применяемого на заводе оборудования были разработаны рецептуры специальных высокопористых абразивных кругов из электрокорунда белого марки 25А зернистостью 12 и 16, твердостью от М1 до С1 с номерами структуры 10 и 12 на керамической связке для кругов прямого профиля с размерами 250×20×76, 250×40×76 и 350×25×127.

Испытания проводили на прецизионном плоскошлифовальном станке фирмы Jones-Shipman (Англия) при шлифовании плоских поверхностей серийных деталей:

- шайба опорная, материал – сталь 95Х13МКЗБ2Ф-ВЧ (59 HRC);
- шайба опорная, материал – сталь Х12Ф1 (56...61 HRC);
- шестерня, материал – сталь 16ХЗНВФМБ-Ш (60 HRC).

Шлифование поверхностей деталей производили после их цементации.

Исследованный диапазон параметров режимов сухого шлифования: скорость круга 27 м/с; скорость продольной подачи стола 4000...8000 мм/мин; поперечная скорость подачи стола 0,25...1 мм/ход; глубина резания 0,002...0,05 мм.

В соответствии с технологией обработки, удаление припуска производилось последовательно с изменением режима шлифования от форсированного до мягкого за счет изменения скорости подачи стола и глубины обработки.

В качестве критериев эффективности сухого шлифования высокопористыми

кругами была принята оценка режущей способности инструмента, характеризующая интенсивностью его изнашивания, степенью нагрева заготовки, а также шероховатостью обработанной поверхности, наличием на ней прижогов и трещин, определяемым по заводским методикам. Решающим фактором целесообразности применения той или иной характеристики инструмента и режима шлифования было обеспечение заданных требований по точности обработки: отклонение от параллельности и плоскостности в пределах 3...5 мкм и шероховатости обработанной поверхности ($Ra = 0,16...0,32$ мкм).

Испытаниями установлено, что применение высокопористых кругов позволяет реализовать процесс сухого шлифования ответственных деталей из закаленных легированных сталей с обеспечением повышенных требований по точности и качеству обработки.

Достоинством процесса шлифования без охлаждения новым инструментом является минимальное и стабильное во времени термодинамическое воздействие на обрабатываемую деталь. Обеспечению высокой точности обработки способствует также минимальная деформация детали после шлифования, обусловленная более благоприятным характером процесса нагрев-охлаждение и однородным распределением температурных деформаций.

Преимуществом нового инструмента является работа в режиме самозатачивания при его достаточно высокой размерной стойкости. При использовании круга с нормальной структурой 25А 25П СМ2 6 К5 процесс изнашивания круга протекает в режиме "засаливания", что требует более частой правки для восстановления его режущей способности (круг правится в 3...5 раз чаще, чем высокопористые круги).

Испытаниями также установлено, что высокопористые абразивные круги дают возможность форсировать режимы шлифования, обеспечивая необходимые требования по точности и качеству обра-

ботки с производительностью съема материала до 2 раз выше, чем при обработке применяемым на заводе инструментом. При этом прижогов и трещин на обработанных поверхностях различных деталей после шлифования не наблюдалось, а параметр шероховатости обеспечивался не выше $Ra = 0,12...0,63$ мкм в зависимости от материала и типа детали (после обработки серийным кругом $Ra = 0,32...1,25$ мкм).

Опыт бездеформационного сухого шлифования. Высокопористые шлифовальные круги специальной структуры испытаны и внедрены взамен стандартного абразивного инструмента для повышения производительности обработки, предотвращения прижогов и уменьшения деформации деталей при обработке без охлаждения заготовок из коррозионно-стойких легированных сталей.

На этапе выбора оптимальной характеристики инструмента были разработаны и изготовлены опытные шлифовальные круги типоразмера 1 250×32×76 четырех характеристик с различной комбинацией порообразующих наполнителей.

Испытания проводились на плоско-шлифовальном станке мод. ВР на операции шлифования двух видов деталей из различных материалов. Правка шлифовальных кругов осуществлялась алмазным карандашом.

Одновременное шлифование четырех деталей "Крышка" из стали 14X17H2 (30...35 HRC) с габаритными размерами 50×25×1,5 мм производилось высокопористыми кругами 24А 25П М2 12 К5 и 24А 40П СМ1 10 К5 на следующих режимах: скорость круга – 35 м/с, глубина шлифования – 0,1...0,15 мм, продольная подача – 15 м/мин, поперечная подача – 2 мм/ход.

В отличие от нового инструмента стандартный шлифовальный круг, ранее применяемый на этой операции, с характеристикой 14А 40П СТ1 6 К5 позволял вести обработку только по врезной схеме, без поперечной подачи с глубиной шлифования 0,01 мм за проход и скоростью

продольной подачи 15 м/мин. Причем круг работал в режиме "затупление". Опытные шлифовальные круги работают в режиме самозатачивания, что позволяет вести шлифование с большей глубиной и с поперечной подачей.

Сухое одновременное шлифование четырех деталей "Матрица" с габаритными размерами 60×6×1,45 мм из стали 95Х18 (50...55 HRC) проводилось высокопористыми кругами на режимах: скорость круга – 35 м/с; глубина шлифования: предварительное – 0,03...0,05 мм, окончательное – 0,015...0,02 мм, продольная подача – 15 м/мин; поперечная подача – 0,3...0,5 мм/ход. Шлифование серийным кругом с характеристикой 14А 40П СТ1 6 К5 осуществлялось так же, как и в первом случае, без поперечной подачи с глубиной на предварительных и окончательных проходах 0,01 мм.

Критериями определения момента потери шлифовальным кругом его режущих свойств и снижения качества обработки поверхности являлось появление прижогов и выход размера обработанной поверхности за границы допуска. Результаты испытаний представлены в табл. 6.6.

Производственные испытания показали, что применение новых высокопористых кругов по сравнению с обычным абразивным инструментом позволяет увеличить производительность обработки в 2,5 раза, повысить качество поверхностного слоя и тем самым полностью исключить появление брака из-за прижогов и деформации заготовок после шлифования. Кроме того, стойкость нового шлифовального круга на указанных операциях повысилась до 3 раз, что уменьшило его расход.

Наилучшие результаты при обработке без охлаждения коррозионно-стойких легированных сталей показал высокопористый шлифовальный круг с характеристикой 24А 25П М2 12 К5, который был внедрен на заводе взамен ранее применяемого на этих операциях абразивного инструмента.

6.6. Результаты испытаний шлифовальных кругов

Характеристика круга	Количество деталей, обработанных до правки круга, шт.		Шероховатость поверхности Ra , мкм	
	крышка	матрица	крышка	матрица
24А 25П М2 12 К5	12	8	0,63	0,63
24А 40П СМ1 10 К5	6	6	1,25	1,25
14А 40П СТ 16 К5	6	4	1,25	1,25

Приведенные результаты свидетельствуют, что процесс сухого шлифования может эффективно использоваться при

обработке высокоточных и ответственных деталей из закаленных легированных сталей.

Глава 7

ГИБКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС И ШЛИЦЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ

В современных условиях конкурентоспособность машиностроительной продукции на мировом рынке определяется не только ее высокими потребительскими свойствами, но в большей степени быстротой реакции на их возможное изменение за счет освоения новых конструкций, материалов, технологий и ужесточения требований к точности и качеству изготовления.

Все более очевидной становится тенденция непрерывного и быстрого обновления продукции с небольшими объемами выпуска при одновременном поиске путей снижения ее себестоимости. В этой связи резко возрастает потребность в мобильности и высоком технологическом уровне производства, его насыщенности прогрессивными наукоемкими технологиями для изготовления изделий лучше мировых аналогов.

В данной главе дано описание технологии, которая отвечает современным требованиям гибкости, производительности, ресурсосбережения, экономичности и экологической безопасности. Оригинальность разработанной технологии изготовления зубчатых колес и шлицевых соединений заключается в интеграции в одном технологическом процессе противоречивых и ранее считавшихся на практике несовместимых высоких показателей производительности и качества обработки при чрезвычайно высокой гибкости освоения новой продукции. Этого удалось достигнуть за счет разработки и освоения оригинальной схемы профилирования при согласованном назначении оптимальных параметров процесса как по характеристике разработанного в данной работе инструмента, так и по режимам обработки

с учетом технических возможностей существующего оборудования.

Работа выполнена совместно с ФГУП ММПП "Салют" [61, 62, 83, 95]. Она изначально была ориентирована на использование имеющегося в России оборудования, а рекомендации разрабатывались с учетом конкретных технологических возможностей зубошлифовальных станков и применяемых технологических схем профилирования зубчатых колес и соединений. Такой подход обеспечил достаточно быстрое и эффективное внедрение полученных результатов в промышленную практику.

В результате создана и внедрена в промышленность технология изготовления зубчатых колес и соединений, которая по производительности, качеству и гибкости не имеет аналогов в мире. Новая технология включает в себя формообразование зубчатых колес и соединений из закаленных легированных сталей, а также жаропрочных никелевых и титановых сплавов глубинным шлифованием взамен методов лезвийной обработки и объединяет в одном технологическом процессе предварительное профилирование зубьев и их чистовое шлифование с обеспечением степени точности до 3–4. Промышленная практика применения подтверждает ее универсальность для различных отраслей машиностроения.

7.1. ЗУБЧАТЫЕ КОЛЕСА ОТВЕТСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ ИХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ

Зубчатые передачи относятся к наиболее распространенным конструктивным элементам самых разнообразных машиностроительных изделий. По компактности

конструкций, надежности, высокому коэффициенту полезного действия и возможности передавать большие нагрузки в широком диапазоне скоростей и нет аналогов среди других видов преобразования и распределения энергии. Безусловные преимущества зубчатых передач, а также зубчатых соединений способствуют их широкому распространению в таких отраслях промышленности, как авиационная, автомобилестроение, судостроение, станкостроение, подъемно-транспортное машиностроение и др.

Качество и точность изготовления зубчатых колес в значительной степени определяют как работоспособность самих передач, так и эксплуатационные характеристики – надежность и долговечность работы самих изделий.

К зубчатым колесам ответственного назначения можно отнести колеса, которые подвержены высоким силовым, температурным и вибрационным нагрузкам, а также колеса, которые применяются в кинематически точных передачах (например, прецизионных станков). Класс колес ответственного назначения охватывает авиационные зубчатые колеса со степенью точности 4...5, колеса, применяемые в станкостроении (степень точности 4...6), судостроении, газотурбинных энергетических установках, автомобилестроении (степень точности 5...6), подъемно-транспортных машинах, железнодорожном транспорте (степень точности 6) и др.

Наиболее применяемыми в машиностроении – до 95 % объема – являются цилиндрические колеса с внешними и внутренними зубьями, остальные – это конические колеса прямозубые и с круговыми зубьями [61]. Из общего объема изготавливаемых зубчатых колес примерно 80 % составляют колеса с характеристиками: модуль 1...6 мм, число зубьев 5...130, ширина венца 5...70 мм, угол зацепления 20...28°, диаметр делительной окружности 50...600 мм [61].

Традиционная технология изготовления зубчатых колес с модулем более

1 мм предусматривает формообразование зубьев методами лезвийной обработки – фрезерованием, строганием или долблением. Выбор метода обработки зависит от конструктивных особенностей зубчатого колеса. Точность обработки лезвийным методом не превышает степени точности 7...8. Чтобы обеспечить более высокую степень точности, вводится дополнительная операция зубошлифования, реже – хонингование или шевингование специальным абразивным инструментом.

Для улучшения эксплуатационных свойств зубчатые колеса подвергают упрочнению закалкой или химико-термической обработкой (цементация, азотирование, нитроцементация с последующей закалкой). Упрочнение сопровождается существенной деформацией зубьев, в результате чего точность зубчатых колес понижается на 2...3 степени. Чтобы компенсировать неблагоприятный деформационный эффект от упрочнения, предусматривается зубошлифование как до упрочняющей обработки, так и после нее. Необходимость применять зубошлифование диктуется требованиями технологии изготовления не только зубчатых колес со степенью точности 4...6, но и для повышения предварительной точности и снижения шероховатости перед упрочняющей обработкой зубчатых колес со степенью точности 7...8.

Повышенная точность обработки присуща, следовательно, не только зубчатым колесам ответственного назначения, но и всем зубчатым колесам и соединениям, которые упрочняются термической или химико-термической обработкой. Поэтому практически у всех упрочняемых для увеличения ресурса работы зубчатых колес формирование зубчатых элементов производится лезвийной обработкой с последующим зубошлифованием.

Описанная технология формообразования зубчатых колес является базовой не только для отечественного машиностроения [28], но и для зарубежного [73]. Чтобы, с одной стороны, обеспечить макси-

мальную экономичность производства, а с другой – получить зубчатые колеса высокой точности, часто сначала производится черновое зубонарезание с высокими скоростями резания и большими подачами, затем выполняется чистовая обработка. Для чернового зубонарезания применяются в основном зубофрезерование и зубодолбление, а для чернового нарезания зубчатых колес больших размеров – зубострогание по методу обката. К методам окончательной обработки относится прежде всего шлифование зубьев методом обката, которое в противоположность шевингованию может выполняться и после термообработки на закаленных деталях.

При современной тенденции к большому разнообразию конструктивных исполнений зубчатых колес, особенно в мелкосерийном и единичном производстве, требуется соответственно и большое многообразие технологических схем, зубообрабатывающего оборудования и режущего инструмента для их изготовления.

Зубошлифование относится к наиболее производительным методам обеспечения высокой точности зубчатых колес в сравнении с другими процессами абразивной обработки. Современные зубошлифовальные станки позволяют достигнуть 3...4-й степени точности и работают по двум принципиально различным схемам – методом обката с периодическим или непрерывным делением или методом профильного зубошлифования (копирования). Обычно зубошлифованием, чтобы обеспечить заданные требования по точности и шероховатости обработанной поверхности, удаляют припуск 0,15...0,25 мм с каждой стороны зуба.

Специфичным фактором всех методов зубошлифования является неравномерный съем припуска по длине и высоте зуба, что в сочетании с исходной погрешностью профиля приводит к существенным колебаниям глубины шлифования. Неоднородный термодинамический режим взаимодействия шлифовального круга с профильной поверхностью создает

предпосылки для формирования неоднородного напряженно-деформированного состояния в поверхностных слоях обрабатываемых зубьев. При наложении его на упрочнение металла от предшествующей химико-термической обработки резко возрастает риск появления прижогов и трещин [99, 100].

Решающее значение в этой связи приобретает правильное назначение характеристики шлифовального круга, с тем чтобы в описанных экстремальных условиях зубошлифования обеспечить благоприятный режим в зоне резания в основном за счет стабильной режущей способности и равномерного изнашивания инструмента по всей рабочей поверхности. Поскольку условия формообразования зубчатых колес зависят от их модуля, то и характеристику шлифовального круга рекомендуется назначать дифференцированно: чем меньше модуль, тем меньше должна быть зернистость и выше твердость абразивного инструмента. Эта же тенденция учитывается при переходе от предварительной к чистовой обработке: от крупнозернистых (16...25) мягких (M1...M3) кругов следует переходить к мелкозернистому (6...12) инструменту с повышенной твердостью (M3...CM2).

Указанные рекомендации основаны на том, что в случае применения мелкозернистых кругов достигается равномерное распределение абразивных зерен на рабочей поверхности инструмента и соответственно однородная его режущая способность в каждой точке или линии контакта с обрабатываемым зубом. Как известно, при постоянном номере структуры уменьшение зернистости приводит к увеличению количества абразивных зерен в единице объема шлифовального круга, что способствует однородному их распределению в абразивной массе. Аналогичным образом повышенная твердость достигается введением в абразивную массу большего количества связки (обычно керамической), что способствует равнопрочности взаимной связи абразивных зерен (твердости) в объеме инструмента.

Однако рекомендуемые характеристики шлифовальных кругов не всегда соответствуют реальным условиям зубошлифования. По мнению автора работы [99], различное сочетание гребешков и впадин, образовавшихся после чернового и чистового шлифования, приводит к тому, что иногда на чистовых рабочих ходах удаляемый припуск в несколько раз больше номинальной величины, установленной при программировании обработки на станке. На отдельных участках поверхности зуба максимальные глубины на чистовых рабочих ходах могут превысить глубину обработки на черновых рабочих ходах.

Если при этом используются рекомендуемые мелкозернистые шлифовальные круги повышенной твердости, то возникают крайне неблагоприятные для качества обработки термодинамические условия зубошлифования с интенсивным теплообразованием на локальных участках обрабатываемых поверхностей зубьев и повышенным риском формирования термических дефектов.

Применение мелкозернистых шлифовальных кругов нормальной структуры с повышенной твердостью, обеспечивая высокую точность обработки при минимальной шероховатости обработанной поверхности, зачастую сопровождается дефектами шлифовочного характера – прижогами и микротрещинами. Ситуация усугубляется после химико-термической обработки, когда напряженная структура поверхностного слоя детали подвергается дополнительному интенсивному термодинамическому воздействию в процессе шлифования [9, 10].

Использование в этой связи высокопористых шлифовальных кругов, как показали результаты данной работы, позволяет существенно снизить интенсивность термодинамической напряженности в зоне резания и, как правило, исключает вероятность появления прижогов и микротрещин на обработанной поверхности детали по вине процесса шлифования. Это

подтверждается и практикой шлифования зубчатых колес высокопористыми кругами при различных схемах профилирования. Однако в литературе на момент начала данной работы отсутствовали результаты исследований и практические рекомендации по чистовому шлифованию зубчатых колес высокопористыми абразивными кругами на керамических связках.

У цилиндрических зубчатых колес силовой группы с внешними зубьями или колес повышенной точности с модулем более 2,5 мм применяют форму зуба с подвнутренним основанием зубьев – выкружкой. Ее формируют методом обката специальными червячными фрезами, долбяками или гребенками, имеющими протуберанец в виде утолщения на вершинах зубьев. Основное назначение выкружки – обеспечить свободный выход шлифовального круга при последующем точном профилировании рабочих поверхностей зубьев. Введение дополнительной операции по формированию выкружки является вынужденной технологической мерой, так как конструктивно она ослабляет наиболее напряженную и ответственную часть зубчатого профиля – его основание и впадину между смежными зубьями [61].

Таким образом, при традиционной технологии, принятой во всем мире, точное профилирование зубчатых элементов колес и соединений предусматривает две операции зубонарезания лезвийным инструментом и абразивную обработку (чаще – шлифование), а для колес со степенью точности 4...6 еще одну операцию зубошлифования после упрочняющей обработки.

Предварительное профилирование зубьев и фрезерование выкружки производится инструментами, которые ориентированы только на один заданный типоразмер. Для его проектирования и изготовления в случае необходимости выпуска зубчатых колес новой номенклатуры требуется от 1 до 3 месяцев в зависимости от сложности конструкции. Применение

такого инструмента и соответственно технологии зубонарезания лезвийным инструментом экономически оправдано только при производстве больших партий зубчатых колес. К этому можно добавить, что по применяемой технологии производится многократная установка зубчатых колес и режущего инструмента на станках различного типа и наладка операций на точное профилирование. Пролеживание деталей между дополнительными операциями также удлиняет производственный цикл изготовления зубчатых колес.

В трудоемкости изготовления зубчатых колес затраты на их профилирование лезвийной обработкой и зубошлифованием обычно составляют от 18 до 35 % в зависимости от степени сложности, а затраты на специальный зуборезный инструмент в структуре себестоимости операции превышают 25 %. Технология профилирования является основным фактором, регламентирующим сроки выпуска, экономичность, точность и качество зубчатых колес.

При нынешней экономической конъюнктуре поведенческая стратегия промышленных предприятий ориентирована не только на выпуск небольших партий изделий, но и на изготовление по заказам их единичных экземпляров и даже отдельных конструктивно сложных и трудоемких деталей. К таким деталям относятся и зубчатые колеса.

Такая ситуация характерна не только для России, но, по-видимому, и для всего мира. К примеру, фирма Gear Tec Company Horsburhand Scott (США) изготавливает прецизионные зубчатые колеса диаметром до 76 мм по заказам, как правило, не более 2...3 штук. Чтобы обеспечить срочное выполнение возможного заказа на зубчатые колеса, на предприятии имеется более 200 различных червячных фрез. Такая стратегия приводит к замораживанию средств и не гарантирует мобильности изготовления во всех случаях.

Альтернативным вариантом эффективного решения проблемы мобильности изготовления зубчатых колес и соединений различных типоразмеров с любой степенью сложности и точности является технологический процесс профильного глубинного шлифования. Этот процесс хорошо изучен [17, 53] и внедрен в производство турбинных лопаток, сложнофасонного режущего инструмента, деталей из титановых сплавов и др. Применительно к практике изготовления зубчатых колес профильное шлифование используется как метод чистовой обработки для окончательного точного и качественного профилирования зубчатых элементов [61].

От других методов зубошлифования профильное шлифование выгодно отличается простая кинематика рабочих движений, реализуемая в жесткой конструкции станков, высокая производительность процесса и возможность обработки зубчатых колес с неэвольвентным профилем и с закрытыми венцами, когда ограничен выход шлифовального круга из зоны резания.

Указанные преимущества ставят метод профильного шлифования в ряд наиболее перспективных процессов высокоточного и высокопроизводительного зубошлифования. К настоящему времени известными зарубежными станкостроительными фирмами освоен серийный выпуск широкой номенклатуры станков для профильного зубошлифования колес размерами 20...3000 мм до 3-й степени точности [61].

Однако возможности метода профильного шлифования и существующего оборудования для его внедрения в значительной степени нивелируются отсутствием эффективного режущего инструмента. По кинематической схеме профильного шлифования обработка производится в результате контактирования рабочей поверхности шлифовального круга с профилируемыми поверхностями впадины между соседними зубьями. В отличие от методов обката, когда контакт круга с про-

филом обрабатываемого зуба происходит по линии или локализуется в точке, при профильном шлифовании в работу резания вовлекается большое число абразивных зерен, что и обеспечивает высокую производительность процесса. Но, вместе с тем, пропорционально возрастает и работа трения, что приводит к интенсивному тепловыделению и появлению термических дефектов в виде прижогов и микротрещин на обработанных поверхностях зубьев.

Для профильного шлифования, чтобы гарантировать высокое качество обработанных поверхностей зубьев при высокой точности обработки зубчатых колес в целом, применяются шлифовальные круги двух типов. Специально для этого процесса фирмой Карр (Германия) были разработаны направляющиеся круги с точным однослойным покрытием из кубического нитрида бора на никелевой основе, которые обладают хорошими показателями по режущей способности и размерной стойкости. Стоимость их чрезвычайно высока, а каждый круг предназначен для обработки только конкретного типоразмера зубчатых колес аналогично формообразованию лезвийным инструментом [104, 119].

Для профильного шлифования применяются также и направляющиеся шлифовальные круги из электрокорунда на керамических связках. Но их режущая способность и размерная стойкость при используемой на профилешлифовальных станках циклической правке позволяют обеспечить требования точности и качества обработки только на мягких режимах чистового зубошлифования.

Известны также примеры формообразования зубьев профильным многопроходным шлифованием мелко модульных зубчатых колес с модулем менее 1 мм кругами обоих типов и профилирования крупномодульных колес направляющимися кругами из КНБ большим числом проходов с глубиной до 0,1...0,5 мм.

В заключение можно констатировать, что применяемая в настоящее время

технология формообразования зубчатых колес весьма трудоемка, требует большого станочного парка для реализации разнообразных технологических схем изготовления элементов зубчатого профиля и соответственно большого количества различного режущего инструмента. Она ориентирована, в основном, на крупносерийное и массовое производство зубчатых колес и чрезвычайно неэффективна при частой смене номенклатуры обрабатываемых изделий и их небольших объемах выпуска.

7.2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ПРОФИЛЬНОГО ГЛУБИННОГО ШЛИФОВАНИЯ ЗУБЧАТЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

По своей кинематике глубинное шлифование существенно отличается от традиционных способов шлифования и, в частности, от маятниковой схемы обработки. Большая толщина слоя материала — до 10 мм и более, удаляемая за один проход, в сочетании с малой скоростью заготовки — до 20...40 мм/мин, приводит к тому, что длина контакта круга с обрабатываемой заготовкой и длительность термодинамического воздействия оказываются на один-два порядка больше, чем при традиционных видах маятникового шлифования.

Рассмотрим предпосылки или предварительные оптимальные условия формообразования зубчатых элементов в зависимости от их характеристик методом глубинного шлифования. Указанные предпосылки должны учитывать специфику глубинного зубошлифования в отличие, например, от применяемого на практике и хорошо изученного, в том числе автором данной книги, процесса глубинного шлифования хвостовиков турбинных лопаток двигателей из жаропрочных никелевых сплавов.

Специфика профилирования зубчатых колес из закаленных легированных сталей глубинным шлифованием, обус-

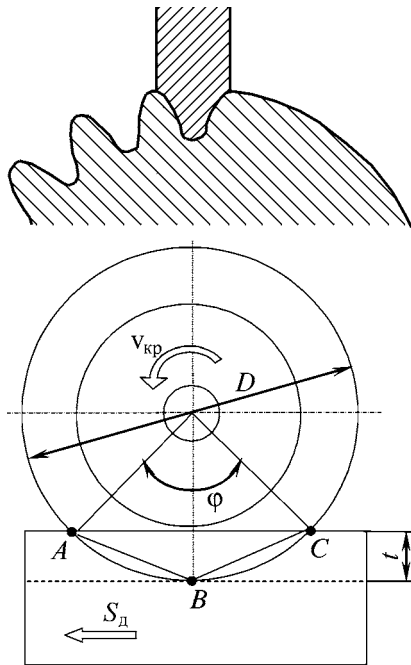


Рис. 7.1. Профильное глубинное шлифование зубчатого колеса

ленная точной формой и большими размерами зоны контактирования шлифовального круга с обрабатываемой поверхностью при повышенной ее чувствительности к термическим повреждениям, предполагает, как показывает анализ, безусловное выполнение следующих требований:

при шлифовании впадины между смежными зубьями за один проход должна обеспечиваться высокая производительность по съему материала, которая в 3...4 раза больше, чем, например, при глубинном шлифовании хвостовиков лопаток из никелевых сплавов;

предельно допустимая температура в зоне резания с учетом времени глубинного шлифования одной впадины должна быть почти в 1,5...2 раза меньше, чем при глубинном шлифовании соответственно жаропрочных никелевых и титановых сплавов;

необходимость сохранения исходного профиля шлифовального круга при обра-

ботке максимального и кратного количества впадин за период времени между его правками, так как в зубошлифовальных станках применяется только циклическая правка.

Таким образом, эффективная реализация процесса профильного глубинного шлифования возможна при обеспечении высокой производительности с минимально возможной сопутствующей температурой нагрева (не более 700 °С). Условия формообразования впадины между зубьями за один или несколько проходов шлифовального круга при этом определяются в основном ее площадью сечения и размерами поверхностей контактирования с инструментом.

При оптимизации параметров режима глубинного шлифования – скорости круга $v_{кр}$, скорости продольного перемещения детали или шлифовального круга S_d и глубины резания t – основной трудностью является решение проблемы однократного профилирования и наложения срезов при многопроходном профилировании зубчатых колес с большим значением модуля $m \geq 4$ мм.

На рис. 7.1 показана схема профильного глубинного шлифования зубчатого колеса, а на рис. 7.2 – схема формирования трапецидального профиля при обработке зубчатой рейки последовательным удалением материала за 3 прохода шлифовального круга.

Анализируя представленные схемы, можно выявить кинематические параметры процесса, необходимые для оптимизации профилирования впадины между смежными зубьями шлифовальным кругом. Самым важным параметром является площадь сечения впадины F_c , которая удаляется инструментом за один проход. От F_c зависит сопротивление резанию, которое пропорционально площади сечения срезаемого слоя и, соответственно, интенсивность термодинамической напряженности в зоне шлифования.

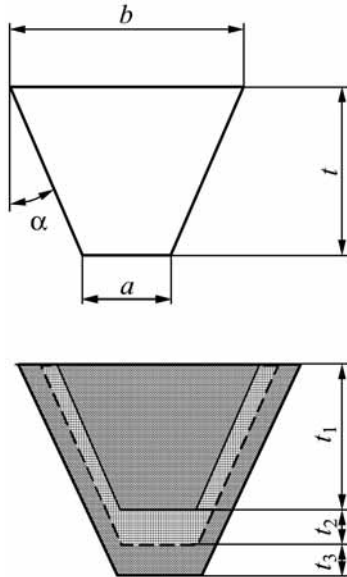


Рис. 7.2. Схема формирования трапецидального профиля последовательным удалением припуска

Кроме того, произведение определяет производительность процесса профилирования по скорости съема материала

$$W = F_c S_d. \quad (7.1)$$

Для прямозубой рейки без учета кривизны боковых поверхностей площадь сечения зуба (впадины) равна площади трапеции. Для зубчатых колес с модулем $m = 1 \dots 40$ мм ширина головки зуба $a = 0,5\pi m - 2mtg\alpha$, а площадь впадины между зубьями в зависимости от глубины внедрения t определяется формулой

$$F_c(t) = (1,57 - 2tg\alpha)mt + t^2tg\alpha, \quad (7.2)$$

а при угле профиля $\alpha = 20^\circ$:

$$F_c(t) = 0,842mt + 0,364t^2. \quad (7.3)$$

Для случая, когда впадины формируются за один проход шлифовального круга, т.е. при глубине прохода, равного высоте зуба $2,25m$, сечение F_c равно

$$F_c = 3,73m^2. \quad (7.4)$$

По (7.3) можно рассчитать площадь сечения впадины, профилируемой шлифовальным кругом на первом проходе. При необходимости назначения второго прохода инструмента площадь сечения впадины будет равна

$$F_c(t) = F_c(t_1 + t_2) - F_c(t_1). \quad (7.5)$$

В общем случае для i -го прохода площадь сечения профилируемой впадины определяется соотношением

$$F_c(t_i) = F_c\left(\sum_{i=1}^k t_i\right) - F_c\left(\sum_{i=1}^{k-1} t_{i-1}\right), \quad (7.6)$$

где суммарная глубина обработки не должна превышать высоты зуба, т.е. должно соблюдаться условие:

$$\sum_{i=1}^k t_i \leq 2,25m. \quad (7.7)$$

У зубчатых колес площадь сечения зуба зависит не только от модуля m , но и от числа зубьев z . В работе [66] приведена расчетная формула толщины зуба S_r на радиусе r , если известна толщина S_d , измеренная по дуге делительной окружности радиуса r_d с номинальным углом зацепления α_d :

$$S_r = 2r \left[\frac{S_d}{2r_d} + (tg\alpha_d - \alpha_d) - (tg\alpha_r - \alpha_r) \right], \quad (7.8)$$

где α_r – угол, определяемый координатой точки пересечения окружности радиуса r с боковой поверхностью зуба относительно линии центров (рис. 7.3).

Анализ формулы (7.8) показывает, что вклад угловой составляющей в расчетную толщину зуба S_r незначителен (в пределах 2...4 %) и в первом приближении им можно пренебречь. Тогда площадь сечения зуба (впадины) будет решением интеграла, пределы интегрирования которого будут определять либо площадь сечения всего зуба (впадины):

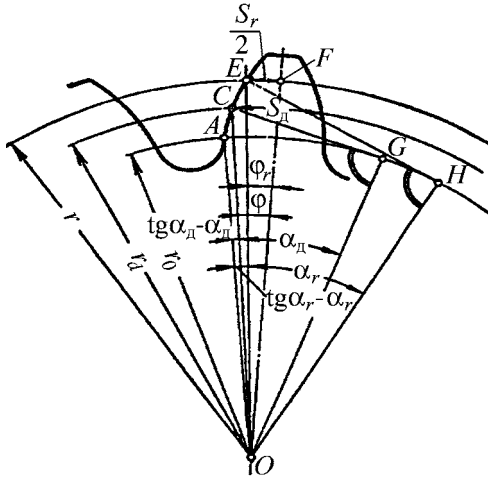


Рис. 7.3. Расчетная схема для определения площади сечения впадины

$$F_c = \frac{S_d}{r_d} \int_{r_b}^{r_n} r dr, \quad (7.9)$$

либо ее изменение в зависимости от глубины t внедрения шлифовального круга:

$$F_c(t) = \frac{S_d}{r_d} \int_{r_n-t}^{r_n} r dr. \quad (7.10)$$

В формулах (7.9) и (7.10) r_n – наружный радиус зубчатых колес (радиус выступов); r_b – его значение за вычетом высоты головки зуба (радиус впадин); а $(r_n - t)$ – переменная величина, которая учитывает текущее значение глубины прохода t .

В результате решения (7.8) и (7.9) получаем расчетные соотношения для площади сечения зуба (впадины) в зависимости от модуля и числа зубьев зубчатого колеса:

$$F_c = \frac{m^2}{2z} (2,25\pi z - 0,5625), \quad (7.11)$$

$$F_c(t) = \frac{t}{2z} [m(\pi z + 2) - t]. \quad (7.12)$$

При решении использованы стандартные значения для толщины зуба по

делительной окружности $S_d = 0,5\pi m$, радиуса делительной окружности $r_d = 0,5\pi m z$, радиуса окружности выступов $r_n = 0,5\pi m z + m$, радиуса окружности впадин $r_b = 0,5\pi m z - 1,25m$.

Сравнение формул (7.4) и (7.11) для расчета сечения впадины, формируемой за один проход при $t = 2,25m$ соответственно для прямозубой рейки и зубчатого колеса с эвольвентным профилем показывают, что сечение F_c растет с увеличением числа зубьев z . Степень этого влияния незначительна: при неограниченно большом числе зубьев уменьшение F_c по (7.11) составляет всего 5,7 %. Такая небольшая разница дает возможность анализировать процесс формообразования зубчатых колес в первом приближении без учета числа зубьев на примере профильного глубинного шлифования прямозубой рейки.

Точное решение для расчета площади сечения в зависимости от текущего значения глубины t и связанного с ним угла α_r имеет следующий вид:

$$F_c = \frac{t}{2} \left[\frac{1}{z} + (\operatorname{tg} \alpha_d - \alpha_d) - (\operatorname{tg} \alpha_r - \alpha_r) \right] \times \\ \times [m(\pi z + 2) - t]. \quad (7.13)$$

На примере профилирования прямозубой рейки можно видеть характер изменения площади сечения F_c в зависимости от модуля m и глубины t первого прохода (рис. 7.4).

При глубине шлифования, равной $t = 2,25m$, т.е. при формообразовании впадины между смежными зубьями за один проход, площадь сечения F_c при увеличении модуля от 2 до 8 мм возрастает с 14,95 до 229,4 мм² или в 15,3 раза. Соответственно увеличивается сопротивление резанию, что необходимо учитывать при оценке возможности профилирования зубчатых колес с большими модулями за один проход.

При глубинном шлифовании для первого прохода шлифовального круга целесообразно назначать глубину обра-

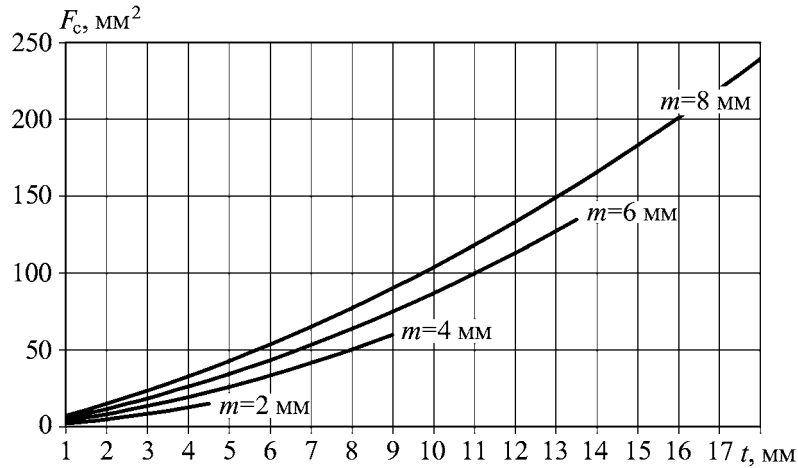


Рис. 7.4. Изменение площади сечения среза F_c в зависимости от величины модуля m и глубины шлифования t зубчатого колеса

ботки, обеспечивающую окончательное профилирование зубьев, либо с учетом оставляемого припуска на чистовое шлифование после термической или химикотермической обработки. Однако такой вариант в значительной степени обусловлен техническими возможностями станка и инструмента, а также ограничениями по термодинамическим условиям собственно процесса бездефектного формообразования.

В свою очередь, необходимая мощность формообразования, как и термодинамические условия качественной бесприжоговой обработки, зависят не только от составляющей, обусловленной сечением удаляемого среза F_c , но и работой трения, вклад которой при шлифовании в общие энергетические затраты является весьма ощутимым.

Работа трения пропорциональна площади контакта F_k шлифовального круга с обрабатываемой поверхностью, которая для глубинного шлифования зубчатого колеса определяется из схемы, изображенной на рис. 7.1.

Суммарная площадь контакта складывается из площади трения по дну впадины шириной a с длиной контакта l_k ,

равной дуге контакта AB , и двух боковых наклонных поверхностей, размеры которых зависят от соотношения ширины зубчатого венца B и длины хорды AC .

Для случаев, когда $B < AC$ при условии $t \leq \frac{B^2}{4D}$, площадь трения рассчитывается по формуле

$$F_k = al_k + \frac{Bt}{\cos \alpha} = 0,842m\sqrt{Dt} + 1,06Bt. \quad (7.14)$$

Формула (7.14) определяет не максимальную площадь трения шлифовального круга с обрабатываемой поверхностью зубчатого профиля, а площадь F_k , которая соответствует условиям максимального съема материала, т.е. моменту резания, когда площадь сечения среза F_c достигает своего максимального значения.

Для случаев, когда $B \geq AC$, т.е. для наиболее напряженных термодинамических условий шлифования, расчетная модель F_k имеет вид

$$F_k(t) = al_k + \frac{2t}{\cos \alpha} \sqrt{Dt - t^2}. \quad (7.15)$$

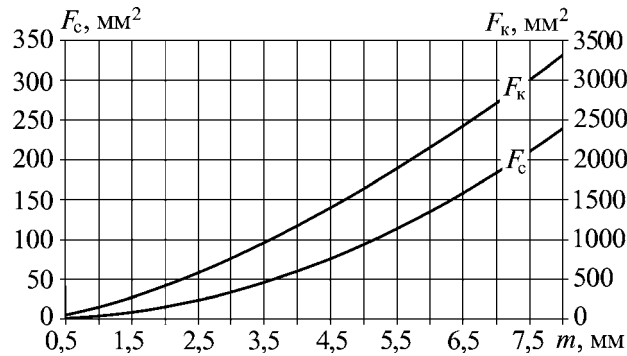


Рис. 7.5. Сравнение расчетных значений площадей сечения среза F_c и контакта F_k при шлифовании зубчатых колес с различным модулем

Если исключить из подкоренного выражения t^2 ввиду его малости относительно Dt , то можно представить площадь контакта как

$$F_k(t) = \sqrt{Dt}(0,842m + 2,13t), \quad (7.16)$$

а для предельного случая однократного профилирования впадины в виде

$$F_k = 8,45m\sqrt{mD}. \quad (7.17)$$

На рис. 7.5 показано изменение площади сечения впадины F_c и площади контакта F_k шлифовального круга диаметром $D = 300$ мм с обрабатываемой поверхностью в зависимости от модуля m зубчатой рейки, в соответствии с формулами (7.4) и (7.17) при $t = 2,25m$.

Обращает внимание, что расчетная величина F_k существенно превышает площадь сечения F_c : при $m = 0,5$ мм значение F_k больше, чем F_c в 55,4 раза, а при $m = 8$ мм это превышение сохраняется большим, но снижается до 13,8 раз.

Экспериментальные исследования, проведенные при профилировании зубчатого колеса из стали 16ХЗНВФМБ-Ш с объемной закалкой на твердость 29... 32 HRC на профишлифовальном станке мод. P400G фирмы Gleason-Pfauter показали, что степень влияния кинематических характеристик взаимодействия шли-

фовального круга с обрабатываемой впадиной F_c и F_k на потребляемую мощность различно. Профильное глубинное шлифование производилось высокопористым кругом с размерами $300 \times 20 \times 127$ и с характеристикой 25A 16П ВМ2 14 К. Впадина с модулем $m = 3$ мм и $z = 35$ на заготовках с размерами $100 \times 60 \times 60$ профилировалась при постоянной скорости перемещения детали от 50 до 800 мм/мин и глубины прохода от 0,75 до 6 мм. Соответствующие значения F_c и F_k рассчитывались по формулам (7.3) и (7.16).

Корреляционным анализом взаимосвязи входных параметров S_d , F_c и F_k и их влияния на мощность шлифования N установлено, что параметры S_d и F_c тесно связаны между собой (коэффициент парной корреляции между ними равен $-0,920$). Это подтверждает очевидный факт, что оптимальное назначение скорости перемещения детали должно быть привязано к площади удаляемого сечения впадины обрабатываемого зубчатого колеса.

По степени влияния на мощность формообразования зубчатого колеса, которая оценивалась коэффициентом парной корреляции, исследованные входные параметры ранжируются в следующей последовательности: S_d (0,288), F_k (0,659), F_c ($-0,020$). Таким образом, из корреляци-

7.1. Корреляционная матрица управляемых параметров глубинного шлифования

Параметры шлифования	$v_{кр}$	S_d	F_c	F_k
$v_{кр}$	1	0,242	0,617	0,268
S_d	-0,242	1	-0,838	-0,302
F_c	0,617	-0,838	1	0,366
F_k	0,268	-0,302	0,366	1

онного анализа следует, что площадь контакта шлифовального круга с обрабатываемой поверхностью впадины оказывает более сильное влияние на мощность шлифования, чем площадь сечения впадины, удаляемой при обработке.

Важным фактором влияния на мощность шлифования является скорость шлифования. В условиях эксперимента, которые были описаны выше, было проведено исследование влияние скорости круга, изменяющейся от 35 до 60 м/с, на мощность профильного глубинного шлифования при постоянной глубине прохода $t = 6$ мм, и переменной скорости перемещения детали S_d . По соотношению $\frac{N}{v_{кр}}$

рассчитывалась тангенциальная составляющая P_z силы резания.

Как и ожидалось, мощность глубинного шлифования с увеличением скорости круга $v_{кр}$ и скорости подачи детали S_d возрастает, а сопротивление резанию — уменьшается.

Наиболее простое объяснение наблюдаемой картины заключается в том, что увеличение скорости подачи детали способствует повышению сопротивления резанию, а увеличение скорости вращения шлифовального круга — пропорциональному повышению работы трения и, соответственно, интенсивности теплообразования.

В действительности природа этого факта более сложная, что подтверждает анализ корреляционной матрицы взаимо-

связи исследованных управляемых параметров шлифования (табл. 7.1).

Наиболее тесно связаны между собой скорость подачи S_d и площадь сечения F_c (коэффициент парной корреляции равен -0,838), а также скорость шлифования $v_{кр}$ и F_c (0,617). Слабо коррелированы между собой другие кинематические и режимные параметры процесса, что свидетельствует об их статистической независимости.

Таким образом, можно говорить об определяющем влиянии параметра F_c на назначение скоростей рабочих движений профильного глубинного шлифования зубчатых колес. В свою очередь F_c является функцией глубины резания, модуля и числа зубьев обрабатываемого колеса.

Стабильность термодинамического воздействия на обрабатываемое зубчатое колесо, обусловленное условиями диспергирования при интенсивном трении, оказывает, как показали результаты исследования, решающее влияние на качество и точность профилируемых зубьев.

Из анализа этих экспериментальных данных следует важный в практическом отношении вывод: чтобы стабилизировать термодинамическое воздействие обработки на зубчатое колесо, необходимо стабилизировать какой-либо управляемый входной параметр процесса формообразования. Таким параметром может быть величина удаляемого сечения впадины F_c , которая регламентируется глубиной прохода t .

7.2. Расчетные значения глубины шлифования в зависимости от числа проходов

Число проходов	Глубина шлифования на проходе					
	1	2	3	4	5	6
1	2,25 <i>m</i>					
2	1,381 <i>m</i>	0,869 <i>m</i>				
3	1,025 <i>m</i>	0,679 <i>m</i>	0,546 <i>m</i>			
4	0,819 <i>m</i>	0,569 <i>m</i>	0,461 <i>m</i>	0,401 <i>m</i>		
5	0,685 <i>m</i>	0,492 <i>m</i>	0,405 <i>m</i>	0,352 <i>m</i>	0,316 <i>m</i>	
6	0,589 <i>m</i>	0,436 <i>m</i>	0,362 <i>m</i>	0,317 <i>m</i>	0,284 <i>m</i>	0,262 <i>m</i>

В этой связи, если невозможно формообразование впадины за один проход шлифовального круга, то задачей оптимизации профильного глубинного шлифования становится выбор числа проходов и назначение глубины каждого прохода таким образом, чтобы сечение F_c каждого i -го прохода сохранялось постоянным по уравнению (7.6): $F_c(t) = \text{const}$.

Эта задача, основанная на решении уравнения (7.6) при нелинейном характере связи площади сечения и глубины прохода (7.3), не имеет явного численного решения, так как количество неизвестных значений глубины t_i пропорционально числу оптимизируемых проходов.

Численное решение уравнения (7.6) получено на основе декомпозиции задачи оптимизации многопроходного шлифования на два этапа: назначение числа проходов 1, 2, 3, ..., n и выбор оптимальной глубины каждого отдельного прохода. Универсальное решение, которое получено методом итераций, предполагает распределение глубины впадины между соседними зубьями на каждом проходе шлифовального круга в зависимости от модуля зубчатого колеса.

В табл. 7.2 приведена разбивка глубины впадины, равной 2,25*m*, по каждому

переходу от одно- до шестипроходного профильного глубинного шлифования зубчатого колеса.

Оптимизация многопроходного шлифования с помощью данных табл. 7.2 предусматривает только стабильность кинематического параметра F_c , не учитывая при этом влияния параметра F_k . Учесть дополнительно и его влияние на выбор глубины шлифования не представляется возможным вследствие его аддитивности. Если величиной F_c можно управлять, варьируя глубиной шлифования на каждом проходе, то величина F_k постоянно только увеличивается с каждым последующим проходом шлифовального круга.

Однако, как показывают расчеты, при возмущающем воздействии F_k на потребляемую мощность профилирования тенденция на стабилизацию процесса при постоянной величине F_c сохраняется. Например, для трехпроходного шлифования зубчатого колеса с $m = 3$ мм при постоянном расчетном значении $F_c = 11,21 \text{ мм}^2$ величина F_k , равная 141,42 мм² на первом проходе, достигает значения 209,52 мм² или увеличивается на 48 %. Мощность процесса при $S_d = 200$ мм/мин при этом возрастает с 2,49 до 2,79 кВт или всего на 12 %.

Предложенная методология оптимизации многопроходного глубинного шлифования дает альтернативную возможность профилирования зубчатого колеса с достаточно высокой производительностью для условий, когда это невозможно по различным причинам сделать за один проход шлифовального круга.

В качестве примера можно проиллюстрировать различные условия профильного глубинного шлифования зубчатого колеса с $m = 10$ мм. При удалении припуска за один проход расчетная мощность обработки составляет 13,67 кВт при подаче $S_d = 19,3$ мм/мин. Для аналогичной производительности по съему материала $W = 120$ мм³/с, оптимальной для глубинного шлифования закаленной стали 16ХЗНВФМБ-Ш разбивка припуска на 6 проходов позволяет вести обработку с $S_d = 115,8$ мм³/мин при потребляемой мощности 7,09 кВт или почти в 2 раза меньше. При этом основное время формирования профиля сохраняется одинаковым.

Количество проходов определяется прежде всего в соответствии с техническими возможностями оборудования и инструмента, жесткостью системы резания, условиями охлаждения и т.д. Эффективность процесса профилирования будет тем выше, чем меньше число проходов будет использовано.

Необходимо также учитывать еще одну рекомендацию для случая, когда требуется оставить припуск (обычно 0,07...0,15 мм) для чистового шлифования после химико-термической обработки. Целесообразно припуск на чистовое шлифование равномерно распределить по всем проходам, соответственно, уменьшив их глубину. Такой подход к разбивке припуска обеспечит лучшую стабилизацию процесса профилирования, чем при варианте, когда соответствующим образом уменьшается глубина только последнего прохода.

В заключение можно отметить, что на основе проведенного теоретического

анализа и предварительных экспериментальных исследований установлена принципиальная возможность реализации процесса формообразования зубчатых колес методом профильного глубинного шлифования. Разработана методология оптимизации профилирования за один или несколько проходов шлифовального круга в зависимости от характеристики зубчатого колеса и технологических условий его обработки.

Важно также подчеркнуть, что принципиальным отличием нового процесса формообразования зубчатых колес от известных аналогов профильного глубинного шлифования является обеспечение более высокой производительности по съему материала при более низком нагреве обрабатываемой поверхности, чтобы предотвратить появление на ней дефектов шлифовочного характера.

Кинематическая схема формообразования впадины предполагает повышенную термодинамическую напряженность процесса с интенсивным тепловыделением. Необходимость получения точного профиля с минимальной накопленной погрешностью по шагу обрабатываемых колес при циклической правке шлифовального круга предъявляет жесткие требования к его износостойкости и равномерности изнашивания за период стойкости. При таких требованиях целесообразно применять инструмент повышенной твердости, что становится дополнительным фактором, интенсифицирующим тепловыделение.

В этой связи к абразивному инструменту для профильного глубинного шлифования зубчатых колес предъявляются особые требования, которые заключаются в оптимальном сочетании необходимых значений его прочности и износостойкости вместе с очень высокими режущими свойствами, чтобы минимизировать термодинамическую напряженность процесса обработки.

При профильном глубинном шлифовании, чтобы избежать перегрева заготов-

7.3. Расчетные характеристики профилирования впадины зубчатого колеса

№ п/п	Исходные параметры			Расчетные характеристики	
	t , мм	F_k , мм	N , кВт	Распределение составляющих работы шлифования	
				A_p	$A_{тр}$
1	3,07	141,41	2,49	0,750	0,250
2	2,04	182,33	2,68	0,678	0,322
3	1,64	209,52	2,79	0,630	0,370

ки, обычно используют весьма мягкие (BM1...BM2) круги при обильном охлаждении зоны резания. Для обеспечения высокой точности формируемого профиля инструмент подвергается принудительной непрерывной правке специальными профильными алмазными роликами.

В нашем случае при использовании циклической правки возможно применение инструмента только более высокой твердости, который должен легко и быстро заправляться на требуемый профиль впадины обрабатываемого зубчатого колеса.

Преимущество легкой и быстрой правки абразивных кругов на керамической связке на любой профиль в сочетании с малым количеством правок за период эксплуатации инструмента становятся дополнительным фактором снижения себестоимости шлифования и принципиальной возможности эффективно реализовать процесс профильного глубинного шлифования зубчатых колес и соединений.

Негативная особенность профильного зубошлифования заключается в том, что высокая производительность по съему материала за счет участия в работе резания большого количества абразивных зерен одновременно, по этой же причине, сопровождается интенсивным теплообразованием. Его источниками являются

процессы диспергирования удаляемого металла в стружку и трения периферии и боковых поверхностей шлифовального круга с профилируемой впадиной обрабатываемого зубчатого колеса.

Анализ этих процессов во взаимосвязи с площадями сечения удаляемого материала F_c и контакта инструмента с обрабатываемым профилем F_k рассмотрен выше.

Расчетным моделированием, основываясь на результатах этого анализа, можно установить соотношение между работой резания по съему материала A_p и работой трения $A_{тр}$ для условий профильного глубинного шлифования зубчатых колес. В табл. 7.3 приведены расчетные характеристики профилирования впадины зубчатого колеса с $m = 3$ мм и с шириной зубчатого венца 60 мм из закаленной стали 16ХЗНВФМБ-Ш при скорости круга 35 м/с и подаче стола 200 мм/мин за 3 прохода с разбивкой глубины резания в соответствии с рекомендациями табл. 7.2.

На каждом проходе площадь F_c сохраняется одинаковой и равной 11,21 мм², а значение F_k увеличивается в 1,29 и 1,48 раз соответствующим возрастанием потребляемой мощности шлифования в 1,08 и 1,12 раз.

Из этого примера следует, что при профильном глубинном шлифовании процесс протекает в критических условиях,

сохраняя высокой вероятностью термических повреждений поверхностных слоев зубьев как при больших глубинах резания, так и при малых глубинах чистового шлифования.

В первом случае интенсивное теплообразование является следствием, прежде всего, высокого сопротивления резанию (составляющая работы A_p), а во втором случае возрастает удельный вес трения с 25 до 37 % и более в общем энергетическом балансе.

В этой связи, чтобы предотвратить появление дефектов шлифовочного характера, режущий инструмент должен одновременно иметь повышенную прочность до 25...45 Н/мм², чтобы преодолевать сопротивление обрабатываемого материала, высокую износостойкость для условий его циклической правки и обеспечивать минимальную работу трения с профилируемой впадиной при высоком качестве обработанной поверхности. Такой набор свойств достигается сбалансированным соотношением зернистости, твердости, структуры и марки керамической связки шлифовального круга. Марка абразива определяется обрабатываемым материалом, при обработке стали – корунд и его различные модификации, при обработке титановых сплавов – разновидности карбида кремния.

Для проведения исследований, производственных испытаний и внедрения новых технологий шлифования зубчатых колес были разработаны и изготовлены высокопористые шлифовальные круги более 40 различных характеристик из электрокорунда (белого, хромтитанистого и из его поликристаллической модификации SG) и карбида кремния зеленого и черного. Свойства инструмента с рабочей скоростью до 80 м/с изменялись в диапазоне: по зернистости от 12 до 25, по твердости от BM1 до CM2, по структуре от 10 до 20.

Типоразмеры изготовленных шлифовальных кругов: прямого профиля с диаметром от 60 до 400 мм с высотой от 10

до 104 мм, чашечного и кольцевого профиля с наружным диаметром от 150 до 310 мм и высотой до 112 мм были ориентированы для применения на отечественных и зарубежных зубошлифовальных станках для обработки методами профилирования, обката с периодическим или непрерывным делением.

7.3. ФОРМООБРАЗОВАНИЕ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС И ШЛИЦЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ МЕТОДОМ ПРОФИЛЬНОГО ГЛУБИННОГО ШЛИФОВАНИЯ

В данном разделе обосновывается принципиальная возможность применения процесса формообразования зубчатых колес методом глубинного профильного шлифования высокопористым абразивным инструментом.

Исследования и производственные испытания были направлены на решение следующих задач:

- установление возможного диапазона характеристик шлифовальных кругов и высокопроизводительных режимов и схем обработки, обеспечивающих получение требований по точности и качеству зубчатых колес и шлицевых соединений;
- изготовление зубчатых колес и шлицевых соединений методом профильного глубинного шлифования.

Профильное глубинное шлифование прямозубой рейки. На предварительном этапе устанавливались рациональные технологические условия формообразования зубчатого профиля трапецеидальной формы с углом при вершине 30° на плоских образцах из стали 16ХЗНВФМБ-Ш (ДИЗ9), термообработанной до 39,5...40 HRC, размером 150×25×50 мм.

Для проведения испытаний были изготовлены высокопористые шлифовальные круги типоразмера 1 200×20×76 из электрокорунда марок 25А и 92А на керамической связке с различными характеристиками: твердостью BM1...МЗ, номером структуры 12...20, составом и комби-

нациями порообразующих наполнителей, а также размером абразивного зерна (120...160 мкм).

Обработка зубчатой рейки проводилась на станке с ЧПУ мод. "Profimat 412" фирмы Blohm. Образцы устанавливались на поворотном столе станка в тисках, либо на опорах с креплением прихватами. При обработке зубчатой рейки на различных схемах шлифования полная высота впадин составляла 2...10 мм, что соответствует модулям зубчатых колес до 4,5 мм. Формирование профилей на длине 25 мм проходило за 1–5 проходов с глубиной шлифования 0,5...10 мм за проход и скоростью подачи стола от 20 до 150 мм/мин (см. рис. 7.2). Обработка проводилась на скоростях шлифования 20, 25, 30, 35 и 37 м/с.

Указанный диапазон режимов обработки был ограничен техническими возможностями станка и жесткостью технологической системы резания и обеспечивал как бесприжоговое шлифование, так и обработку с явно выраженными следами прижогов на обработанных поверхностях, т.е. в критических условиях шлифования.

Профилирование и правка шлифовального круга осуществлялась по программе поочередно двумя обтачивающими алмазными роликами. Скорость правки 20,5 м/с, скорость подачи при правке 25 мм/мин. Правка периодическая, величина правки за цикл изменялась от 0,01 до 0,02 мм.

Подвод охлаждения в зону резания, в зависимости от схемы шлифования, был принят односторонним сверху, либо двусторонним со стороны входа и выхода шлифовального круга. В качестве СОТС использовался водный раствор концентрата марки "Рондогринд К1".

Время полного профилирования одной впадины на длину 25 мм в зависимости от схемы шлифования, выбранной комбинации глубина шлифования–скорость подачи стола и числа проходов составляло в испытаниях от 1,75 до 5,93 мин, что соизмеримо со временем зубофрезерования

профиля впадины аналогичного размера.

В процессе обработки при помощи встроенного ваттметра измерялась нагрузка на приводе главного движения, выраженная в % от мощности привода. Этот показатель был принят в качестве критерия оценки динамики процесса глубинного шлифования, отражающего влияние условий обработки (характеристика высокопористого круга, режимы шлифования) на качество поверхностного слоя, в частности, появление прижогов и дробления на обработанной поверхности.

В процессе испытаний исследовались различные схемы шлифования применительно к станку мод. "Profimat 412": вертикальная, горизонтальная, встречная, попутная и схема "на глубинное врезание". Каждая из исследованных схем имела свои преимущества и недостатки, обусловленные кинематикой и динамикой стружкообразования, условиями подвода СОТС в зону обработки и соответственно условиями охлаждения заготовки и жесткостью системы резания. Например, при вертикальной схеме обработки наиболее благоприятными могут оказаться условия охлаждения и подхода шлифовального круга к обрабатываемой заготовке, однако консольное ее закрепление может привести к снижению жесткости системы резания, в отличие, например, от горизонтальной схемы профильного глубинного шлифования.

Однозначный вывод о целесообразности применения той или иной схемы глубинного шлифования в конкретных условиях, как показали исследования, можно будет сделать только в зависимости от конструктивных особенностей станка, условий подвода охлаждения, модуля, числа зубьев обрабатываемых зубчатых колес и интенсивности режимов шлифования.

Определены также допустимые значения потребляемой мощности при различных условиях глубинного шлифования, которые обеспечивают максималь-

ную производительность процесса, повышенную точность профиля и отсутствие прижогов для исследованных условий обработки. По результатам проведенных исследований при помощи регрессионного анализа построены математические модели, отражающие влияние условий глубинного шлифования на динамику процесса.

Основными характеристиками шлифовальных кругов, используемыми при моделировании, являлись: зернистость круга, определяемая размером абразивного зерна, твердость, которая определяется глубиной лунки (h_d , мм), полученной на пескоструйном аппарате для определенной степени твердости, структура круга (номер структуры), определяемая процентным содержанием абразивного зерна в объеме шлифовального круга.

На рис. 7.6 представлена графическая зависимость мощности при глубинном шлифовании прямозубой рейки по горизонтальной встречной схеме от характеристик высокопористых шлифовальных кругов при постоянном режиме обработки: $v_{кр} = 30$ м/с, $S_d = 30$ мм/мин, $t = 6$ мм.

Установлено, что при обработке на одинаковых режимах с увеличением номера структуры круга потребляемая мощность уменьшается, а с увеличением его твердости, наоборот, возрастает. При сравнении различных характеристик высокопористого инструмента в одинаковых условиях шлифования критерием эффективности, помимо бесприжоговой обработки, являлась его износостойкость, т.е. сохранение точности профиля зуба рейки на входе и выходе. Различное сочетание структуры и твердости круга дает возможность шлифования в одинаковых условиях с различными результатами по размерной стойкости инструмента. Так, применение более мягких кругов при невысокой структуре, позволяет избежать появления различных шлифовочных дефектов на обрабатываемой поверхности, однако, как показали исследования, при

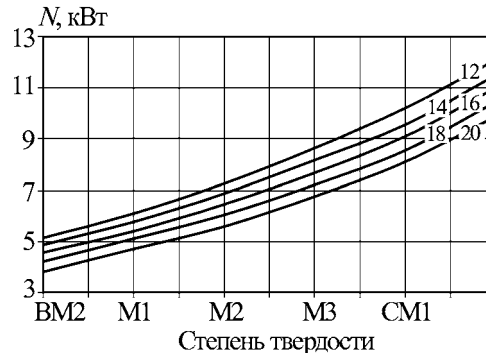


Рис. 7.6. Зависимость мощности профильного глубинного шлифования прямозубой рейки от твердости и номера структуры круга

обработке такими кругами необходимо осуществлять их постоянное профилирование и правку для обеспечения требуемой геометрии профиля. Увеличение номера структуры позволяет повысить твердость круга, а следовательно, и его стойкость, что дает возможность использования циклической правки.

С увеличением скорости резания мощность профилирования впадины N пропорционально возрастает, а тангенциальная составляющая силы P_z , напротив, уменьшается. В исследованном диапазоне скоростей 20...37 м/с это уменьшение составило до 60 %, что свидетельствует о снижении сопротивления резанию при повышении скорости шлифования.

На рис. 7.7 показано изменение потребляемой мощности N и составляющей P_z силы резания от скорости шлифования кругом с характеристикой 25A 16П BM2 14 K при постоянной $S_d = 40$ мм/мин и от скорости подачи детали при постоянной $v_{кр} = 30$ м/с. Приведенные зависимости носят универсальный характер, так как экспериментально установленные связи N и P_z с $v_{кр}$ и S_d привязаны также к площади сечения обрабатываемой впадины F_c . Ее значение наиболее сильно влияет на мощность и силу резания (коэффициент парной корреляции равен 0,868). Меньше влияет скорость круга (0,210 и 0,318

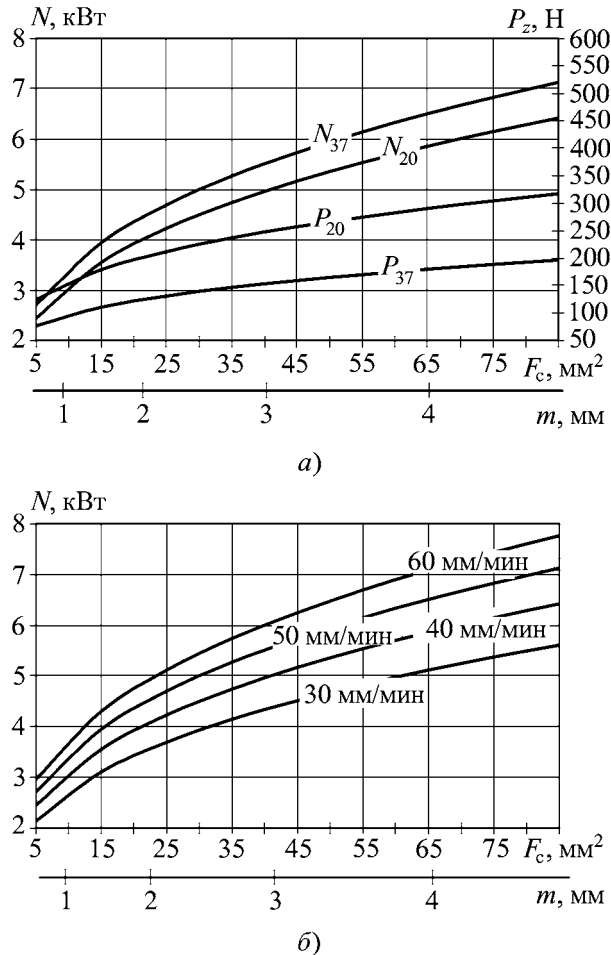


Рис. 7.7. Зависимость мощности профильного глубинного шлифования прямозубой рейки и составляющей силы резания от площади сечения впадины зуба (модуля), скорости резания (а) и подачи детали (б) со скоростью резания 20 и 37 м/с

соответственно) и скорость подачи детали (0,163).

Разработанные регрессионные модели в виде логарифмических полиномов:

$$\ln N = 0,341 \ln F_c + 0,470 \ln S_d + 0,170 \ln v_{кр} - 1,899, \quad (7.18)$$

$$\ln P_z = 4,874 + 0,330 \ln F_c + 0,476 \ln S_d - 0,780 \ln v_{кр} \quad (7.19)$$

дают возможность оценить значения N и

P_z при оптимизации параметров режима профильного глубинного шлифования зубчатых колес в зависимости от их модуля m (7.3).

Из корреляционного анализа экспериментальных данных следует, что назначение параметров режима шлифования S_d и $v_{кр}$ должно быть увязано с площадью сечения удаляемого материала F_c , так как они очень тесно коррелированы между собой (для площади F_c , например, коэффициенты парной корреляции с S_d и $v_{кр}$ равны 0,562 и 0,779 соответственно).

Более точные статистические модели в виде нелинейных логарифмических полиномов:

$$\ln N = 9,786 \ln S_d - 2,520 \ln F_c + 7,948 \ln v_{кр} + 0,870 \ln F_c \ln v_{кр} - 2,799 \ln S_d \ln v_{кр} - 28,0, \quad (7.20)$$

$$\ln P_z = 9,161 \ln S_d - 3,023 \ln F_c + 5,802 \ln v_{кр} + 1,038 \ln F_c \ln v_{кр} - 2,626 \ln S_d \ln v_{кр} - 17,24 \quad (7.21)$$

учитывают взаимосвязанный характер влияния параметров режима шлифования на его мощность и силу резания.

Таким образом установлена принципиальная возможность формообразования зубчатого профиля на заготовках из улучшенной легированной стали методом профильного глубинного шлифования взамен зубофрезерования. Лучшие результаты по потребляемой мощности, износостойкости и качеству обработки показали высокопористые круги с характеристиками 25А 12П М2 12 К5 и 25А 16П М2 12 К5. Назначение режимов шлифования зависит от выбранной скорости обработки, числа проходов и характеристики шлифовального круга. Шероховатость обработанной поверхности в испытанном диапазоне условий шлифования составила $Ra = 0,28 \dots 0,63$ мкм, которая зависит от характеристики инструмента и режимов обработки. Поверхностный слой профиля зубчатой рейки после обработки при оптимальных условиях профильного глубинного шлифования не претерпевает структурно-фазовых изменений. Применение профильного глубинного шлифования позволяет совместить операции предварительного формообразования и финишной обработки профиля зуба.

Изготовление зубчатых колес методом профильного глубинного шлифования. Профилирование зубчатых колес с $m = 3$ мм и $z = 35$ проводилось на заготовках размером $110 \times 60 \times 60$ из стали 16ХЗНВФМБ-Ш с объемной закалкой на



Рис. 7.8. Профилирование зубчатого колеса на станке мод. Р400G

твердость 29...32 HRC. Были изготовлены для испытаний 2 высокопористых шлифовальных круга типоразмера $1\ 300 \times 20 \times 127$ с характеристиками: 25А 16П ВМ2 14 К и 25А 16П М1 12 К. Круги были изготовлены и протестированы на рабочую скорость шлифования 60 м/с.

Испытания проводились на профильношлифовальном станке с ЧПУ мод. Р400G фирмы Gleason-Pfauter (рис. 7.8) с правкой шлифовального круга на эвольвентный профиль $m = 3$ мм алмазными обкатывающими правящими роликами $\varnothing 150$ мм с вставками PCD с $R = 0,5$ мм, производства фирмы Dr. Kaiser Diamantwerkzeuge. Шлифование производилось с обильным охлаждением масляной эмульсией.

Режимы шлифования:

- скорость круга $v_{кр} = 30 \dots 60$ м/с;
- скорость вертикального перемещения круга $S_{кр} = 50 \dots 2000$ мм/мин;
- глубина шлифования за 1 проход $t = 0,1 \dots 0,6$ мм.

Испытывались варианты обработки по попутной и встречной схемам шлифования. Оценка эффективности процесса производилась по фактической мощности шлифования (в % от мощности главного привода, равной 15 кВт), погрешностям профиля и направления зуба, степени

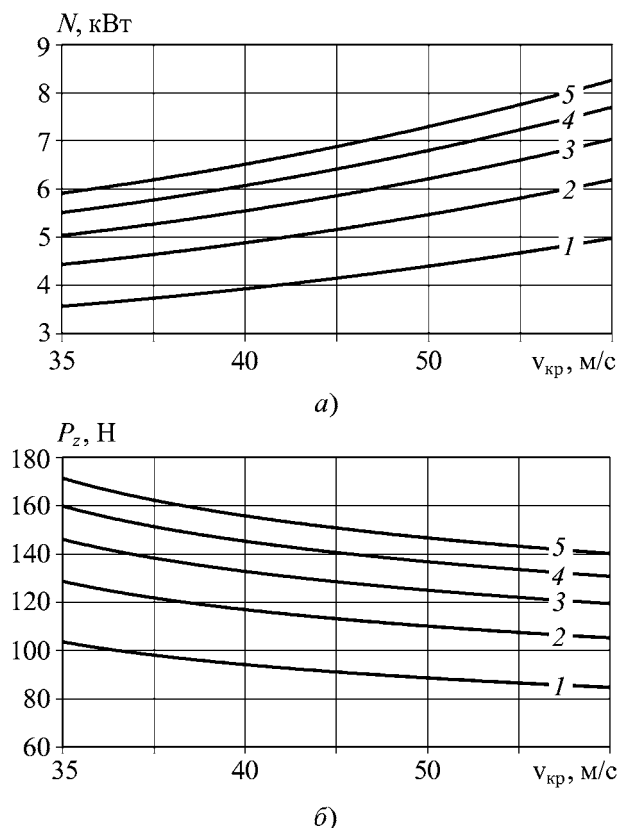


Рис. 7.9. Влияние скорости шлифования на мощность (а) и силу резания (б) при профилировании зубчатого колеса с $m = 3$ мм, $t = 6$ мм на различных скоростях подачи детали:

1 – 50 мм/мин; 2 – 100 мм/мин; 3 – 150 мм/мин; 4 – 200 мм/мин; 5 – 250 мм/мин

точности, шероховатости обработанной поверхности на различных участках профиля и радиуса впадины после обработки.

Сравнительные испытания высокопористых кругов двух характеристик на одинаковом режиме глубинного шлифования: $v_{кр} = 35$ м/с, $S_{кр} = 200$ мм/мин и $t = 6$ мм, показали, что круги с характеристиками 25А 16П ВМ2 14 К и 25А 16П М1 12 К на исследованном режиме обработки обеспечили формирование профиля $m = 3$ мм с погрешностями эвольвентного профиля до 4 мкм и направления зуба до 2,7 мкм.

При шлифовании кругом 25А 16П М1 12 К мощность процесса бы-

ла только на 4 % больше, чем при обработке кругом 25А 16П ВМ2 14 К, что объясняется его более высокой твердостью (соответственно М1 и ВМ2) и более низкой структурой (соответственно 12 и 14).

Основные испытания и окончательная обработка двух зубчатых колес проводились в дальнейшем высокопористым шлифовальным кругом с характеристикой 25А 16П ВМ2 14 К.

При испытаниях, помимо оценки эффективности назначения параметров режима профильного глубинного шлифования, оценивались также целесообразность повышения скорости глубинного шлифования от 35 до 60 м/с и выбор оп-

тимального цикла обработка–правка круга для различных условий шлифования.

Установлено, что при скорости круга 35 м/с и глубине шлифования 6 мм обеспечивается точное профилирование при скорости вертикального перемещения круга от 50 до 200 мм/мин (скорость съема металла увеличивается от 5 до 20 мм³/(мм·с)) с возрастанием мощности процесса от 3,75 до 4,7 кВт или на 25 %. На предельной скорости перемещения круга, равной 200 мм/мин, возможен цикл обработки с правкой инструмента после шлифования 2 впадин: в этом случае сохраняется точность профилирования, а мощность процесса при бесприжоговом шлифовании 2-й впадины кругом без правки возрастает только на 17 %.

При увеличении скорости круга от 30 до 60 м/с было установлено, что при высоких скоростях шлифования существенно возрастают мощность процесса и вероятность появления прижогов на обработанной поверхности.

При скорости шлифования 50 м/с, скорости перемещения круга 200 м/мин и глубине 6 мм, мощность увеличилась с 4,7 (при $v_{кр} = 35$ м/с) до 5,3 кВт, а при шлифовании 2-й впадины на обработанной поверхности появились сильные прижоги.

Мощность профилирования N впадины увеличивается пропорционально скорости круга (рис. 7.9, а), а тангенциальная составляющая силы резания P_z при этом уменьшается (рис. 7.9, б). Соответствующим образом повышается и предельная мощность профилирования за один проход. При этом возможность пропорционального увеличения скорости подачи детали одновременно с повышением скорости круга ограничена из-за интенсивного нагрева зоны резания и появления прижогов на обрабатываемых поверхностях зубьев. Уже при обработке 2-й впадины без правки шлифовального круга при скорости 50 м/с и $S_d = 200$ мм/мин появляются отдельные слабые прижоги, при $v_{кр} = 60$ м/с и $S_d = 250$ мм/мин прижоги на обрабатываемых поверхностях ста-

новятся очевидными даже при визуальном осмотре.

При обработке впадины глубиной 6 мм при скорости круга 60 м/с, скорости его вертикального перемещения 250 мм/мин наблюдается интенсивный рост мощности (более 9,5 кВт), процесс съема металла протекал нестабильно с большим ростом значений мощности, на обработанной поверхности имелись сильные прижоги.

После предварительных испытаний были выбраны два варианта изготовления зубчатых колес с $m = 3$ мм и $z = 35$ методом профильного глубинного шлифования.

Первый вариант:

- черновая обработка (встречная схема шлифования – подача круга вверх) на режиме: $v_{кр} = 35$ м/с, $S_{кр} = 200$ мм/мин, $t = 6$ мм с черновой правкой круга после обработки 2 впадин;

- чистовая обработка (встречная схема) на режиме: $v_{кр} = 35$ м/с, $S_{кр} = 800$ мм/мин, $t = 0,75$ мм с чистовой правкой круга после обработки 5 впадин.

Ускоренное перемещение круга вниз после обработки впадины во всех случаях составляло 2000 мм/мин.

Второй вариант:

- черновая обработка при $v_{кр} = 35$ м/с и $S_{кр} = 600$ мм/мин включает последовательное увеличение глубины шлифования на 2,4 мм (1-й проход – встречная схема), 2 мм (2-й проход – попутная схема) и 2 мм (3-й проход – встречная схема) с черновой правкой круга после обработки 2 впадин;

- чистовая обработка при $v_{кр} = 35$ м/с за 2 прохода при $t = 0,25$ мм и $S_{кр} = 2000$ мм/мин (встречная схема) и $t = 0,1$ мм, $S_{кр} = 1500$ мм/мин (попутная схема) с чистовой правкой круга после обработки 18 впадин.

Время правки шлифовального круга для станка мод. Р400G составляет: черновая правка (профилирование рабочей поверхности) – 0,18 мин, чистовая – 0,27 мин.

7.4. Сравнительный анализ вариантов профильного глубинного шлифования

Номер прохода	t , мм	S_d , мм/мин	F_c , мм ²	W , мм ³ /с	F_k , мм ²	P_z , Н	N , кВт
1-й вариант							
1	6	200	28,26	94,2	649,6	175,7	6,15
2	0,75	800	5,38	71,67	760,84	128,6	4,5
2-й вариант							
1	2,4	600	8,16	81,59	205,03	96,6	3,38
2	2,0	600	10,0	100	432,4	128,6	4,5
3	2,0	600	12,92	129,15	708,22	166	5,81
4	0,25	2000	1,81	60,33	745,4	42,9	1,5
5	0,1	1500	0,74	18,5	760,84	21,4	0,75

Предложенные варианты принципиально отличаются своими подходами к назначению условий профильного глубинного шлифования зубчатых колес. По первому варианту профилирование зубьев обеспечивается минимально возможным числом проходов: черновой проход заменяет зубофрезерование, чистовой проход – чистовое шлифование. По второму варианту число проходов увеличивается за счет перераспределения припуска на обработку с минимизацией нагрузки при одновременном совмещении рабочих и холостых ходов и увеличении их скоростей.

2-й вариант обработки аналогичен процессу профильного глубинного шлифования зубчатых колес шлифовальными кругами из КНБ на металлических связках, который применяется на фирме Gleason-Pfauter. Результаты сравнения приведены в табл. 7.4.

Оба варианта обеспечили беспрерывную обработку зубчатых колес с относительно стабильным протеканием процесса. При сравнении этих двух принципиально различных вариантов формообразования зубчатого колеса с $m = 3$ мм время обработки у них оказа-

лось практически одинаковым – 39,7 и 38 мин соответственно (разница менее 5 %). Однако степень точности зубчатого колеса, обработанного по первому варианту (4–4–4) выше, чем после обработки вторым вариантом (5–5–5).

Если проанализировать кинематические (F_c , F_k) и силовые (P_z , N) параметры процесса профилирования, то выявляется, что вариант 1 более предпочтителен, чем вариант 2. В первом случае циклическое воздействие на обрабатываемый зуб колеса отличается по нагрузке между первым и вторым проходом в 1,37 раз, а при втором варианте обработки на заготовку пять раз действует сила, которая нестабильна от прохода к проходу, и составляет от 21,4 до 166 Н или изменяется в 7,75 раз.

Из-за применения циклической правки шлифовального круга увеличение потребляемой мощности при первом варианте обработки на втором черновом проходе ($t = 6$ мм) стабильно составляло 17 %, на пятом чистовом проходе ($t = 0,75$ мм) перед правкой круга – 15 %. При втором варианте обработки повышение мощности на третьем черновом проходе относительно второго прохода составляло 72,2...81,3 %, несмотря на то, что подача на глубину уменьшилась с

7.5. Точность и качество обработки зубчатых колес профильным глубинным шлифованием

Характеристика	Требования чертежа	Вариант 1	Вариант 2
Степень точности	4 – 4 – 4	4 – 4 – 4	5 – 5 – 5
Погрешность, мкм:			
профиля зуба	4,8	3,4...4,1	7,0...7,8
направления зуба	5,5	1,8... 2,7	1,9...2,8
Ra , мкм	0,4	0,4...0,5	0,5...0,6
Время обработки, мин	–	39,7	38

2,4 до 2 мм, а скорость вертикального перемещения S_d оставалась постоянной.

На чистовых проходах при втором варианте обработки рассеяние мощности съема металла составляло 28,6 % (с увеличением перед правкой шлифовального круга до 40 %) при общем возрастании затрачиваемой мощности на каждом проходе до 16,7 %.

Результаты измерения точностных параметров зубчатых колес непосредственно на станке после обработки и шероховатости обработанной поверхности на различных участках профиля прибором Perhtometer МЗ приведены в табл. 7.5.

Из двух испытанных вариантов профильного глубинного шлифования зубчатых колес вариант с двумя проходами обеспечил более точную обработку, чем вариант с многопроходным шлифованием. Несмотря на уменьшение максимальной нагрузки на обрабатываемый профиль по затрачиваемой мощности с 6,4 до 5,8 кВт, нестабильность динамического воздействия на заготовку оказала решающее влияние на снижение точности обработки зубчатого колеса по второму варианту. При этом сокращение времени обработки с учетом дополнительного времени на контроль точности обработанного зубчатого колеса с $m = 3$ мм, $z = 35$ на станке, равно-

го 7,5 мин, составляет менее 4 %. В структуре временных затрат на обработку зубчатого колеса, практически одинаковой для обоих вариантов, собственно время шлифования составляет 33...34 %, время правки круга – 10...12 %, а остальное время – до 54...56 % расходуется на холостые ходы шлифовального круга.

Применительно к исследованным условиям эксперимента разработано уравнение регрессии в виде логарифмического полинома ($v_{кр} = 35$ м/с):

$$\ln N = 0,291 \ln S_d + 0,398 \ln F_c + 0,284 \ln F_k - 2,994. \quad (7.22)$$

Качество аппроксимации уравнением (7.22) экспериментальных данных очень высокое: коэффициент множественной корреляции – 0,999, остаточная дисперсия – 0,0028, критерий Фишера – 596,857, предельное относительное отклонение расчетных и опытных данных составило 1,17 %.

Уравнение (7.22) является результатом статистического обобщения экспериментальных данных, в которых потребляемая мощность процесса профилирования N связана с подачей стола S_d и кинематическими характеристиками – площадью сечения удаляемого материала F_c и площадью трения F_k .

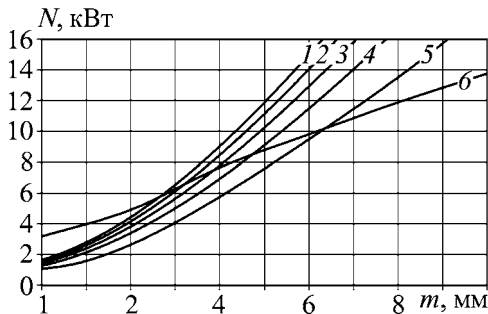


Рис. 7.10. Зависимость мощности глубинного шлифования от модуля зубчатого колеса при обработке за один проход со скоростью подачи, мм/мин:
 1 – 250; 2 – 200; 3 – 150; 4 – 100; 5 – 50;
 6 – $S_{д.х} F_c = 120 \text{ мм}^3/\text{с}$

С использованием расчетной модели (7.22) была предпринята попытка оценить возможную мощность профильного глубинного шлифования зубчатого колеса из закаленной стали типа 16ХЗНВФМБ-Ш в зависимости от модуля (от 1 до 10 мм) за один проход шлифовальным кругом. На рис. 7.10 приведена расчетная зависимость мощности N от модуля m зубчатого колеса при различных скоростях подачи детали от 50 до 250 мм/мин.

Полученные данные свидетельствуют, что на существующих профилешлифовальных станках фирм Gleason-Pfauter, Kapp-Nilles (Германия), Oerlikon (Швейцария) и т.п. вполне реально формообразование профильным глубинным шлифованием при скорости 35 м/с за один проход зубчатых колес из закаленных легированных сталей с модулем до 10 мм с достаточно большой производительностью по скорости съема материала 25...35 мм³/(мм·с) и более.

Примеры профильного глубинного шлифования зубчатых колес. С учетом технологических рекомендаций по характеристикам инструмента и режимам обработки, полученных при шлифовании зубчатой рейки, была изготовлена опытная партия зубчатых колес методом профильного глубинного шлифования "по целому".

Для обработки была выбрана рабочая пара зубчатых колес авиационного двигателя – вал-шестерня и колесо из легированной стали 16ХЗНВФМБ-Ш, термообработанной до твердости 40 HRC. Основные параметры и требуемая точность обрабатываемых зубчатых колес: $m = 2 \text{ мм}$, число зубьев детали вал-шестерня – 17, колеса – 19, ширина венца – 6 мм, допуск на погрешность профиля – 9 мкм, допуск на направление зуба – 7 мкм.

Обработка зубчатых колес проводилась на станке с ЧПУ мод. "Profimat 412" высокочастотными кругами типоразмера 1 200×20×76 с характеристикой 25A 16П M2 12 K5. Исходя из конструктивной особенности станка (наличие точного делительного устройства с вертикальной осью) для обработки зубчатых колес была принята вертикальная схема обработки.

Профилирование режущей поверхности шлифовального круга и его циклическая правка в процессе обработки производилась поочередно двумя алмазными обтачивающими роликами по специальной программе правки с использованием круговой интерполяции. Скорость правки 20,5 м/с, скорость подачи 25 мм/мин. Правка была периодическая с величиной 0,02 мм за цикл.

Принятая схема шлифования не обеспечивала повышенной жесткости технологической системы резания, в связи с чем уровень принятых режимов шлифования был занижен в сравнении с режимами при обработке зубчатой рейки по горизонтальной схеме. Формообразование зубьев методом профильного глубинного шлифования проводилось на скорости 20 м/с за четыре прохода, с выбором глубины резания на каждом проходе в соответствии с рекомендациями табл. 7.2.

Скорость вертикальной подачи шлифовального круга составляла 30...50 мм/мин. Подвод охлаждения в зону резания осуществлялся сверху со стороны входа шлифовального круга. В качестве СОТС использовался водный раствор кон-

7.6. Характеристики зубчатых колес

Материал заготовки	16ХЗНВФМБ-Ш (31...35 HRC)	16ХЗНВФМБ-Ш (60...62 HRC)	20Х2НМА (58...60 HRC)
Модуль, мм	3,0	6,0	6,0
Число зубьев	35	41	29
Угол профиля, °	25	25	25
Ширина венца, мм	60	105	40

центрата марки "Рондогринд К1", подаваемый в зону резания сверху под давлением 0,15...0,20 МПа и расходом около 250 л/мин.

В ходе обработки контролировалась нагрузка на приводе главного движения, значение которой, зафиксированное во всех случаях обработки, свидетельствовала о незначительных динамических нагрузках в зоне резания и была существенно ниже критических значений, при которых появляются прижоги и дробление на обработанных поверхностях.

После обработки производился контроль точности профиля и направления зубьев зубчатых колес. По результатам контроля можно сказать, что достигнутая в результате обработки зубчатых колес методом профильного глубинного шлифования точность геометрических параметров зубьев выше точности, получаемой после зубофрезерования и соответствует точности, которая достигается при чистовом зубошлифовании.

Примеры зубчатой рейки и зубчатых колес, обработанных методом профильного глубинного шлифования и используемые для этого высокопористые абразивные круги, представлены на рис. 7.11.

Профилирование зубьев выполнялось на станке мод. Р600G высокопористым кругом 200×20×51 с характеристикой 25А 16П М2 12 К (рис. 7.12). Рекомендации по режимам шлифования и, в первую очередь, по числу проходов и глубине резания на каждом проходе были разрабо-

таны с учетом рекомендаций, изложенных в п. 7.2. Вариант многопроходного профилирования был выбран с учетом низкой жесткости технологической системы резания.

Обработка проводилась на режимах шлифования: скорость круга – 35 м/с, подача на врезание – 0,049...0,081 мм/дв.ход, продольная подача – 2700...2963 мм/мин. Циклическая правка круга производилась алмазным роликом по программе после обработки пяти зубьев. Охлаждение эмульсией на основе масла "Castrol Vario-kut G600SP".

Испытания показали, что применение новой технологии обработки позволяет формировать профиль внутреннего зубчатого венца "по целому" без предварительной, трудоемкой обработки лезвийным

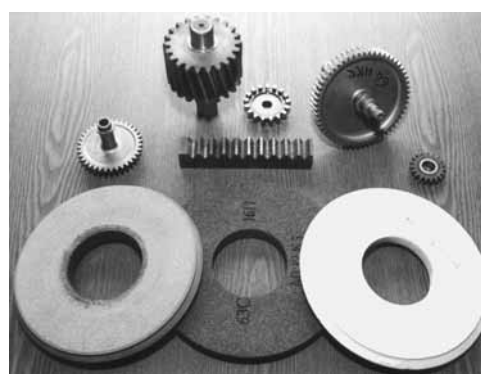


Рис. 7.11. Зубчатые колеса и прямозубая рейка, обработанные методом профильного глубинного шлифования, и высокопористые абразивные круги



Рис. 7.12. Глубинное шлифование внутреннего зубчатого венца

инструментом. Это сокращает время изготовления зубчатого колеса данного типа до 30 раз в сравнении с традиционной технологией, обеспечивая бездефектное формообразование зубьев с высокой точностью профиля 4–4–4 и параметром шероховатости обработанной поверхности Ra не более 0,32...0,63 мкм.

В ходе освоения новой технологии профильного глубинного шлифования на станке мод. Р600G были проведены сравнительные испытания высокопористых кругов, изготовленных по новой технологии, с высокопористыми кругами производства фирмы Burka-Cosmos (Германия), которыми был оснащен станок при его поставке.

Испытания проводились на операциях профильного шлифования зубьев тя-

желонагруженных зубчатых колес с различными характеристиками и из различных марок легированных сталей (табл. 7.6). В одинаковых условиях были испытаны высокопористые круги типоразмера 1 300×20×127 с характеристиками EKW 70/80 Н/1 10 V10 и 25A 16П М1 12 К.

Обработка зубьев производилась на станке мод. Р600G на следующих режимах многопроходного профильного шлифования: скорость круга – 35 м/с, подача на врезание – 0,04...0,1 мм, продольная подача – 1370...3000 мм/мин.

Сравнение высокопористых кругов в ходе обработки проводилось по режущим свойствам, потребляемой мощности, а также по точности и качеству обработки зубчатых колес. В общей сложности в процессе испытаний было обработано 32 зубчатых колеса.

В одинаковых условиях различий по производительности и износостойкости сравниваемых высокопористых кругов не отмечено, но при шлифовании новыми высокопористыми кругами величина потребляемой мощности на 5...10 % меньше, чем при шлифовании инструментом фирмы Burka-Cosmos.

Во всех случаях после шлифования прижогов на обработанных поверхностях зубьев с помощью травления выявлено не было, проведенным магнитопорошковым контролем микротрещин на зубьях не обнаружено. Контроль точности и качества обработанной поверхности показал, что во всех случаях обеспечивается Ra не более 0,30...0,45 мкм, точность зубчатых колес соответствовала 4–4–4.

Таким образом, в результате сравнительных испытаний установлено, что высокопористый круг с характеристикой 25A 16П М1 12 К в одинаковых условиях профильного глубинного шлифования оказывает меньшее термодинамическое воздействие на обрабатываемые зубья, чем круг EKW 70/80 Н/1 10 V10, что обеспечивает более благоприятные условия для качественного формирования зубчатых колес высокой точности.

7.7. Параметры зубчатых соединений Курвик

Наименование параметра	Значение параметра для соединения		
	1	2	3
Число шлиц	20	30	20
Наружный диаметр, мм	65	130	74
Средний радиус, мм	29	61,5	33,5
Ширина венца, мм	8	8	8
Высота зуба, мм	2,56	3,8	3,46
Допуск биения контрольной муфты, мм:			
	радиальное	0,015	0,015
	торцовое	0,007	0,007
Радиус во впадине зуба, мм	0,3	0,3	0,3
Шероховатость поверхности зуба Ra , мкм	0,8	0,8	0,8

Профильное глубинное шлифование шлицевого соединения типа Курвик. Проведены испытания по установлению принципиальной возможности профильного глубинного шлифования торцового шлицевого (зубчатого) соединения повышенной точности типа Курвик на заготовках из различных конструкционных материалов.

Разъемное соединение Курвик – торцовое шлицевое соединение, обладающее высокими центрирующими и несущими способностями и все шире используемое в современных конструкциях газотурбинных двигателей. Оно предназначено для точного соединения деталей ответственного назначения, например, дисков компрессоров и турбин.

Формообразование соединения Курвик было реализовано методом глубинного шлифования обкатом на станках фирмы Klingelnberg по аналогии с обработкой конических зубчатых колес с круговым зубом (рис. 7.13). После предварительного анализа геометрии профиля соединения Курвик, технических возможностей станка и с учетом опыта применения высокопористых кругов на других операциях

зубошлифования были предложены соответствующие характеристики инструмента и определена оптимальная схема обработки с режимами шлифования.

Для испытаний были изготовлены высокопористые шлифовальные круги кольцевого профиля типоразмеров 2 115×100×75, 2 170×100×130, 2 310×110×260 и 2 150×110×100 из электрокорунда марки 25А и из карбида кремния зеленого марки 64С, зернистостью 6...16 на керамической и бакелитовой связках с твердостью ВМ2...СМ1 номерами структуры 6...12 с использованием различных по составу и комбинации порообразующих наполнителей в виде микросфер.

Профилировали зубчатые соединения Курвик трех типов с характеристиками, представленными в табл. 7.7.

Обработку зубчатых профилей проводили на заготовках из сталей марок 16ХЗНВФМБ-Ш (62...64 HRC), 90МCV8 (58...59 HRC), а также из титановых сплавов марок ВТ6 и ВТ 20 методом врезного профильного шлифования на зубошлифовальных станках мод. WNC 30 и W 800 CNC фирмы Klingelnberg на следующих режимах: число проходов – 10...12, глу-

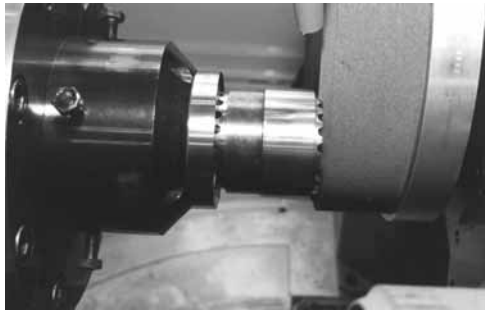


Рис. 7.13. Глубинное шлифование зубчатого профиля Курвик

бина врезания на предварительных проходах – 0,25...0,5 мм, на чистовых проходах – 0,05...0,1 мм, последние 2 прохода – выхаживание без врезания, скорость круга – 25 м/с, скорость подачи круга на врезание – 1...2 мм/мин, выдержка – 3 с.

В качестве СОТС использовали масло марки Shell Garia KS316 с кинематической вязкостью 10...13 сСТ (при референсной температуре 40 °С) и температурой вспышки паров масла 180 °С. Особенностью процесса шлифования деталей из титановых сплавов явилось требование обеспечить температуру в зоне обработки ниже, чем температура возгорания масла, применяемого для охлаждения. Выбранные характеристики инструмента и режимы шлифования обеспечили безусловное выполнение этого требования.



Рис. 7.14. Обработанные детали с профилем Курвик и высокопористые абразивные круги кольцевого профиля

Был также испытан метод профилирования шлиц на титановых заготовках без охлаждения как альтернативный процесс экологически безопасной обработки. В станках мод. WNC 30 и W 800 для охлаждения зоны резания используется масло, которое одновременно работает в гидросистеме и является смазкой для трущихся деталей. Поэтому применение другого масла противоречит требованиям эксплуатации станка.

Наиболее рациональной характеристикой круга для глубинного шлифования без принудительного охлаждения оказалась 64С 16 ВМ2...М1 12 КЗ.

Разработанный метод глубинного шлифования и рекомендации по характеристикам высокопористых кругов и режимам обработки обеспечивают изготовление высокоточного соединения Курвик из различных труднообрабатываемых конструкционных материалов.

Точность и шероховатость обработанных профилей соответствуют требованиям чертежа при отсутствии прижогов на поверхностях зубьев.

На рис. 7.14 показаны обработанные детали с профилем Курвик и используемый для этого высокопористый абразивный инструмент кольцевого профиля.

Оптимизация процесса глубинного шлифования зубчатых колес. Обобщая результаты теоретических и экспериментальных исследований, можно сформулировать две концептуальные модели проектирования технологического процесса профилирования зубчатых колес глубинным шлифованием. В основе этих моделей лежит степень учета факторов, дестабилизирующих процесс формообразования, прежде всего – трение боковых поверхностей и периферии шлифовального круга с обрабатываемой впадиной.

Принципиальной и общей установкой при проектировании процесса профилирования глубинным шлифованием по двум моделям остается равенство площади сечения удаляемого материала F_c на каждом проходе, сформулированной и обоснованной в п. 7.2.

По первой модели – *модели оптимальной производительности* можно оптимизировать параметры режима глубинного шлифования таким образом, чтобы производительность по съему материала W (7.1) оставалась постоянной, независимо от числа проходов формообразования.

На рис. 7.15 приведена зависимость мощности глубинного шлифования зубчатых колес от их модуля и возможного числа проходов от 1 до 6 для их профилирования на полную глубину $t = 2,25m$ при постоянной $S_d F_c = 120 \text{ мм}^3/\text{с}$. При этом условии обеспечивается одинаковое машинное время профилирования впадины для любого числа проходов за счет соответствующего изменения скорости подачи S_d .

По модели оптимальной производительности в соответствии с техническими возможностями станка назначается число проходов с учетом ограничения по мощности процесса N . При этом, например, профилирование зубчатого колеса с модулем 10 мм (без учета числа зубьев) за одно и то же время возможно при мощности от 13,8 до 7,1 кВт, т.е. с диапазоном изменения почти в 2 раза.

Недостатком указанной концепции является то, что не принимается во внимание составляющая работы трения – в модели (7.22) это составляющая F_k , вклад которой в потребляемую мощность возрастает с увеличением числа проходов. Например, при двухпроходной обработке впадины с $m = 10 \text{ мм}$ мощность 2-го прохода в сравнении с первым увеличивается на 20,7 %, а при шестипроходной обработке на 6-м проходе – на 60,6 %.

По второй модели – *модели оптимального термодинамического режима шлифования* проектирование технологического процесса профилирования зубчатого колеса ведется таким образом, чтобы обеспечить оптимальное и постоянное значение потребляемой мощности N независимо от количества проходов. Реализация этой модели основана на изменении

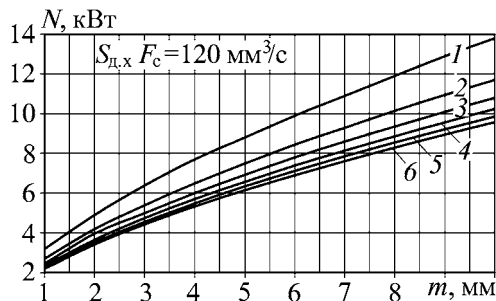


Рис. 7.15. Мощность глубинного шлифования зубчатых колес в зависимости от величины их модуля и числа проходов

скорости подачи стола S_d так, чтобы величина N при многопроходном профилировании оставалась постоянной на каждом проходе. В примере, приведенном выше, чтобы уменьшить мощность второго прохода профилирования впадины с $m = 10 \text{ мм}$ до величины мощности первого прохода необходимо в соответствии с расчетной моделью (7.22) снизить значение S_d почти в 2 раза, а при шестипроходной обработке на 6-м проходе – почти в 5 раз.

В соответствии с предложенными моделями оптимизации профильного глубинного шлифования зубчатых колес в зависимости от их модуля разработаны рекомендации по определению количества проходов профилирования и величины скорости подачи S_d (на примере шлифования стали 16ХЗНВФМБ-Ш).

В табл. 7.8 приведено расчетное изменение мощности глубинного шлифования от числа проходов шлифовального круга при условии, что производительность процесса по съему материала, равная $S_d F_c = 120 \text{ мм}^3/\text{с}$, остается неизменной на каждом проходе. Выбор числа проходов в соответствии с этими данными мотивируется техническими возможностями станка по мощности. В табл. 7.9 даются соответствующие рекомендации по назначению скорости подачи S_d для обеспечения постоянства $S_d F_c = 120 \text{ мм}^3/\text{с}$. При выборе числа проходов по второй оптимизационной модели – модели оптималь-

7.8. Рекомендации по назначению числа проходов при глубинном шлифовании зубчатых колес с постоянной производительностью

m , мм	F_c , мм ²	Расчетные значения N , кВт, при числе проходов					
		1	2	3	4	5	6
1	3,73	3,2	2,4	2,1	1,9	1,7	1,6
2	14,92	4,9	3,8	3,3	2,9	2,7	2,5
3	33,57	6,4	4,9	4,2	3,8	3,5	3,3
4	59,68	7,7	5,9	5,1	4,6	4,2	3,9
5	93,25	8,8	6,8	5,9	5,3	4,9	4,5
6	134,28	9,9	7,7	6,6	5,9	5,5	5,1
7	182,77	10,9	8,5	7,3	6,6	6,0	5,6
8	238,72	11,9	9,2	7,9	7,1	6,6	6,1
9	302,13	12,9	9,9	8,6	7,7	7,1	6,6
10	373,2	13,8	10,6	9,2	8,2	7,6	7,1

ного термодинамического режима шлифования – скорость подачи S_d может назначаться с учетом рекомендаций табл. 7.10.

Принципиальные отличия разработанной технологии профилирования зубчатых колес от известных аналогов глубинного шлифования, например елочного

профиля хвостовиков турбинных лопаток, заключаются в следующем:

- достигнута более высокая производительность профилирования по скорости съема материала – до 4 раз больше;
- возможность обработки высоколегированных закаленных сталей, кото-

7.9. Рекомендации по назначению скорости подачи при глубинном шлифовании зубчатых колес с постоянной производительностью

m , мм	Расчетные значения S_d , мм/мин, по проходам					
	1	2	3	4	5	6
1	1930	3861	5791	7721	9651	11582
2	483	965	1448	1930	2413	2895
3	214	428	643	858	1072	1287
4	120	241	362	482	603	724
5	77	154	232	309	386	463
6	54	107	161	214	268	322
7	39	79	118	157	197	236
8	30	60	90	121	151	181
9	24	48	71	95	119	143
10	19	38	58	77	96	116

7.10. Рекомендации по назначению скорости подачи при глубинном шлифовании зубчатого колеса с $m = 10$ мм при постоянной мощности прохода

Число проходов	N, кВт	Скорость подачи S_d , мм/мин, по проходам					
		1	2	3	4	5	6
1	13,8	20					
2	10,6	39	20				
3	9,2	58	31	22			
4	8,2	77	40	28	22		
5	7,6	91	52	36	28	23	
6	7,1	115	62	45	33	27	23

рые весьма чувствительны к термодинамическим нагрузкам. По новой технологии более высокая производительность процесса сопровождается значительно меньшим нагревом зоны резания (на 500...700 °С), чем у известных аналогов, что ниже температурного порога нежелательных структурно-фазовых превращений;

- применяется более экономичный метод правки – циклический, что сокращает до 10 раз расход шлифовальных кругов и алмазных правящих роликов в отличие от непрерывной принудительной правки в аналогах;

- для профилирования и чистовой правки шлифовальных кругов используются универсальные правящие средства в отличие от профильных алмазных роликов, жестко привязанных к конкретному профилю обрабатываемой поверхности;

- при шлифовании хвостовика лопатки точность профиля формируется одним завершающим проходом шлифовального круга. При обработке зубчатых колес решается более сложная задача: обеспечивается взаимосогласованная точность

профиля зубьев и шага количества проходов, равного числу зубьев (от 14 до 130).

Достигнутые преимущества профильного шлифования зубчатых колес обусловлены физическими особенностями процесса микрорезания абразивными зернами. Оптимальной характеристикой круга для глубинного шлифования зубчатых колес является зернистость 16 при структуре 12...16, применение которой в сравнении с инструментом для других процессов глубинного шлифования (обычно зернистость 10...12, структура также 10...12) позволяет уменьшить плотность абразивных зерен на поверхности круга в 1,8...2 раза.

Уменьшенное количество режущих зерен и, как следствие, тепловых импульсов в сочетании с уменьшением до 5 раз времени их действия на обрабатываемую поверхность при более высоких скоростях относительного перемещения круга и детали дает наблюдаемый эффект существенного снижения температуры в зоне резания. Это подтверждается отсутствием термических повреждений на профилируемых поверхностях зубьев даже после "жестких" режимов глубинного шлифования.

7.4. ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ЧИСТОВОГО ШЛИФОВАНИЯ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ВЫСОКОПОРИСТЫМИ КРУГАМИ

Зубошлифование относится к числу специфичных процессов абразивной обработки, наиболее трудоемких и сложных с точки зрения обеспечения точности и качества обрабатываемых поверхностей. В зависимости от применяемого метода зубошлифования способом копирования или обкатывания с периодическим или непрерывным делением характер взаимодействия шлифовального круга с боковой поверхностью зуба может быть в виде точечного, линейного контактов или их комбинации. Такой характер работы абразивного инструмента предопределяет большие контактные нагрузки, локализованные в зоне резания, и соответственно – высокие температуры.

Чистовому зубошлифованию обычно предшествуют операции формообразования лезвийным инструментом с последующей химико-термической обработкой. Высокотемпературные нагревы с последующим быстрым охлаждением при химико-термической обработке (цементация, азотирование, нитроцементация) вызывают напряженное состояние материала и, как следствие, деформацию зубчатого венца с искажением профиля зуба и снижением исходной степени точности. Неблагоприятным следствием ее становится создание напряженной структуры в поверхностном слое обрабатываемой детали, предрасположенной при дополнительном термодинамическом воздействии к формированию дефектов шлифовочного характера.

Теоретические предпосылки бездефектного шлифования. Структурно-фазовые превращения в поверхностном слое обрабатываемого материала являются следствием, как известно, температуры его нагрева при времени действия, необходимом для их развития и завершения. Уровень температуры и время ее действия

зависят от характера нагружения: с увеличением нагрузки и скорости деформации температурный порог микро- и макроструктурных изменений в материале снижается.

Термодинамические условия чистового шлифования зубчатых колес в этой связи инициируются интенсивностью теплового источника и временем его действия на поверхностный объем обрабатываемого материала. Нагрузка при шлифовании пропорциональна площади сечения удаляемого материала, а интенсивность нагружения – скорости его съема. Важной составляющей теплообразования является, как уже выше отмечалось, площадь контакта рабочей поверхности шлифовального круга с обрабатываемой поверхностью зуба.

Из анализа кинетики взаимодействия шлифовального круга с обрабатываемым профилем зуба при чистовом шлифовании методом обката следует, что формообразование профиля происходит путем эквидистантного перемещения режущей поверхности круга относительно теоретической кривой – эвольвенты профиля зуба с глубиной врезания (по нормали к эвольвенте). В результате внедрения рабочей поверхности торца шлифовального круга в криволинейную поверхность профилируемого зуба формируется контактная площадка в виде эллипса, размеры которой определяются кривизной эвольвенты и ее координатами в зоне резания.

Эвольвентой (по определению) называется кривая, которая описывается точкой прямой линии b при ее перекатывании по основной окружности (рис. 7.16) [28]. Образование эвольвенты характеризуется радиус-вектором R , радиусом основной окружности r_b , углом поворота θ радиус-вектора, углом давления α и углом развернутости φ эвольвенты.

Из расчетной схемы следует, что радиус кривизны ρ эвольвенты, образующей профиль зуба, начиная с точки A на основной окружности, является переменной величиной. В любой точке эвольвенты он

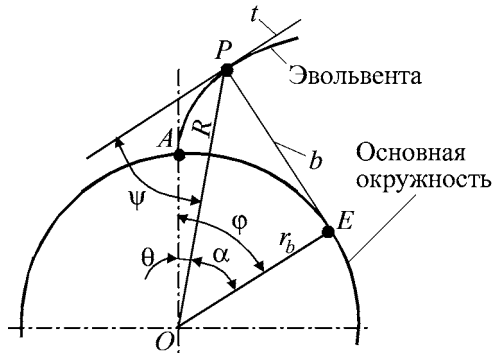


Рис. 7.16. Определение кривизны профиля зуба

соответствует длине производящей прямой b , размер которой определяет радиус кривизны ρ :

$$\rho = \sqrt{R^2 - r_b^2}, \quad (7.23)$$

где радиус r_b связан с модулем m , числом зубьев z и углом профиля α зубчатого колеса соотношением

$$r_b = 0,5mz \cos \alpha. \quad (7.24)$$

Величина радиус-вектора R складывается из радиуса основной окружности r_b и высоты h рассматриваемой точки профиля зуба (см. рис. 7.15, точка P) над основной окружностью:

$$R = r_b + h, \quad (7.25)$$

где текущее значение h , являясь частью высоты зуба над основной окружностью, равно

$$h = km, \text{ при } 0 \leq k \leq 2. \quad (7.26)$$

Расчетное значение радиуса кривизны профиля зуба в зависимости от высоты h рассматриваемой точки профиля в результате решения (7.23) с учетом (7.24) и (7.25) определяется формулой

$$\rho = m\sqrt{k(z \cos \alpha + k)}, \quad (7.27)$$

а с погрешностью расчета менее 5 % приближенной формулой

$$\rho = m\sqrt{kz \cos \alpha}.$$

Из анализа (7.26) следует, что кривизна профиля зуба пропорциональна его модулю m , числу зубьев z и углу профиля α , а значение ρ заметно увеличивается от ножки зуба к его головке, например, при $z = 40$ и $\alpha = 20^\circ$ радиус кривизны профиля зуба с $m = 2$ мм увеличивается от 0 до 12,11 мм, а при $m = 8$ мм – до 48,43 мм. Переменная кривизна профиля зуба становится определяющим фактором формирования основных параметров кинематического взаимодействия шлифовального круга с обрабатываемым зубчатым колесом.

Кинематические соотношения процесса чистового шлифования, обусловленные контактным взаимодействием шлифовального круга с криволинейной поверхностью обрабатываемого зуба, рассмотрены на примере наиболее распространенной схемы обработки обкатом с периодическим делением, так называемым Niles-процессом. Эта схема реализуется при чистовом шлифовании цилиндрических зубчатых колес с $m = 2 \dots 12$ мм на отечественных станках мод. 5843, 5М841, МШ441, а также на зубошлифовальных станках производства фирмы Niles мод. ZSTZ 315 и др.

На рис. 7.17 показана схема формирования профиля зуба Niles-процессом и характер формирования срезов при постоянной глубине внедрения шлифовального круга от кривизны профиля. При каждом рабочем ходе шлифовального круга вдоль зубчатого венца удаляется материал, сечение которого представляет собой сегмент с кривизной ρ и с высотой, равной глубине внедрения t . Хорда этого сегмента l_k , представляя одну из сторон эллипса контакта режущей поверхности круга с профилируемой поверхностью зуба, связана с его кривизной соотношением

$$l_k = 2\sqrt{t(2\rho - t)}. \quad (7.28)$$

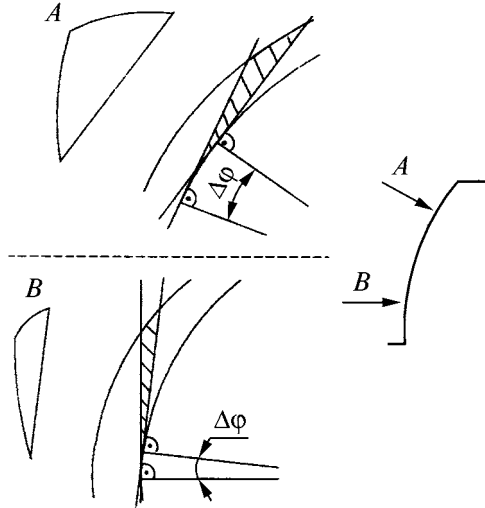


Рис. 7.17. Схема формообразования методом обката с периодическим делением

Площадь сечения удаляемого материала F_c с учетом кривизны профиля (7.26) и формулы (7.28) может быть в первом приближении рассчитана как площадь треугольника с основанием l_k и высотой t :

$$F_c = t\sqrt{t(2\rho - t)}. \quad (7.29)$$

При чистовом шлифовании t обычно существенно ниже, чем 2ρ , поэтому можно прийти к более простому и удобному для расчетов выражению

$$F_c = 1,414t\sqrt{\rho t}. \quad (7.30)$$

Скорость съема материала пропорциональна скорости S_d относительного движения шлифовального круга и обрабатываемой заготовки зубчатого колеса и площади удаляемого сечения, определяемой по (7.30).

Другая сторона эллипса контактной площади шлифовального круга диаметром D_k с обрабатываемым зубчатым колесом теоретически определяется длиной L_k в продольном направлении зубчатого венца как длина хорды сегмента круга диаметром D_k , уменьшенного на значение

h – высоту обрабатываемой точки профиля зуба над основной окружностью.

Кривизна рабочей поверхности шлифовального круга, заправляемого на конус, в точке касания с обрабатываемым профилем соответственно равна

$$R_k = 0,5D_k - km, \quad (7.31)$$

а длина линии касания в продольном направлении

$$L_k = 2\sqrt{t(0,5D_k - km) - t^2} \quad (7.32)$$

или с погрешностью расчета менее 1 %

$$L_k = 2\sqrt{t(0,5D_k - km)}. \quad (7.33)$$

Расчетная оценка по (7.33) для предельно возможных условий шлифования зубчатого колеса с $m = 8 \dots 12$ мм шлифовальным кругом диаметром 400 мм и глубиной врезания 0,1 мм дает значения $L_k = 8,4 \dots 8,6$ мм, что, как правило, меньше ширины зубчатого венца цилиндрических колес такого типоразмера.

В соответствии с формулой (7.33) время термодинамического воздействия шлифовального круга на обрабатываемый микрообъем профиля зуба составит

$$\tau = \frac{L_k}{S_d} = \frac{2}{S_d} \sqrt{t(0,5D_k - km)}, \quad (7.34)$$

а площадь эллипсной площади контакта

$$F_k = \pi l_k L_k = 17,76t\sqrt{\rho(0,5D_k - km)}. \quad (7.35)$$

Полученные модели свидетельствуют о том, что переменная кривизна профиля зуба является главным фактором изменения основных кинематических параметров взаимодействия шлифовального круга с обрабатываемой поверхностью. При перемещении круга вдоль профиля зуба от его ножки к головке увеличиваются площадь сечения F_c удаляемого материала, площадь контакта F_k , скорость съема материала Q_m при одновременном незначительном уменьшении времени τ тер-

модинамического воздействия. Площадь среза F_c при этом возрастает на 48 % при увеличении высоты зуба над основной окружностью от 0,5 до 2 m независимо от модуля обрабатываемого колеса, а увеличение площади контакта F_k связано со значением модуля: при $m = 2$ мм возрастание составило 43 %, а при $m = 8$ мм несколько меньше – 39 % (рис. 7.18, а, б).

Эти расчетные данные уже прогнозируют формирование неблагоприятного термодинамического режима обработки зуба по его высоте по динамике изменения исследуемых кинематических параметров. При более глубоком анализе необходимо обратить внимание на следующее. Контактная температура определяется интенсивностью теплового потока, который формируется в зоне резания на площадке контакта F_k :

$$J = \frac{P v_{кр}}{I F_k}, \quad (7.36)$$

где I – механический эквивалент теплоты.

В формуле (7.36) сила резания P складывается из двух величин: тангенциальной составляющей, обусловленной сопротивлением резанию и пропорциональной сечению F_c , и нормальной составляющей, обусловленной силой трения и пропорциональной площади контакта F_k .

Первая составляющая силы резания формирует поток, интенсивность которого будет пропорциональна отношению F_c/F_k . Значение F_c/F_k и, соответственно, интенсивность нагрева по мере перемещения шлифовального круга от ножки к головке обрабатываемого зуба увеличивается, и это увеличение тем больше, чем больше модуль m (см. рис. 7.18, в).

Однако в энергетическом балансе процесса шлифования преобладает работа трения, вклад которой может достигать 70...80 %. В этой связи особое значение при анализе термодинамики зубошлифования приобретает характер изменения площади контакта F_k . Ее величина определяет количество абразивных зерен, на-

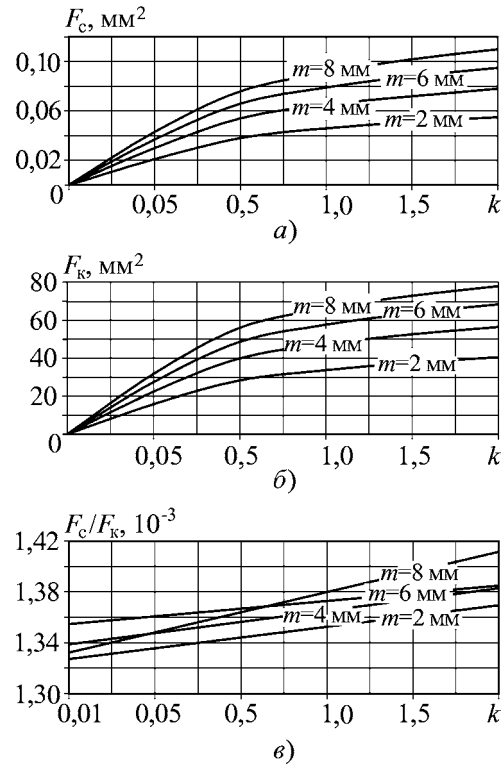


Рис. 7.18. Зависимость площади сечения среза F_c (а), площади контакта F_k (б) и отношения F_c/F_k (в) от высоты обработки над основной окружностью и модуля зубчатого колеса при $z = 40$, $\alpha = 20^\circ$

ходящихся в зоне резания, и, по мнению С.Г. Редько, число формируемых тепловых импульсов, суммирование которых приводит к наблюдаемой температуре контакта.

Резюмируя изложенное, можно утверждать, что основными факторами негативного термодинамического воздействия на обрабатываемый зуб при постоянном режиме шлифования является опережающее в сравнении с F_k увеличение площади сечения среза F_c и возрастание количества абразивных зерен, находящихся на поверхности контакта, соответственно увеличению ее площади. Если увеличение отношения F_c/F_k при изменении высоты обработки зуба над основной окружностью, например, от 0,5 до 2 m со-

ставляет 2,1 % при $m = 2$ мм или 3,9 % при $m = 8$ мм, то наблюдаемое увеличение площади F_k в этих примерах существенно больше – в 1,4...1,44 раз.

Расчетная оценка отношения F_c/F_k может быть получена с учетом формул (7.30) и (7.35):

$$F_c / F_k = 7,96 \cdot 10^{-3} \sqrt{\frac{t}{0,5D_k - km}}, \quad (7.37)$$

из которой следует очевидный вывод о целесообразности уменьшения глубины врезания t для снижения вероятности термических повреждений обрабатываемой поверхности. Но с уменьшением глубины резания все меньшее число абразивных зерен, находящихся на рабочей поверхности шлифовального круга, будет участвовать в работе съема материала, а все большее их число будет только сминать обрабатываемую поверхность, увеличивая работу трения, и ее удельный вклад в энергетический баланс процесса зубошлифования.

Для рассматриваемых условий профилирования зубьев с различным модулем время, в течение которого тепловой поток действует на обрабатываемый микрообъем, уменьшается на 0,85 % при $m = 2$ мм и до 3,8 % при $m = 8$ мм. Уменьшение времени нагрева τ частично снижает риск появления дефектов от повышения интенсивности действующей нагрузки.

Уменьшение времени τ возможно за счет увеличения скорости продольного перемещения шлифовального круга относительно детали, что, однако, ограничивается повышением износа инструмента и требованиями по шероховатости обработанной поверхности и точности обработки.

Обобщая изложенное, включая анализ разработанных математических моделей, можно прийти к выводу, что единственно эффективным направлением реализации высокопроизводительного и бездефектного шлифования зубчатых колес является уменьшение количества абра-

зивных зерен, находящихся в зоне контакта инструмента с профилируемым зубом. Такая тенденция оптимизации технологических условий зубошлифования абразивными кругами нормальной структуры применяется на практике за счет подбора зернистости и твердости в зависимости от модуля шлифуемого колеса и интенсивности съема материала.

Более перспективным направлением представляется использование для этих целей высокопористых шлифовальных кругов.

В главе 2 приводится формула (2.4) для расчета количества абразивных зерен на 1 мм² рабочей поверхности абразивного круга.

В соответствии с (2.4) повышение номера структуры от 6 ($V_3 = 50$ %) до 20 ($V_3 = 22$ %) уменьшает плотность зерен на поверхности круга при сохранении их среднего размера в 1,73 раза, а при увеличении номера зернистости на 1 степень – в 3,07 раза. Такой широкий диапазон уменьшения Z_3 полностью перекрывает возможное увеличение площади контакта F_k при шлифовании зубчатого колеса вдоль профиля зуба с модулем от 2 до 20 мм.

Применение высокопористых кругов, кроме того, дает возможность повысить производительность зубошлифования за счет увеличения глубины врезания t , компенсируя соответствующее увеличение площади контакта F_k (7.35) снижением числа работающих абразивных зерен.

Производственная практика чистового шлифования зубчатых колес, особенно после их химико-термической обработки, свидетельствует, что критические условия обработки абразивными кругами нормальной структуры наступают после высоты на основной окружности более чем $0,5m$. Тогда выбор характеристики высокопористого шлифовального круга по номеру структуры и зернистости сводится к выполнению условия:

$$F'_k Z_s^H \geq F''_k Z_s^B, \quad (7.38)$$

где F'_k – площадь контакта, рассчитанная по формуле (7.35), для заданных условий шлифования при $h = 0,5m$; F''_k – площадь контакта круга с головкой профилируемого зуба ($h = 2m$); Z_s^H и Z_s^B – число абразивных зерен на 1 мм^2 поверхности шлифовального круга соответственно с нормальной структурой 6 и выбираемой структурой высокопористого круга по формуле (2.4).

Чистовая обработка по схеме профильного шлифования. В данном разделе приведены результаты исследований по выбору оптимальных характеристик высокопористых кругов и параметров режима чистовой обработки зубчатых колес применительно к схеме профильного шлифования. При этой схеме обработки в отличие от профилирования зуба различными методами обката съем материала происходит при большой площади контакта шлифовального круга с обрабатываемой поверхностью. Высокая производительность процесса сопровождается интенсивным теплообразованием, вследствие энергетических затрат на трение большого числа абразивных зерен на поверхности контакта и практически недоступной для охлаждения СОТС зоны резания. Поэтому условия профильного шлифования зубчатых колес можно рассматривать как экстремальные, если их сравнивать с условиями формообразования различными методами обката с единичным или непрерывным делением.

Выполненные исследования были ориентированы на внедрение в заводской технологический процесс изготовления зубчатых колес повышенной точности. Он предусматривает использование чистового шлифования дважды: после зубофрезерования перед химико-термической обработкой и после нее как завершающая операция точного профилирования зубчатого колеса. В этой связи выбор оптимальных условий чистового шлифования осуществлялся при обработке профиля впадины

между смежными зубьями на заготовках после объемной закалки и химико-термической обработки с последующей закалкой.

Исследования проводились в условиях чистового профильного шлифования прямозубой рейки с углом профиля 30° и шириной площадки во впадине 2 мм. Высота предварительно обработанного зуба составляла $9 \pm 0,1$ мм. Обрабатывались образцы с размерами $150 \times 25 \times 50$ мм из стали марки 16ХЗНВФМБ-Ш после объемной закалки на твердость 39...40 HRC и после ионной нитроцементации и закалки на твердость 61,5... 62,5 HRC.

Для поверхностного упрочнения профилированные образцы подвергали ионной нитроцементации. Режим упрочнения был принят аналогично режиму насыщения зубчатых колес большого модуля. Температура процесса 900 ± 10 °С, давление 18 ГПа, углеродный потенциал 1,4 %, азотный потенциал 0,2 %, время насыщения 4 ч. После насыщения поверхности углеродом и азотом была проведена термическая обработка: закалка, обработка холодом и низкий отпуск.

После ионной химико-термической обработки зубья рейки имели следующие характеристики: толщина нитроцементированного слоя 1,2 мм со структурой, содержащей мартенсит, избыточные карбиды и остаточный аустенит. Толщина карбидной зоны на профиле зуба составила 0,2...0,25 мм, на головке зуба 0,28...0,3 мм, а твердость поверхности зуба 840...880 HV (62...63 HRC).

Характеристики поверхностного слоя соответствовали требованиям, предъявляемым к высоконагруженным зубчатым колесам. Исключение составляло повышенное количество остаточного аустенита (по данным рентгеноструктурного анализа – 20...25 %), которое обусловлено наличием азота в нитроцементированном слое, повышающем его устойчивость.

Были испытаны высокопористые круги из электрокорунда белого на кера-

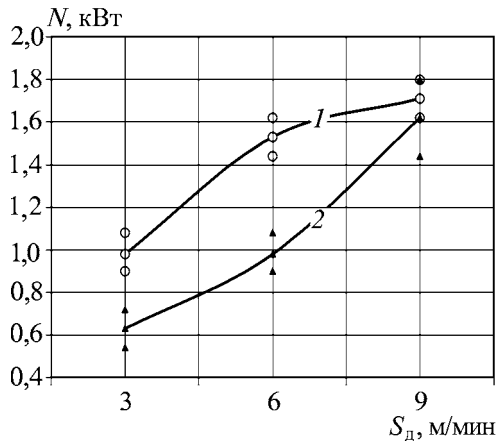


Рис. 7.19. Зависимость мощности профильного шлифования от скорости подачи детали при различной твердости обрабатываемой поверхности зубчатого колеса из стали 16ХЗНВФМБ-Ш:
1 – 39,5...40 HRC; 2 – 62...63 HRC

мической связке, у которых характеристика изменялась в диапазоне: по размеру зерна 10, 12 и 16, по твердости от ВМ1 до М3 и номеру структуры 12 и 14. Профилирование рабочей поверхности круга выполнялось на станке по программе обрабатывающим алмазным роликом.

Обработку производили на профилешлифовальном станке мод. Profimat 412 по схеме горизонтального встречного шлифования с охлаждением зоны резания водным раствором "Рондогринд К1".

Скорость круга, равная 25 м/с, сохранялась постоянной во всех случаях обработки. Скорость подачи стола изменялась от 1 до 12 м/мин при глубине врезания от 0,01 до 0,15 мм за один проход. Общая фактическая глубина врезания при постоянном режиме шлифования составляла 0,46...0,56 мм, а число проходов шлифовального круга изменялось от 4 до 28 в зависимости от выбранной подачи на врезание. Тем самым в каждом эксперименте обеспечивалось постоянство работы шлифования по съему материала, а наблюдаемые отклонения по фактической глубине врезания объясняются размерным износом шлифовального круга.

Оптимальность условий шлифования высокопористыми кругами различных характеристик оценивалась по их износостойкости, которая косвенно определялась через изменение радиуса впадины r_v между смежными зубьями (чем больше радиус r_v , тем меньше износостойкость круга) после различных режимов обработки. В экспериментах, в которых определялась износостойкость шлифовального круга в зависимости от его характеристики и режима обработки, инструмент заправлялся "наостро" с углом 60° . В остальных случаях рабочая поверхность круга формировалась под профиль впадины прямозубой рейки. Кроме того, измерялись нагрузка N (в % от мощности главного привода) на каждом режиме шлифования, шероховатость обработанной поверхности зуба по параметру Ra , устанавливалось наличие прижогов (визуально и травлением) и микротрещин (магнитным методом), а также исследовались структурные изменения в поверхностном слое шлифованных зубьев.

Фактическая мощность процесса оказалась удобной экспресс-оценкой предельно допустимого уровня режима шлифования: при достижении некоторого определенного ее значения, обусловленного характеристикой круга и режимами шлифования, на обработанной поверхности появляются прижоги либо следы дробления.

Экспериментальные исследования показали, что в одинаковых условиях чистового шлифования характер протекания процесса и его результаты сильно зависят от твердости обрабатываемой поверхности. При шлифовании высокопористыми кругами более твердой заготовки мощность процесса и шероховатость обработанной поверхности меньше, чем при шлифовании более мягкой заготовки независимо от характеристики инструмента и режима обработки (рис. 7.19, табл. 7.11).

На рис. 7.19 показано изменение мощности профильного чистового шлифования высокопористым кругом с харак-

7.11. Характеристики процесса чистового шлифования поверхностей различной твердости

Характеристика круга	Значение параметров при твердости обрабатываемой поверхности			
	40 HRC		62 HRC	
	N , кВт	Ra , мкм	N , кВт	Ra , мкм
25А 16П ВМ1 12 К	0,72	3,93...4,48	0,63	2,33...2,36
25А 16П МЗ 12 К	1,35	1,06...1,97	0,99	0,95...1,07
25А 10П МЗ 12 К	1,71	0,8...0,85	1,35	0,42...0,63

теристикой 25А 10П МЗ 12 К при скорости 25 м/с и $t = 0,01$ мм в зависимости от скорости подачи стола и твердости обрабатываемой поверхности. Значения мощности уменьшается в среднем от 56 % при $S_d = 3$ м/мин до 5,5 % при $S_d = 12$ м/мин. В табл. 7.11 приведены значения мощности N и параметра шероховатости Ra при постоянном режиме шлифования: скорость круга 25 м/с, скорость подачи детали 12 м/мин, глубина резания 0,01 мм высокопористыми кругами одной структуры, но различной зернистости и твердости.

Статистическим моделированием экспериментальных данных на основе корреляционного и регрессионного анализов установлено, что для условий чистового шлифования ($S_d = 3...12$ м/мин, $t = 0,01...0,02$ мм) характер взаимного влияния параметров режима обработки и характеристики высокопористого круга зависит от твердости обрабатываемого материала.

При твердости 40 HRC на мощность процесса и шероховатость обработанной поверхности наиболее сильно в сравнении с другими управляемыми параметрами процесса влияет твердость инструмента (коэффициент парной корреляции R соответственно равен 0,940 и 0,912). При шлифовании более твердой поверхности с 62 HRC на мощность процесса более существенно влияет глубина резания ($R = 0,527$) и в меньшей степени твердость

круга ($R = 0,397$). Твердость круга в различных моделях учитывалась как глубина лунки h_d .

Анализ корреляционных матриц управляемых параметров процесса чистового шлифования также показал, что при обработке поверхности твердостью 40 HRC назначение параметров режима t и S_d тесно связано с зернистостью и твердостью шлифовального круга.

Напротив, при шлифовании более твердого материала выбор значения t зависит в основном от S_d и очень слабо от характеристик высокопористого инструмента. Результаты предварительных испытаний и их статистический анализ дали основание сформулировать предположение, что в случае применения высокопористого абразивного инструмента возможно форсирование режима шлифования с оптимизацией сочетания t и S_d таким образом, чтобы припуск, оставляемый на чистовое шлифование, можно было бы удалять за 1–2 прохода, вместо 10–15 проходов, применяемых при обработке шлифовальными кругами нормальной структуры.

Такое кардинальное изменение технологического процесса чистового шлифования зубчатых колес потребовало его аргументированного обоснования.

Исследования по чистовому шлифованию, приближенные к схеме глубинной обработки при $t = 0,02...0,15$ мм за проход

и $S_d = 1...3$ м/мин, были проведены на образцах стали 16ХЗНВФМБ-Ш после ионной нитроцементации с последующей закалкой.

Статистическим обобщенным моделированием установлено, что для данных условий шлифования характер и степень влияния параметров режима шлифования и характеристики круга на мощность процесса, например, заметно отличаются от условий обработки при глубине $0,01...0,02$ мм за проход. При схеме обработки, приближенной к глубинному шлифованию, степень влияния параметров t и S_d на мощность практически одинакова (коэффициент регрессии составляет 0,539 и 0,588). При чистовом шлифовании глубина резания существенно изменяет мощность процесса, чем скорость подачи детали – коэффициент регрессии в модели равен соответственно 0,850 и 0,389.

Степень влияния характеристики круга – его зернистости A_3 , твердости h_L , структуры V_3 на потребляемую мощность обработки практически одинаково, но они очень тесно связаны между собой: по корреляционной матрице связи теснота связи составляет $0,993...0,996$. Это свидетельствует о необходимости назначения характеристики высокопористого шлифовального круга, у которого должны быть взаимосвязаны все его параметры.

Обобщенная статистическая модель мощности чистового шлифования по закаленному нитроцементированному слою от параметров характеристики высокопористых кругов и режима обработки имеет вид

$$\ln N = 14,335 + 0,539 \ln t + 0,588 \ln S_d + 0,650 \ln V_3 + 1,522 \ln A_3 - 4,989 \ln h_L. \quad (7.39)$$

По представленной модели (7.39) можно оценить степень и характер влияния управляемых параметров чистового шлифования на его мощность и соответственно на вероятность появления дефектов шлифовочного характера. Для ее

уменьшения целесообразно увеличивать номер структуры при одновременном снижении зернистости круга и его твердости.

На рис. 7.20 показано изменение мощности процесса N , износостойкости инструмента по r_b и параметра шероховатости обработанной поверхности Ra от глубины резания t при постоянной скорости подачи детали, равной 2 м/мин, для двух характеристик высокопористых кругов, различных по зернистости, твердости и номеру структуры.

Характер изменения потребляемой мощности как критерия возможного появления дефектов шлифования практически одинаков для исследованных кругов. Износостойкость инструмента и шероховатость обработанной поверхности более заметно отличаются при изменении характеристики шлифовального круга. Для обеспечения их минимальных значений целесообразно применять высокопористый круг с характеристикой 25А 12П М1 12К, который является оптимальным для исследованных условий чистовой обработки (рис. 7.21).

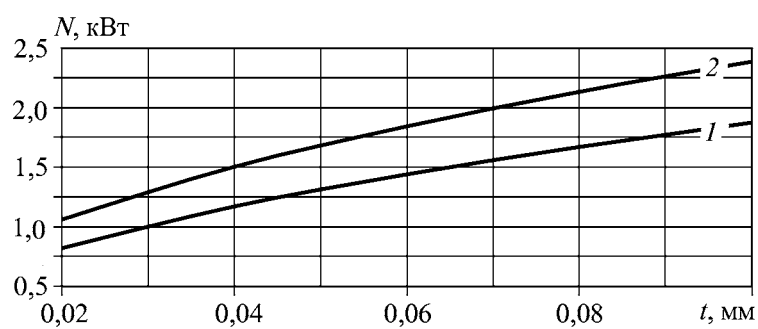
Разработанные на основе экспериментальных данных статистические регрессионные модели связи выходных параметров процесса чистового шлифования от его режима для круга с характеристикой 25А 12П М1 12К в виде

$$\ln N = 1,407 + 0,504 \ln t + 0,567 \ln S_d; \quad (7.40)$$

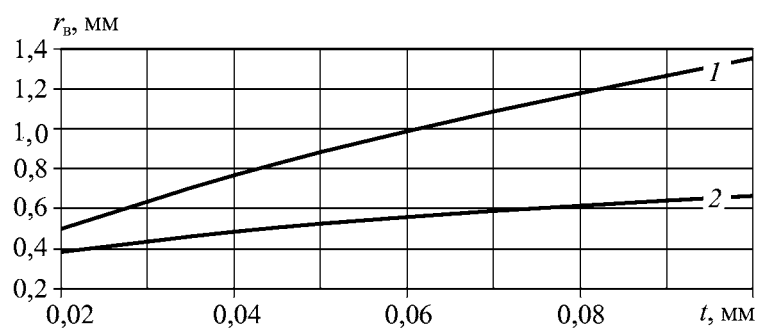
$$\ln r_b = 0,282 + 0,342 \ln t + 0,089 \ln S_d; \quad (7.41)$$

$$\ln Ra = 0,035 + 0,147 \ln t + 0,263 \ln S_d \quad (7.42)$$

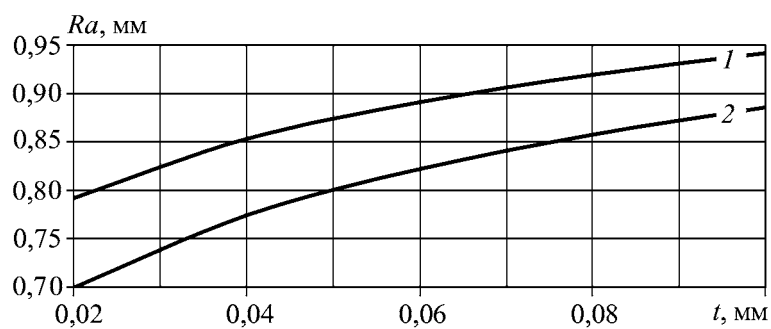
дают возможность оптимизировать условия обработки по t и S_d в зависимости от критического значения мощности процесса N и минимальных значений износостойкости круга (по величине r_b) и шероховатости обработанной поверхности по параметру Ra .



а)



б)



в)

Рис. 7.20. Влияние глубины резания на мощность процесса (а), износостойкость инструмента (б) и шероховатость обработанной поверхности (в) при чистовом профильном шлифовании зубчатого колеса из стали 16ХЗНВФМБ-Ш (62...63 HRC) высокопористыми кругами 25А 16П ВМ2 14 К (1) и 25А 12П М1 12 К (2)

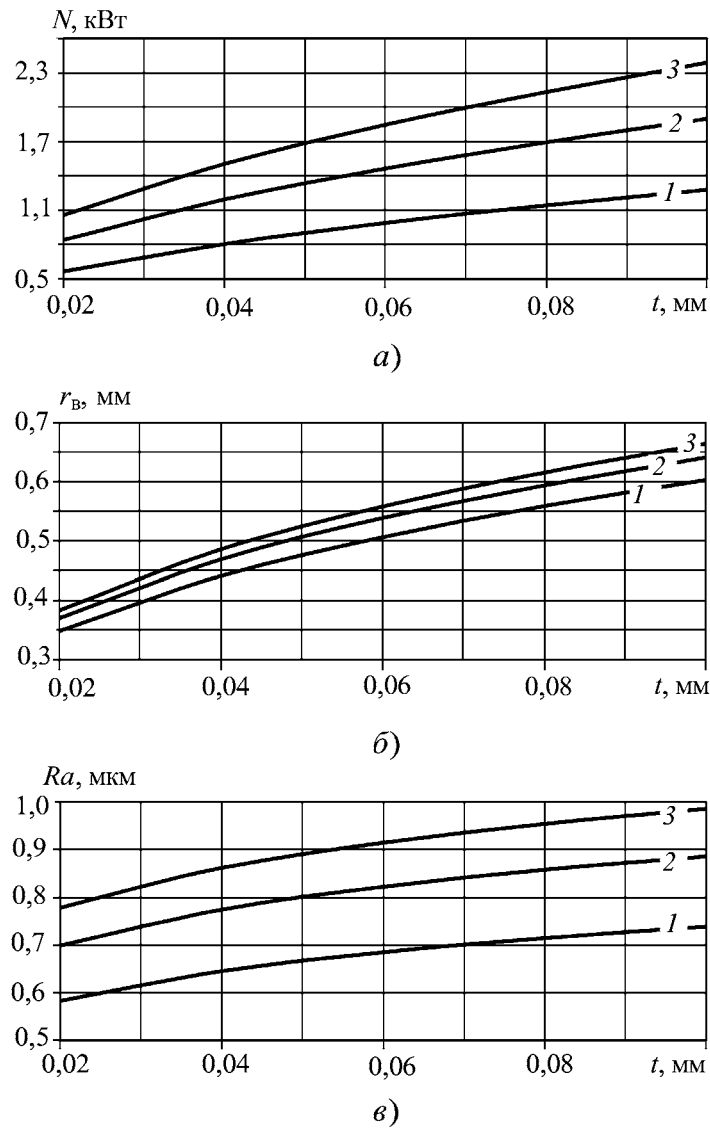


Рис. 7.21. Влияние глубины резания на мощность процесса (а), износостойкость круга (б) и шероховатость обработанной поверхности (в) при чистовом профильном шлифовании зубчатого колеса из стали 16ХЗНВФМБ-Ш (62...63 HRC) высокопористым кругом 25А 12П М1 12 К при различных скоростях подачи детали:
 1 – 1 м/мин, 2 – 2 м/мин, 3 – 3 м/мин

Шлифование цилиндрических зубчатых колес методом обката с непрерывным делением. Обработка производилась червячными абразивными кругами на зубошлифовальных станках мод. RZ300E и RZS фирмы Reishauer. При этом обрабатывались зубчатые колеса различного назначения с модулем от 1,75 до 7 мм, числом зубьев от 9 до 65 и шириной венца от 5 до 160 мм.

На станке мод. RZ300E применяли абразивные круги с размерами $350 \times 84 \times 160$, на станке мод. RZS – круги с размерами $350 \times 104 \times 160$. Исследованный диапазон режима шлифования составил: скорость круга – 20...30 м/с, радиальная подача на врезание – 0,01...0,02 мм, вертикальная продольная подача – 0,6...1,2 мм/мин. Профилирование рабочей поверхности шлифовального круга и правка осуществлялась алмазными резцами и алмазным роликом типа SPA.

Предварительные испытания были проведены при чистовом шлифовании крупномодульных зубчатых колес $m = 6$ мм, $z = 33$ из цементованной стали марки 16ХЗНВФМБ-Ш (62...64 HRC) на станке мод. RZ300E. После шлифования этих колес абразивными кругами с характеристикой 53A 100 G 8 V производства фирмы Winterthur около 30 % обработанных деталей имели дефекты поверхностного слоя в виде прижогов и микротрещин. Попытка использования шлифовального круга с характеристикой 25A 40П M2 6 K5 не привела к повышению качества обработки, напротив, добавилось значительное искажение геометрии зубьев после шлифования.

Снижение подачи на врезание до 0,01 мм и увеличение числа выходящих проходов для обеспечения требуемого качества и точности обработанной поверхности привело к увеличению времени на обработку.

При повторном шлифовании зубчатых колес были испытаны новые высокопористые круги с характеристиками 25A 10П BM1 12 K5 C и 25A 12П BM1 12

K5 C. После шлифования со скоростью круга 27...30 м/с, подачей на врезание 0,01...0,02 мм и продольной подачей 0,6...0,9 мм/мин на поверхностях зубьев не наблюдалось ни одного случая появления трещин и видимых прижогов. Результаты травления также подтвердили отсутствие скрытых прижогов. Все детали по качеству обработки признаны годными. Однако вследствие низкой твердости (BM1) круги имели повышенный износ, что требовало частого восстановления профиля и увеличивало расход абразивного материала.

С учетом результатов предварительных испытаний были разработаны рецептуры и изготовлены на фирме Carborundum Electrite новые высокопористые круги с характеристиками 99BA 100 I 10 V и 99BA/96A 100 I 10 V, обладающие улучшенными режущими свойствами и повышенной стойкостью. После обработки новым инструментом во всех случаях прижогов и микротрещин также выявлено не было. Все обработанные детали по качеству поверхностного слоя и геометрической точности профиля зуба соответствовали требованиям чертежа и технологии.

На станке мод. RZS кругами с характеристикой 99BA 100 I 10 V обрабатывалась вал-шестерня с параметрами $m = 4$ мм, $z = 14$, $\beta = 15^\circ$, $b = 78$ мм. После обработки погрешность профиля зуба составила 2,2...5,4 мкм при допуске 12 мкм, отклонение по направлению линии зуба 1,0...7,5 мкм при допуске 12 мкм. После обработки шестерни с характеристикой $m = 5$ мм, $z = 23$, $b = 78$ мм высокопористым кругом 99BA/96A 100 I 10 V погрешность профиля также находилась в пределах допуска и составила 4,1...6,8 мкм, погрешность направления – 0,4...4,4 мкм. Послеоперационным контролем качества обработанной поверхности шлифовочных дефектов в виде прижогов и микротрещин во всех случаях выявлено не было.

Мелкозернистым абразивным кругом 99SA 150 J 10 V производилась финишная

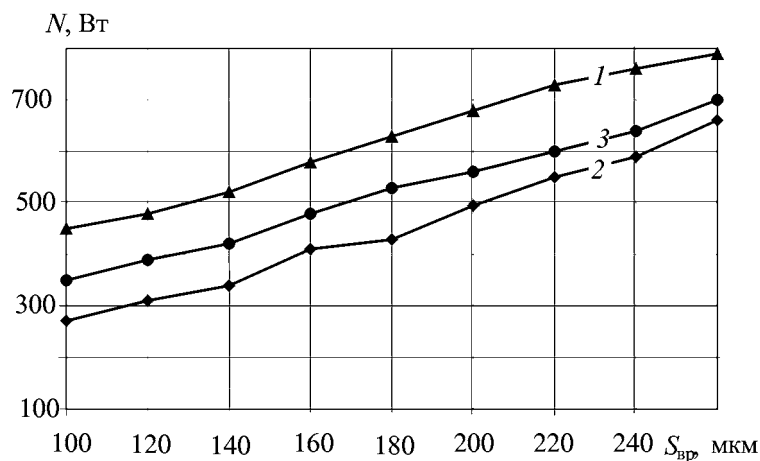


Рис. 7.22. Зависимость потребляемой мощности от величины подачи на врезание при зубошлифовании кругами:

1 – 52A 60 M 5 V; 2 – 25A 25П CM1 12 K; 3 – 3SG 54 I V

обработка шестерни с характеристикой $m = 4$ мм, $z = 41$, $\beta = 15^\circ$, $b = 75$ мм. По результатам контрольного измерения погрешность профиля зубьев составила 2,0...7,3 мкм, а по направлению 1,0...2,4 мкм, что значительно ниже, чем допускаемое отклонение в 12 мкм.

В ходе испытаний установлено, что применение высокопористых кругов при чистовом шлифовании цилиндрических зубчатых колес методом непрерывного обката дает возможность повысить производительность обработки, особенно крупномодульных колес ($m \geq 4$ мм), за счет увеличения подачи на врезание на черновых проходах с 0,01 мм до 0,02 мм или в 2 раза, при этом обеспечиваются все требования по точности, геометрии и качеству обработки зубчатого колеса с Ra не более 0,63 мкм.

Чистовое шлифование методом обката с периодическим делением. Исследования проводились при шлифовании цилиндрических колес коническим кру-

гом по схеме, которая относится к методу обката с периодическим делением. При обработке зубчатое колесо совершает движение обката, состоящее из двух синхронно связанных движений: поворота вокруг своей оси и поступательного перемещения относительно производящей рейки, зубом которой является шлифовальный круг.

В рамках совместной работы МГТУ "Станкин" и Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg (Германия) были проведены испытания новых высокопористых кругов при шлифовании цилиндрических зубчатых колес с модулем 6 мм, числом зубьев 20 и шириной венца 40 мм из закаленной легированной стали 58CrV4 (54 HRC).

Для испытаний были представлены высокопористые круги с размерами 350×32×127 из электрокорунда белого марки 25A зернистостью 25П с твердостью от M1 до CM2 со структурами 12 и 14. Сравнительный анализ проводился с

инструментом с характеристиками 52A 60 M 5V фирмы Butzbach (Германия) и 3SG 54 I V фирмы Norton (Франция), который наилучшим образом соответствует принятой схеме зубошлифования. Круг 3SG 54 I V был изготовлен с применением микрокристаллической модификации корунда SG разработки и изготовления фирмы Norton, которая в настоящее время активно внедряется на операциях шлифования ответственных деталей.

Обработка на станке мод. ZSTZ315 фирмы Niles выполнялась на форсированных режимах при скорости круга 35 м/с, скорости обката 360 и 400 мм/мин и с поперечной подачей на врезание 0,1...0,26 мм со скоростью 120 и 200 дв.ход/мин при длине хода 80 и 54 мм соответственно. Исследованные режимы по производительности в 1,5...2 раза превосходят применяемые в производстве зубчатых колес, что позволило оценить потенциальные возможности различных шлифовальных кругов.

С увеличением количества прошлифованных зубьев потребляемая мощность процесса возрастает, равно как увеличивается износ шлифовального круга. Аналогичным образом влияет и подача на врезание. На рис. 7.22 показано изменение потребляемой мощности на зубошлифование при увеличении подачи на врезание с 0,01 до 0,026 мм, а на рис. 7.23 – зависимость износа исследованных шлифовальных кругов от числа прошлифованных зубьев на режиме со скоростью обката 360 мм/мин, с поперечной подачей 0,15 мм и частотой 120 дв.ход/мин. Слои металла при данной схеме шлифования удаляются при движении круга вдоль зуба последовательно с различных его участков по мере движения обката. При этом толщина среза является неравномерной по линии контакта, изменяясь от минимума у ножки зуба до максимального значения у его головки (см. рис. 7.17). Соответственно изменяется и динамическая нагрузка,

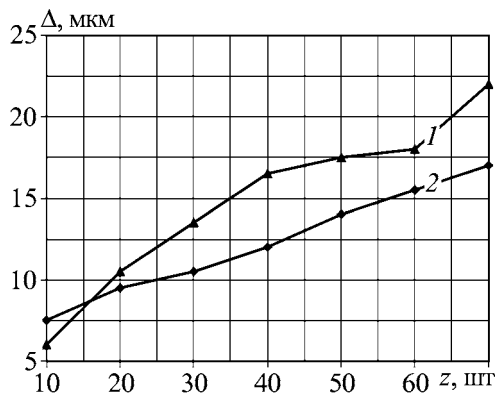


Рис. 7.23. Зависимость износа шлифовального круга от числа обработанных зубьев:
1 – круг 52A 60 M 5 V; 2 – круг 25A 25П CM1 12 K

нестабильность которой приводит к неравномерным термическим напряжениям.

На рис. 7.24 показана динамика изменения характера прижогов на обработанных поверхностях зубьев в зависимости от числа прошлифованных зубьев кругами с характеристиками 52A 60 M 5 V и 25A 25П CM1 12 K без правки на режиме: скорость обката 360 мм/мин, частота 120 дв.ход/мин, поперечная подача 0,15 мм.

Первыми появляются слабые прижоги у головки зуба. По мере усиления и

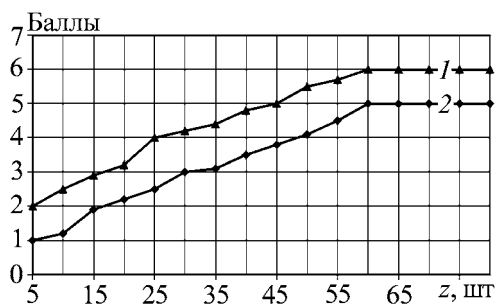


Рис. 7.24. Динамика формирования прижогов на поверхностях обработанных зубьев:
1 – круг 52A 60 M 5 V; 2 – круг 25A 25П CM1 12 K

7.12. Бальная система оценки прижогов на шлифованной поверхности

Балл	Критерии оценки интенсивности прижогов
1	Визуально шлифовальные прижоги не наблюдаются; травлением прижоги не выявляются
2	Визуально шлифовальные прижоги не наблюдаются; травлением выявляются слабые штрихи
3	Визуально после шлифования прижоги не наблюдаются; травлением выявляются темные штрихи, различимо образование пятен
4	После шлифования прижоги визуально не наблюдаются; травлением выявляются более темные штрихи и пятна с более темной основой
5	После шлифования слабо различимые прижоги, заметные без травления
6	Визуально после шлифования наблюдаются сильные прижоги

увеличения числа штрихов прижогов у головки зуба, они начинают распространяться к его ножке. Такая динамика термических повреждений одинакова при шлифовании обеими кругами, но инструмент МГТУ "Станкин" оказывает на обрабатываемые поверхности зубьев меньшее негативное термическое воздействие, чем шлифовальный круг фирмы Butzbach. При этом размерный износ высокопористого круга на 30 % меньше (см. рис. 7.23).

Характер прижогов, оцениваемый по бальной шкале, приведен в табл. 7.12.

Фактором, определяющим качество обработки при зубошлифовании, является интенсивность теплового потока и время действия теплового источника в контакте шлифовального круга и обрабатываемой поверхности зуба. Они, в свою очередь, определяют скорости нагрева и охлажде-

ния в зоне резания, которые вместе с температурой нагрева ответственны за структурно-фазовые превращения и термические повреждения в поверхностном слое.

Прямым образом определить контактную температуру при зубошлифовании технически чрезвычайно трудно и трудоемко. Поэтому сравнительная оценка шлифовальных кругов по температурному критерию проводилась при круглом наружном шлифовании образцов из никелевого сплава Nicrofer 6025 НТ диаметром 120 мм, шириной 10 мм. Режим шлифования с охлаждением эмульсией 1,5%-ной "Castrol Syntilo R" или без охлаждения изменялся в диапазоне: по скорости круга 35...45 м/с, по скорости детали 12...16 м/мин с радиальной подачей 0,1...0,5 мм/мин.

Контактная температура измерялась методом полуйскусственной термопары, в

качестве которой были приняты стандартный термоэлектрод и обрабатываемый сплав Nicrofer 6025 HT. Вследствие его особых свойств удастся измерить температуру при шлифовании как с охлаждением СОТС, так и без нее (сухое шлифование).

На рис. 7.25 и 7.26 приведены расшифрованные осциллограммы тепловых импульсов при шлифовании на различных режимах и различными шлифовальными кругами. Результаты сравнения температур шлифования, которое проводилось в одинаковых условиях обработки (см. рис. 7.25), свидетельствуют о том, что высокопористые круги, разработанные с участием автора, при сухом шлифовании обеспечивают уровень нагрева обрабатываемой поверхности в зоне контакта на 100...300 °С ниже, чем инструментом зарубежных фирм. Использование охлаждения при шлифовании кругом с характеристиками 52A 60 M 5V понижает температуру в зоне резания почти в 2 раза, но ее уровень при этом остается ниже или близким к температуре сухого шлифования новыми высокопористыми кругами.

Между уровнем нагрева детали или температурой шлифования, с одной стороны, и потребляемой мощностью, с другой, существует тесная корреляционная связь: чем больше потребляемая мощность процесса, тем выше уровень нагрева (см. рис. 7.22 и 7.26). Это прямым образом подтверждает эффективность критерия оптимальности процесса шлифования по его мощности.

Никелевый сплав Nicrofer 6025 HT не применяется для изготовления зубчатых колес, поэтому интенсивность нагрева, измеренная при его шлифовании кругами различных характеристик, позволяет получить только сравнительную оценку их режущих свойств по температурному критерию. Чтобы соотнести полученную температурную оценку применительно к обработке закаленных легированных сталей, используемых при изготовлении зуб-

чатых колес, был поставлен эксперимент, в котором при одинаковых условиях шлифовали три различных материала. Такой эксперимент проводился при шлифовании сплава Nicrofer 6025 HT и сталей 100Cr6 (61 HRC) и 16MnCr5 (56 HRC) высокопористым кругом с характеристикой 25A 25П CM1 12 K, которая является оптимальной для исследованных ранее условий зубошлифования по методу обката с периодическим делением.

На режиме шлифования $v_{кр} = 35$ м/с, $v_d = 12$ м/мин и $S_d = 0,5$ мм/мин с охлаждением измеренная контактная температура составила для сплава Nicrofer 6025 HT – 340 °С, сталей 100Cr6 – 300 °С и 16MnCr5 – 150 °С. Таким образом, температура при шлифовании никелевого сплава больше или близка к температуре шлифования закаленных легированных сталей. Тогда, основываясь на полученных экспериментальных данных, можно утверждать, что новые высокопористые круги в одинаковых условиях форсированной обработки, в том числе при зубошлифовании, обеспечивают интенсивность нагрева на 300...400 °С меньше, чем исследованные абразивные круги ведущих зарубежных фирм, применяемых для этих целей.

Важным преимуществом нового инструмента является также то, что в экстремальных условиях шлифования без принудительного охлаждения интенсивность нагрева, т.е. контактная температура, практически не изменяется в сравнении с обработкой с использованием СОТС.

7.5. ПРАВКА ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ ПРИ ОБРАБОТКЕ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

При зубошлифовании возрастает роль правки шлифовального круга, которая обеспечивает его быстрое формообразование на любую заданную конфигурацию.

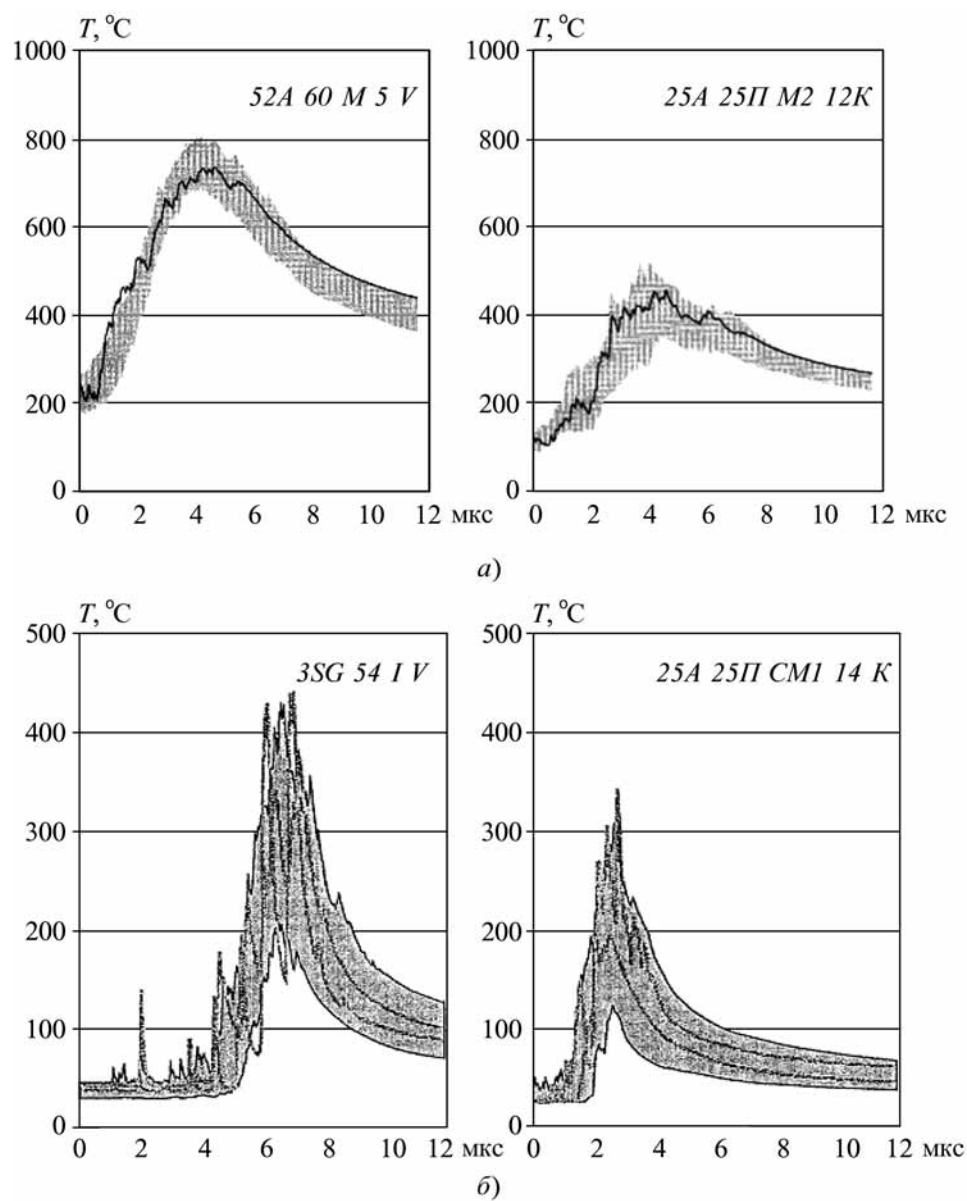


Рис. 7.25. Температура сухого шлифования сплава Nicrofer 6025 НТ кругами различных характеристик:

а – $v_{кр} = 45$ м/с, $v_d = 16$ м/мин, $S_d = 0,5$ мм/мин; *б* – $v_{кр} = 45$ м/с, $v_d = 12$ м/мин, $S_d = 0,1$ мм/мин

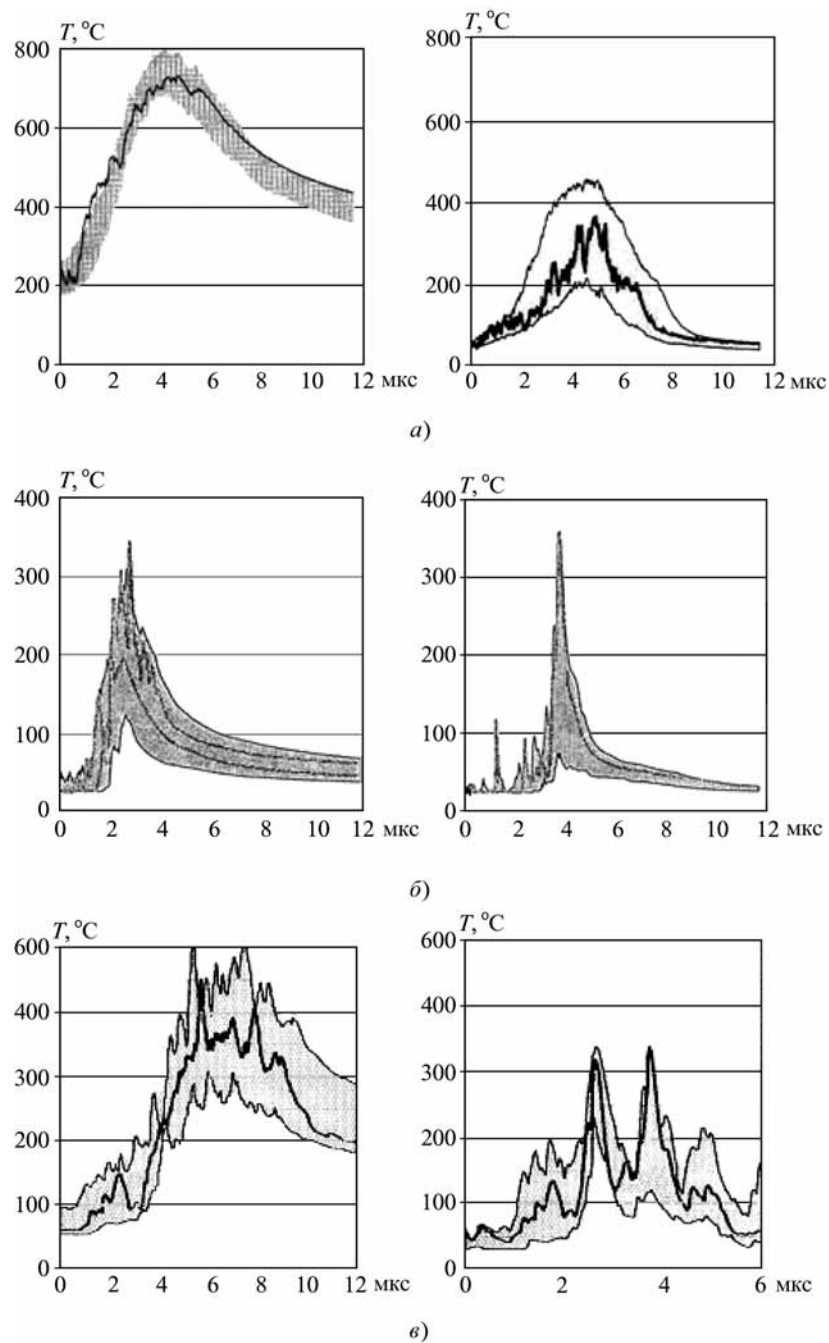


Рис. 7.26. Температура шлифования сплава Microfer 6025 НТ кругами различных характеристик без охлаждения (слева) и с охлаждением (справа):
а – круг 52А 60 М 5 V, $v_{кр} = 45$ м/с, $v_d = 16$ мм/мин, $S_d = 0,5$ мм/мин; *б* – круг 25А 25П СМ1 14 К, $v_{кр} = 45$ м/с, $v_d = 12$ мм/мин, $S_d = 0,5$ мм/мин; *в* – круг 25А 25П СМ1 12 К, $v_{кр} = 45$ м/с, $v_d = 12$ мм/мин, $S_d = 0,5$ мм/мин

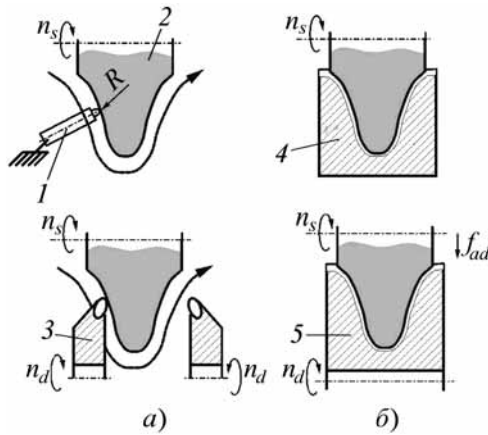


Рис. 7.27. Принципы правки:

а – правка методом обтачивания;
б – профильная правка; *1* – неподвижный правящий инструмент; *2* – шлифовальный круг; *3* – обтачивающий ролик; *4* – неподвижный блок; *5* – профильный ролик; n_s – частота вращения шлифовального круга; R – радиус округления алмаза; n_d – частота вращения правящего инструмента; f_{ad} – подача на врезание

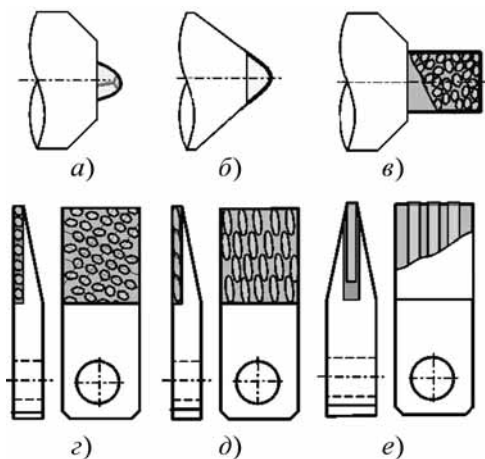


Рис. 7.28. Неподвижные правящие инструменты:

а – алмазный монокристалл; *б* – профилированный алмаз; *в* – многозерновой алмазный карандаш; *г* – пластина с алмазами; *д* – пластина с алмазными иглами; *е* – правящий инструмент с монокристаллическими алмазами

Большой опыт в изготовлении и освоении правящего инструмента и систем правки при зубошлифовании имеет фирма Dr. Kaiser Diamantwerkzeuge (Германия), которая оснащает своим инструментом практически все профиле- и зубошлифовальные станки, выпускаемые в Европе, США и Японии.

В данном разделе описан опыт этой фирмы по разработке и применению различного алмазного правящего инструмента при шлифовании зубчатых колес, в том числе на российских предприятиях.

Известно, что правку применяют для формирования рабочего профиля шлифовального круга, его восстановления по мере изнашивания с созданием и поддержанием высокой режущей способности. Расход шлифовальных кругов на правку составляет 90...95 % от общего их расхода, а затраты на правку достигают 70 % от себестоимости операции шлифования.

Существующие методы правки разделяют на правку с помощью обтачивающих роликов и профильную (рис. 7.27). Правку можно выполнять с помощью неподвижных или вращающихся правящих инструментов. При правке с помощью обтачивающих роликов инструмент создает профиль шлифовального круга посредством контурного программного управления вдоль заданной траектории. При профильной правке геометрия обрабатываемого круга воспроизводится с помощью профиля правящего инструмента.

В неподвижном правящем инструменте используют алмазные монокристаллы в оправе или предварительно профилированные алмазы высокого качества и твердости. Алмазный монокристалл или профилированные алмазы (рис. 7.28) дают хорошие результаты при правке, но ввиду использования больших алмазов (1–2 карат) они сравнительно дороги. Поэтому эти правящие инструменты чаще всего применяют только для чистовой правки.

Правящие инструменты со множеством мелких алмазов на рабочей поверхности, удерживаемых в изнашиваемой спе-

каемой связке, дешевле по сравнению с вышеперечисленными инструментами. Однако многозерновой алмазный карандаш не обеспечивает профильную правку, так как слой алмазоносного покрытия составляет несколько миллиметров. Пластины с алмазами или алмазными иглами являются адаптивными инструментами, с помощью которых можно править простые профили.

В последние годы правящий инструмент с монокристаллическими алмазами (МКД) стал хорошей альтернативой неподвижным правящим инструментам. Поскольку МКД-пластинки расположены точно одна над другой шириною менее 1 мм коэффициент перекрытия до полного изнашивания инструмента постоянен.

Обтачивающие ролики характеризуются тем, что диапазон их действия меньше ширины шлифовального круга. Чаще всего необходимый профиль производится с помощью контурного программного управления. Эти инструменты являются исключительно адаптивными. Обтачивающие ролики применяют с правочным шпинделем (с соответствующей жесткостью, опорами, частотой вращения, распознаванием момента врезания). Используя соответствующую конструкцию обтачивающего ролика, можно надежно отрегулировать процесс шлифования. Большое число алмазов на рабочей поверхности обеспечивает постоянство размеров, конфигурацию рабочей части инструмента и его высокую стойкость. В зависимости от конструктивного исполнения можно многократно восстанавливать инструмент без основных изменений режима правки.

Конструкции обтачивающих роликов различаются прежде всего методом нанесения алмазоносного слоя (рис. 7.29). Обтачивающие ролики с радиусом $R > 0,4$ мм могут быть изготовлены с применением природных алмазов. Преимущественно обтачивающие ролики с этим типом нанесения алмазоносного слоя имеют радиус 1,5...5 мм. Этот инструмент не перешли-

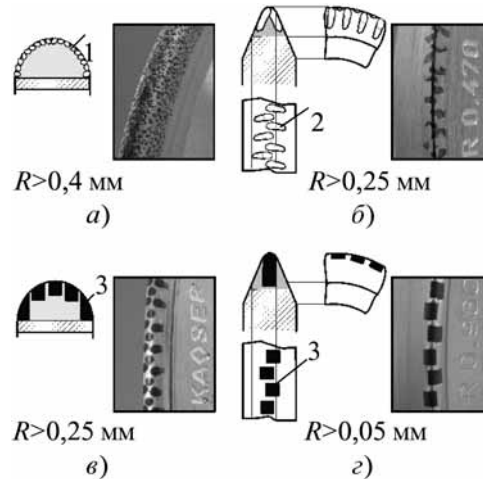


Рис. 7.29. Тип нанесения алмазного слоя обтачивающих роликов:

а, б – обтачивающие ролики с природными алмазами, размещенными случайным образом (рассеиванием) и вручную соответственно;
в, г – обтачивающие ролики с поликристаллическими алмазами, размещенными вручную;
1 – алмазные зерна; *2* – алмазные иглы;
3 – поликристаллические алмазы

фовывается (или только ограниченно). Повторное шлифование имеет смысл осуществлять только в том случае, если алмазоносный слой не поврежден, а радиус изношен незначительно.

Обтачивающие ролики с меньшими радиусами в диапазоне от 0,25 до 0,5 мм изготавливаются с использованием алмазных игл. Самое плотное нанесение алмазоносного слоя достигается благодаря размещению алмазов в "молнию": алмазы продолговатой формы лежат поочередно на боковой поверхности профиля и, прилегая вплотную, попадают в диапазон радиуса. Глубокая заделка алмазов в матрице обеспечивает прочное их крепление, необходимое для того, чтобы выдерживать большие нагрузки при предварительном профилировании круга, а затем при его чистовой правке.

Большое преимущество по сроку службы обтачивающего ролика дает нанесение алмазов в виде их поликристал-

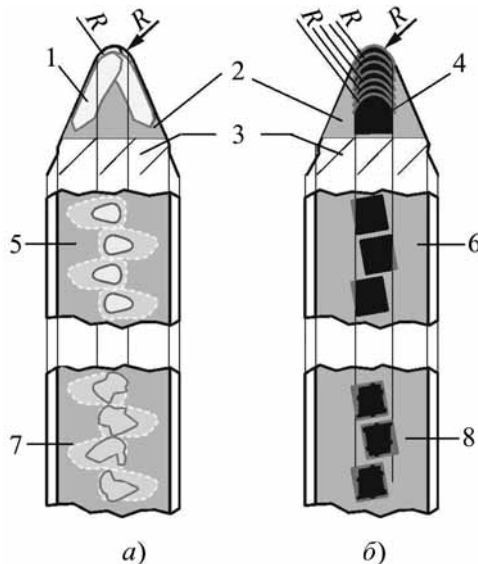


Рис. 7.30. Повторное шлифование обтачивающих роликов с природным алмазом (а), с поликристаллическим алмазом (б):
 1 – алмазные иглы; 2 – матрица; 3 – стальной корпус; 4 – пластины из поликристаллического алмаза; 5, 6 – первая заточка роликов; 7, 8 – повторное шлифование роликов

лической модификации (PKD). Поликристаллические алмазы представляют хорошую альтернативу MKD. Алмазы в форме пластинок имеют весьма хорошее сцепление в матрице и высокое сопротивление от выкрашивания. При качественном нанесении алмазоносного слоя правящие инструменты этого типа можно перешлифовывать более 10 раз.

Применение природных алмазов для обтачивающих роликов с $R < 0,25$ мм ввиду их малой стойкости ограничено. Такие инструменты можно изготовлять пока еще лишь с применением PKD-алмазов.

На рис. 7.30 приведены обтачивающие ролики с обоими типами нанесения алмазоносного слоя. Природные иглы ввиду возможности плотного размещения устанавливаются в "молнию", при PKD-исполнении алмазы размещаются в шахматном порядке. PKD-пластинки у обтачивающих роликов с радиусами $R < 0,5$ мм

размещаются в "биссектрисы". После спекания и шлифования алмазы приобретают точные радиусы и оптимальную долю рабочей поверхности. Достижимая точность формы составляет менее 0,002 мм.

Природные кристаллы (иглы) имеют дефекты и микротрещины. Поэтому инструменты с природным алмазом имеют склонность к раскалыванию, часть алмазов выкрашивается. Однако при повторном шлифовании это компенсируется посредством увеличенной "заточки" отдельных алмазов, причем сначала слегка затачиваются кромки, чтобы затем можно было воспроизвести исходный радиус обтачивающего ролика.

Стойкость правящего инструмента с природными алмазами, как правило, немного выше стойкости PKD-исполнения. Однако обтачивающие ролики, рабочая часть которых выполнена из поликристаллического алмаза, можно многократно перешлифовывать. Благодаря высокому сопротивлению разрушению и однородной структуре обтачивающие PKD-ролики не выкрашиваются. И хотя после повторного шлифования обтачивающий ролик слегка уменьшается в диаметре, режим правки идентичен режиму правки новым инструментом.

Профильные ролики. Правка с помощью профильных роликов относится к копирующим методам профилирования шлифовальных кругов. Вращающийся профильный ролик, отображающий обратный профиль шлифовального круга, врезается в шлифовальный круг. Соответствующий выбор способа нанесения алмазоносного слоя и соотношения скоростей позволяют согласовать процесс правки с задачами обработки шлифовального круга.

Профильные ролики в зубообработке применяются только при непрерывном обкатном зубошлифовании. Специальная форма представляет собой зубчатое колесо с алмазным слоем для правки хоннов или глобoidных абразивных червяков для непрерывного профильного шлифования.

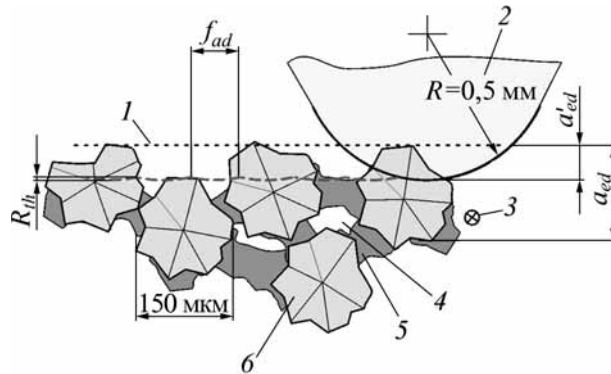


Рис. 7.31. Соотношение величин при правке алмазными обтачивающими роликами:

1 – огибающая поверхность; 2 – правящий инструмент; 3 – направление перемещения правящего инструмента; 4 – поры; 5 – мостики связки; 6 – абразивное зерно;
 $R_{th} = 2,1$ мкм – наибольшая высота неровностей профиля; f_{ad} – осевая подача;
 a'_{ed} и a_{ed} – подача на врезание для чистовой и черновой обработки соответственно

Параметры правки. Исходя из различий, обусловленных различием методов, ниже приведены параметры, которые могут существенно влиять на результат правки. Для правки обтачивающими роликами – это геометрия правящего инструмента (как правило, радиус инструмента), а также коэффициент перекрытия U_d . На результаты профильной правки прежде всего влияет тип нанесения алмазносного слоя. Вращающиеся инструменты при правке могут иметь одинаковое или противоположное направление вращения относительно шлифовального круга. У вращающихся правящих инструментов на результат правки влияет соотношение скоростей (по частоте вращения) шлифовального круга и правящего инструмента ($q_d = n_d/n_s$).

Достижение требуемой точности размеров, формы и качества обрабатываемой поверхности детали в значительной степени зависит от процесса правки. На рис. 7.31 схематично в поперечном разрезе шлифовального круга показаны соотношения величин при правке алмазными обтачивающими роликами.

Параметры правки следующие: зернистость шлифовального круга 12; радиус

рабочей поверхности алмазного обтачивающего ролика $R = 0,5$ мм; подача на врезание 20 мкм/мин; коэффициент перекрытия $U_d = 2$. Исходя из зернистости шлифовального круга 12 (средний размер зерна составляет 110...150 мкм) при правке удаляется от 30 до 100 мкм. Это приблизительно соответствует высоте выступания зерна над связкой, т.е. для последующего шлифования образуется новый слой абразивных зерен. При правке шлифовального круга для операций чистовой обработки удаляется 10...20 мкм. В результате, благодаря раскалыванию и выкрашиванию, восстанавливается только часть слоя абразивных зерен, обеспечивая тем самым топографию шлифовального круга с требуемой режущей способностью.

Обеспечить необходимую структуру поверхности шлифовального круга позволяет оптимальный выбор параметров – подачи на врезание и осевой подачи, а также подходящих режимов применения правящего инструмента. Слишком высокое давление при правке может быть причиной повреждений в виде трещин зерен или повреждений связки и привести к преждевременному вырыву зерен. Такого

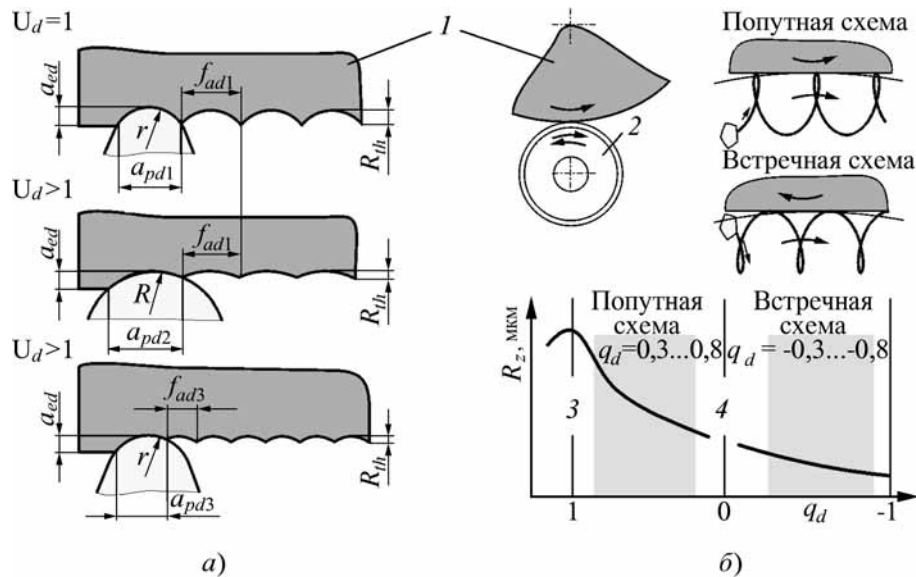


Рис. 7.32. Параметры правки: коэффициент перекрытия (а) и соотношение скоростей (б):

1 – шлифовальный круг; 2 – правящий ролик; 3 – дробление; 4 – неподвижный правящий инструмент

вида повреждения обуславливают низкую стойкость шлифовального круга или более короткие интервалы правки.

Важным параметром при правке алмазными обтачивающими роликами является коэффициент перекрытия U_d . Соотношение величин U_d обтачивающего правящего инструмента (неподвижного или вращающегося) и осевой подачи f_{ad} показывает, как часто точка на обрабатываемой поверхности шлифовального круга вступает в контакт с правящим инструментом.

На практике коэффициент перекрытия для черновой обработки составляет $U_d = 2 \dots 3$; для чистовой обработки $U_d = 4 \dots 6$. На рис. 7.32 приведены геометрические соотношения при правке обтачивающим правящим инструментом (с радиусом r) для одинаковых подач на врезание a_{ed} . При правке с $U_d = 1$, f_{ad} равна диапазону воздействия правящего инструмента a_{pd} ($U_d = a_{pd}/f_{ad}$). Теоретическая глубина профилирования R_{th} точно соот-

ветствует a_{ed} . Улучшение качества поверхности шлифовального круга можно достичь, если при одинаковых параметрах правки увеличивать радиус обтачивающего правящего инструмента (радиус R). Вместе с этим увеличивается диапазон действия правящего инструмента, что приводит к уменьшению теоретической высоты неровностей профиля. Другой возможностью улучшения качества поверхности при неизменной геометрии резания по сравнению с первой ситуацией (радиус r) является уменьшение осевой подачи. Однако это связано с увеличением продолжительности процесса правки.

У вращающихся правящих инструментов, как отмечалось выше, на результат правки влияет соотношение скоростей q_d , которое определяется как отношение окружных скоростей вращающегося правящего инструмента (профильный и обтачивающий ролики) и шлифовального круга. При попутной правке ($q_d > 0$) отдельные алмазы правящего инструмента попа-

дают на поверхность шлифовального круга, двигаясь по циклоиде. Вследствие таких ударных нагрузок происходит значительное растрескивание поверхности шлифовального круга, что приводит, в свою очередь, к большим значениям параметров шероховатости поверхности детали. При встречной правке ($q_d < 0$), вследствие большей протяженности траектории алмазов по правящей поверхности шлифовального круга, происходит равномерная правка, результатом которой является улучшение качества обрабатываемой поверхности детали. В зависимости от конкретных условий правки часто применяют следующие соотношения скоростей: $q_d = 0,3 \dots 0,8$ или $q_d = -0,3 \dots -0,8$.

Особым случаем является дробление ($q_d = 1$). Скорости между шлифовальным кругом и правящим инструментом равны, оба инструмента обкатывают друг друга. Нагрузки при правке ведут к раздавливанию мостиков связи. При точечном дроблении это соотношение достигается с помощью обтачивающего ролика и используется для правки алмазных шлифовальных кругов и кругов из кубического нитрида бора (КНБ) на керамических связках.

Выбор ролика – назначение конструкции и характеристики правящего ролика – производят в соответствии с применяемой технологической схемой зубошлифования. Например, шлифование по методу обката с периодическим делением и профильное шлифование из-за их различной кинематики можно сравнивать друг с другом лишь условно (рис. 7.33).

Первое – это метод шлифования с относительно простым контуром шлифовального круга, в простейшем случае (создание эвольвенты) – шлифование с помощью круга, правящегося непосредственно под углом исходного контура. При односторонней обработке толщина шлифовального круга меньше ширины впадин между зубьями. Профиль зуба во время шлифования создается благодаря обкаточ-

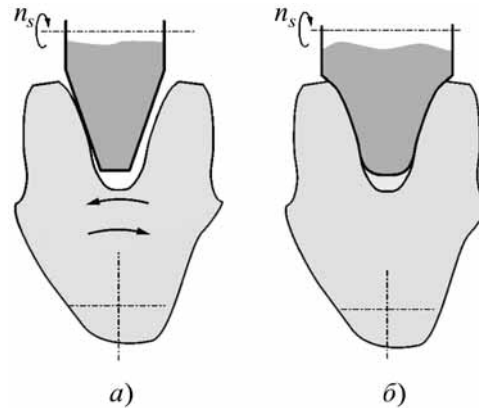


Рис. 7.33. Методы зубошлифования:
а – шлифование по методу обката с периодическим делением; б – профильное шлифование

ному движению, противоположная боковая сторона – благодаря смене направления вращения. Таким же образом с высокой точностью можно обрабатывать и другие зубчатые колеса.

На шлифовальных станках старого поколения для правки шлифовальных кругов применяют преимущественно неподвижные правящие инструменты. Изменения профиля всего шлифовального круга с удалением большого слоя, как правило, не требуется, поэтому самые распространенные правящие инструменты (алмазный монокристалл или профилированный алмаз) имеют приемлемую стойкость. В некоторых случаях используют правящие инструменты с алмазными пластинами в два или три ряда с более высокой стойкостью, полученные по технологии осаждения в газовой среде. На станках нового поколения ввиду лучших результатов правки применяют в большинстве случаев алмазные обтачивающие ролики.

При профильном шлифовании абразивный инструмент повторяет форму впадины зубьев (двустороннее шлифование). Полное изменение профиля шлифовального круга необходимо для обработки зубчатого колеса с новой геометрией.

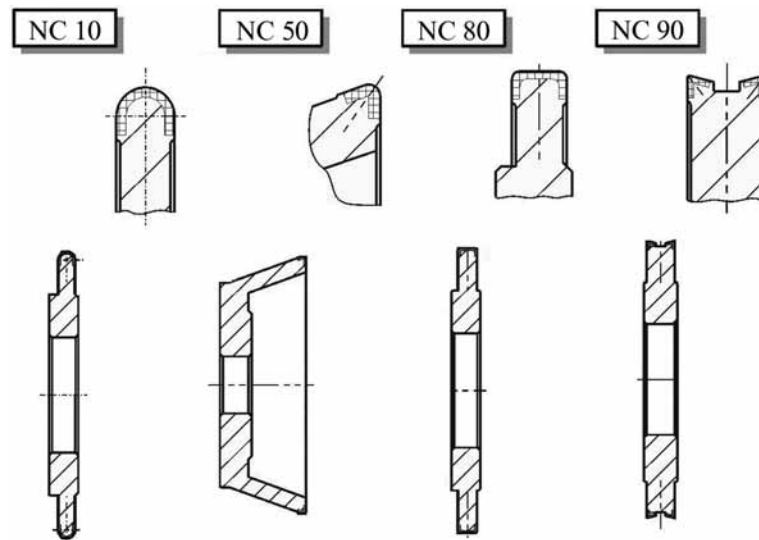


Рис. 7.34. Алмазные обтачивающие ролики для правки профильных шлифовальных кругов

Этот метод эффективен в производстве зубчатых колес благодаря точности и высокой стойкости алмазных обтачивающих роликов. Алмазные правящие инструменты используют на станке часто несколько недель или месяцев, хотя основная правка осуществляется с подачей от 0,5 мм и более. Тот же инструмент, тем не менее, используют и для чистовой правки контура шлифовального круга.

На рис. 7.34 приведены обтачивающие ролики, часто используемые для профильно-шлифовальных станков. Станки некоторых модификаций работают двумя шпинделями и двумя роликами (например, форма NC50) для правки левых или правых боковых поверхностей. На других станках применяют монтируемый на шпинделе обтачивающий ролик большего диаметра (форма NC10, NC80), который благодаря двухстороннему нанесению алмазоносного слоя правит обе боковые поверхности шлифовального круга.

Ролики могут быть использованы и как комплект, применяемый на двух

шпинделях. Благодаря перестановке обтачивающих роликов работают обе стороны инструментов. Алмазные обтачивающие ролики могут быть изготовлены с радиусами округления $R = 0,2 \dots 2$ мм в зависимости от возможностей станков и желания заказчика. В последнее время наблюдается тенденция использования алмазных правящих роликов с $R = 0,5$ мм.

Имеется опыт, когда после правки обтачивающим роликом фирмы Dr. Kaiser Diamantwerkzeuge с радиусом 0,1 мм на станке мод. P600G фирмы Gleason-Pfauter, получали зубчатые колеса со степенью точности 3 (при радиусе 0,5 мм степень точности была 4) и с шероховатостью обработанной поверхности, позволявшей исключить ранее применявшуюся операцию зубохонингования.

Часто также применяют обтачивающие ролики больших диаметров, например, для обработки зубчатых колес с большими модулями, что обеспечивает более высокую стойкость правящего инструмента. При непрерывном обкатном шлифовании применяют червячный абра-

живный круг в виде контура зубчатой рейки. Форма эвольвенты зубчатых колес создается благодаря обкатке червячного абразивного круга и зубчатого колеса (рис. 7.35, *а*). Во время шлифования вследствие тангенциального смещения зубчатого колеса ("шифтинг") по отношению к червячному кругу в контакт постоянно вводится новая часть поверхности круга с хорошей режущей способностью. В соответствии с шириной шлифовального круга и скоростью тангенциального смещения между процессами правки может обрабатываться ряд зубчатых колес.

Точность червячного абразивного круга в значительной степени определяет точность зубчатого зацепления. Для правки используют комплект алмазных дисков или алмазные профилирующие ролики. Принципиально метод правки можно сравнить с изготовлением резьбы. На рис. 7.35, *б* показана правка червячного абразивного круга с помощью алмазных дисков. Круг вращается с относительно небольшой частотой (100 мин^{-1}). Радиальная подача правящих дисков, вращающихся с частотой приблизительно 3000 мин^{-1} , осуществляется в точках возврата оси движения подачи. При этом соотношение скоростей $q_d = 10$, что намного отличается от обычных соотношений правки.

Вместе с тем, требования к правящим инструментам для непрерывного обкатного шлифования нельзя сравнивать с требованиями к обычным правящим инструментам для профильных шлифовальных кругов или кругов, работающих периферией. Отображение геометрии зубчатого колеса на червячном круге – деление, высота зуба – осуществляется алмазными правящими дисками посредством регулирования расстояния между ними и глубины профилирования соответственно. Однако модификация профиля, характерная для зубчатого колеса, должна быть отображена в правящем инструменте. Для создания требуемой выпуклости высоты, среза головки и профиля ножки зуба или фаски на конце головки зуба необходимы

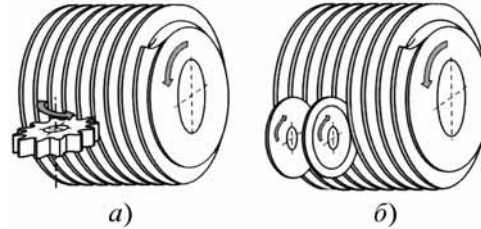


Рис. 7.35. Непрерывное шлифование по методу обката:

а – схема шлифования; *б* – правка червячного абразивного круга

специальные правящие инструменты. Поэтому точность инструментов определяет непосредственно точность боковых сторон зубчатого колеса.

Правящие инструменты для непрерывного обкатного шлифования преимущественно изготавливают гальваническим методом. Комплект алмазных дисков используют для нескольких сотен процессов правки (для червячных абразивных кругов из микрокристаллического корунда). После этого из-за неточности профиля зубчатого колеса алмазоносный слой может быть повторно отшлифован производителем алмазных инструментов. Если слой не поврежден, операция повторного шлифования может осуществляться до 4 раз. После этого, как правило, наносится новый алмазоносный слой. Поскольку эти инструменты нагружены больше всего в области головки (внешний диаметр алмазного диска), то его можно защитить от преждевременного износа, например с помощью армирования кромок поликристаллическими алмазами.

В настоящее время профильно-шлифовальные, включая и зубошлифовальные станки фирм Gleason-Pfauter (США–Германия), Oerlikon, Klingelnberg (Швейцария), Kapp-Niles, Blohm, Brand (Германия), Normac, Cincinnati (США) и другие (всего более 30 фирм) оснащаются обтачивающими алмазными роликами, изготовленными немецкой фирмой Dr. Kaiser Diamantwerkzeuge. Конструк-

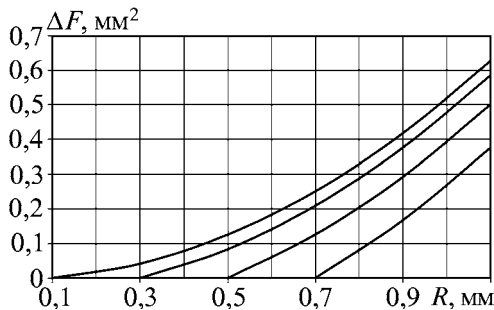


Рис.7.36. Изменение площади сечения алмаза, удаляемого при восстановлении, в зависимости от увеличения его радиуса округления при износе

тивное оформление и характеристики этих роликов адаптированы к конкретным типам станков и применяемым на них технологическим схемам шлифования.

Эксплуатация правящих роликов. Стойкость алмазных правящих роликов обычно очень велика и обеспечивает несколько тысяч часов непрерывной работы станка. Ресурс их работы зависит от характеристики шлифовального круга, требований к точности его профиля и режущей способности, формы и характеристики ролика (прежде всего состояния алмазозоносного покрытия и радиуса округления рабочей поверхности), частоты и условий правки и т.д. Ресурс эксплуатации определяется также качеством изготовления правящих роликов и достижением предельно возможного радиуса округления рабочих поверхностей для обтачивающих роликов.

При технически грамотной эксплуатации ресурс алмазных обтачивающих роликов можно продлить восстановлением их рабочей поверхности до заданного радиуса округления. В зависимости от размеров используемых алмазов и степени их изношенности такое восстановление можно производить от 2 до 5–6 раз. Стоимость восстановления составляет 20...30 % от стоимости изготовления нового ролика.

Трудоемкость восстановления роликов пропорциональна степени их изно-

шенности. На рис. 7.36 показано, как изменяется площадь сечения алмаза ΔF , которую необходимо сошлифовать для восстановления исходного радиуса соответственно 0,1; 0,3; 0,5; и 0,7 мм в зависимости от его увеличения при эксплуатации.

Для эффективной эксплуатации алмазных обтачивающих роликов целесообразно восстанавливать их при увеличении исходного радиуса не более чем на 30...40 %. В противном случае ролик восстановлению не подлежит.

Современные зубошлифовальные станки позволяют гибко реагировать на изменения номенклатуры обрабатываемых зубчатых колес, обеспечивая их профилирование, чистовую обработку за счет использования правящегося абразивного инструмента стандартных форм и размеров и универсальных правящих средств, в основном алмазных обтачивающих роликов. Промышленный опыт свидетельствует, что каждый станок для этих целей должен быть укомплектован соответствующим набором роликов.

При комплектации станка "Opal-80" фирмы Oerlikon двумя роликами NC80-GN с диаметрами 142 и 100 мм и радиусом 1,2 мм производства фирмы Dr. Kaiser Diamantwerkzeuge обеспечивается профильное глубинное и чистовое шлифование зубчатых колес с числом зубьев от 8 до 180: наружного зацепления с модулями от 1 до 16 мм и для колес внутреннего зацепления – от 1 до 7 мм.

Обтачивающие ролики NC80-GN и NC90-HN с радиусами 0,1, 0,3 и 0,5 мм (фирмы Dr. Kaiser Diamantwerkzeuge), применяемые на зубошлифовальном станке мод. P600G фирмы Gleason-Pfauter, обеспечивают профилирование и чистовое шлифование цилиндрических колес наружного и внутреннего зацепления с модулем до 10 мм, числом зубьев до 122 и шириной венца до 105 мм со степенью точности 3...4 и шероховатостью обработанной поверхности по $Ra \leq 0,16$ мкм.

7.6. ТОЧНОСТЬ И КАЧЕСТВО ОБРАБОТКИ ПРОФИЛЬНЫМ ГЛУБИННЫМ ШЛИФОВАНИЕМ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

Формирование поверхностного слоя при глубинном шлифовании зубчатых колес из легированных сталей происходит под влиянием неравномерного термодинамического воздействия на обрабатываемую деталь и, как следствие, возникновения неоднородных упругопластических деформаций по сечению профиля впадины между смежными зубьями и структурно-фазовых превращений от нагрева и охлаждения металла. Это приводит к искажению профиля зубьев, возникновению шаговой погрешности и снижению кинематической точности зубчатого колеса и появлению дефектов шлифовочного характера на обработанных поверхностях.

Точность обработки зубчатых колес. Как показывает опыт, точность обработки зубчатых колес зависит не только от жесткости и кинематической точности станка, но и от принятых режимов шлифования, характеристики инструмента и условий его правки.

В п. 7.4 описан пример профильного глубинного шлифования одинаковых зубчатых колес на станке мод. Р600G шлифовальным кругом одной характеристики.

При варианте обработки на более мягком, на первый взгляд, режиме профилирования, когда общий припуск разбит на 5 проходов, была достигнута точность зубчатого колеса ниже, чем при оптимальном варианте за 2 прохода.

В качестве примера, иллюстрирующего точностные возможности данного процесса обработки, приведены данные измерений прямозубых зубчатых колес, которые имеют следующие технические характеристики: модуль – 5 мм, угол зацепления – 20°, число зубьев – 23, ширина зубчатого венца – 80 мм. Точность зубчатых колес по DIN 3062 – 6-й квалитет.

Обработка зубчатых колес производилась методом профильного глубинного шлифования на станке мод. Р600G высокопористым кругом с характеристикой 25А 16П М2 12 К. Предварительное профилирование зубьев выполнялось методом глубинного шлифования за 2 прохода, а после цементации с закалкой чистовое шлифование производилось также за 2 прохода. Измерение параметров зацепления проводилось на специализированном зубоизмерительном центре мод. Р 100 CNC фирмы Klingelnberg. Результаты измерений, содержащие информацию о точности выполнения профилей и линий зубьев, приведены в табл. 7.13.

7.13. Параметры точности зубчатого колеса

Параметр точности	Обозначение	Допуск по чертежу, мкм	Фактическая точность, мкм
Общая погрешность профиля	F_{α}	12	6,4...7,9
Отклонение формы профиля	$f_{f\alpha}$	10	6,4...6,8
Отклонение угла профиля	$f_{H\alpha}$	± 7	-1,5...2,6
Общая погрешность линии зуба	F_{β}	12	0,9...5,4
Отклонение формы линии зуба	$F_{f\beta}$	9	0,4...0,6
Отклонение угла линии зуба	$F_{H\beta}$	10	1,2...5,8

Полученная высокая точность обработки зубчатого колеса обеспечивается за счет особенности кинематики процесса профильного шлифования (отсутствие длинных и сложных кинематических цепей, управление от высокоразвитой системы ЧПУ) и высокой размерной стойкости абразивного инструмента.

Устранение прижогов. Тепловое воздействие при шлифовании часто сопровождается структурными изменениями в поверхностном слое обрабатываемого материала в виде прижогов. В зависимости от мощности теплового источника, времени его действия, а также теплостойкости обрабатываемой стали, структурные изменения могут развиваться на различную глубину и иметь различный характер. После наиболее интенсивного теплового воздействия поверхностный слой представляет собой аустенито-мартенсит вторичной закалки, под которым располагается зона вторично отпущенного металла со структурой троостомартенсита и троостита. При уменьшении нагрева поверхностного слоя в нем образуется структура вторичного отпуска, переходящая через все стадии отпуска в основную структуру мартенсита закалки.

Вероятность появления прижогов при зубошлифовании зависит не только от технологических условий обработки, но и от марки обрабатываемой стали. Для теплостойких сталей типа 20Х3МВФ-Ш, 16Х3НВФМБ-Ш эта вероятность ниже, чем у нетеплостойких сталей типа 12Х2Н4А и др. [61].

При травлении участки с измененной микроструктурой после зубошлифования обычно вытянуты вдоль зуба или выявляются в виде штриховой сетки в зависимости от метода обработки. Наибольшее количество штрихов прижогов и их максимальная интенсивность, как правило, наблюдается на головках шлифованных зубьев. Ближе к ножкам зубьев их количество и интенсивность уменьшаются или они вообще отсутствуют.

Структурные изменения вызывают сопутствующие изменения твердости и напряженного состояния поверхностного слоя обработанных зубьев. Микротвердость в зонах прижогов снижается, а в поверхностном слое формируются растягивающие остаточные напряжения. Зубчатые колеса с прижогами имеют выносливость при изгибе в 1,4...1,6 раз меньше, чем шлифованные колеса без прижогов. Соответственно долговечность по контактной выносливости у зубчатых колес с прижогами в 3,5 раз ниже [61].

Возникновение и развитие дефектов шлифовочного характера, прежде всего, прижогов и микротрещин, обусловленных структурно-фазовыми изменениями в поверхностном слое, зависит от температуры и времени ее воздействия. В применяемых схемах зубошлифования интенсивность нагрева и степень ее локализации сильно разнятся и связаны с кинематическими особенностями контактирования шлифовального круга с профилируемой поверхностью зубьев. При оптимальных условиях зубошлифования по различным схемам обката или профильной обработки высокопористыми абразивными кругами, как показали экспериментальные исследования, производственные испытания и опыт промышленного применения, прижоги и микротрещины на обработанных поверхностях зубьев не наблюдаются.

Общей рекомендацией предотвращения шлифовочных дефектов при всех схемах зубошлифования является снижение интенсивности теплового источника и времени нагрева обрабатываемой зоны. Применение новых высокопористых кругов уже само по себе снижает температуру нагрева на 300...400 °С по сравнению со шлифовальными кругами нормальной структуры. В сочетании с оптимизацией режима обработки за счет увеличения скорости относительного перемещения инструмента и заготовки, а также глубины резания их применение позволяет повысить скорость съема материала и умень-

шить время действия теплового источника на обрабатываемую поверхность, т.е. создать предпосылки высокопроизводительного и бездефектного шлифования. Уровень интенсификации параметров режима обработки зависит от выбранной характеристики высокопористого шлифовального круга.

Таким образом, учитывая значительное снижение эксплуатационных свойств зубчатых колес при образовании дефектных слоев с прижогами, внедрение новых технологий бесприжогового зубошлифования является важным условием обеспечения высокой надежности и долговечности зубчатых колес в эксплуатации.

Результаты металлографического анализа. В табл. 7.14 представлены данные по влиянию различных условий профильного глубинного шлифования зубчатой рейки из закаленной стали 16ХЗНВФМБ-Ш (40 HRC) на формирование свойств поверхностного слоя. Впадина между соседними зубьями шириной 2 или 4 мм профилировалась за 4–6 проходов при постоянной скорости обработки 20 м/с с переменными параметрами режима шлифования t и S_d высокопористыми шлифовальными кругами с характеристиками 25А 12П ВМ2 14 К5, 25А 12П М2 16 К5 и 25А 16П М2 12 К5 при различных кинематических схемах взаимодействия инструмента и заготовки. Суммарная номинальная глубина впадины после многопроходной обработки изменялась от 5 до 6,1 мм. Качество поверхностного слоя по изменению микроструктуры и микротвердости оценивалось после завершающего прохода.

В процессе формообразования профиля после каждого прохода на обработанных поверхностях зубьев визуально фиксировались повреждения шлифовочного характера – прижоги, следы дробления и др.

Практически во всех случаях профильного глубинного шлифования зубчатой рейки из стали 16ХЗНВФМБ-Ш ее исходная структура мартенсита отпуска

трансформируется в структуру вторичной закалки в тонком приповерхностном слое с повышением микротвердости и последующим переходом в зону вторичного отпуска. При неблагоприятных условиях глубинного шлифования в поверхностном слое наблюдается структура вторичной закалки с повышенной микротвердостью по впадинам и профилю зуба в виде эллипса с шириной по центру от 0,2 до 0,86 мм и длиной от 1,28 до 5 мм.

Результаты металлографического исследования микроструктуры пазов после профильного шлифования свидетельствуют о том, что геометрия паза (площадь сечения), схема и режимы обработки, а также характеристика шлифовального круга оказывают большое влияние на характер формирования поверхностного слоя – глубину измененного слоя и степень его наклепа.

При многопроходном профилировании паза зубчатой рейки большое влияние на качество обработки оказывает технологическая наследственность от предыдущих проходов и их количество. В этой связи не всегда чистовые завершающие проходы шлифовального круга могут обеспечить формирование поверхностного слоя с минимальными искажениями его структуры. В качестве примера можно сравнить результаты обработки двух различных вариантов (см. пп. 1 и 3 табл. 7.14). При первом варианте за 4 прохода, несмотря на большую плотность затрачиваемой энергии – 16,2 Дж/мм², качество обработки лучше, чем при другом варианте за 6 проходов при меньшем уровне затрачиваемой энергии – 7,68 Дж/мм². Этот вывод подтверждает и пример 4 табл. 7.14.

Как дополнительный фактор при анализе рассмотренных вариантов обработки необходимо учитывать и схему крепления заготовки, и направление движения и вращения шлифовального круга относительно нее. Эксперименты проводились на прямоугольной рейке, которая консольно крепилась в тисках, обеспечи-

7.14. Качество обработки при различных вариантах профильного глубинного шлифования зубчатой рейки из закаленной стали 16ХЗНВФМБ-Ш

№ п/п	Условия шлифования	Режим обработки			Глубина измененного слоя, мм	Микротвердость, МПа		Степень наклепа, %	Примечание
		t , мм	S , мм/мин	N , кВт		Поверхность	Сердцевина		
1	Шлифовальный круг 25А 12П ВМ2 14 К5; схема вертикальная встречная; ширина впадины 4 мм	1,0	20	1,08...1,26	0,19...0,23	5330	4490	18,7	После первых 3 проходов обработанная поверхность чистая, после 4-го прохода – сильный прижог
		1,0	20	1,26					
		1,0	30	1,08					
		2,0	30	3,24					
2		2,6	30	2,16	0,23	5330	4490	18,7	После первого прохода сильный прижог, в дальнейшем формируется чистая поверхность
		1,0	30	1,26					
		1,0	30	1,62					
		0,5	30	1,26					
3	Шлифовальный круг 25А 12П ВМ2 14 К5; схема вертикальная попутная; ширина впадины 2 мм	2,0	40	1,44...1,62	0,61...0,86	5330	4490	18,7	Прижог кромок зубьев Прижог увеличился Формируется чистая поверхность То же Появился прижог Прижог удален
		1,5	50	2,16					
		1,0	60	1,26					
		0,5	100	1,26					
		0,7	100	2,16					
		0,1	100	0,72					
4		1,5	40	0,9...1,08	0,13...0,61	5330	4120... 4490	18,7... 29,4	Прижог на выходе круга Прижог сохраняется Формируется бесприжоговая поверхность
		1,0	50	1,08					
		1,0	50	1,26...1,44					
		0,7	60	1,08					
		0,7	60	1,26...1,44					
		0,3	90	0,72					

Продолжение табл. 7.14

№ п/п	Условия шлифования	Режим обработки			Глубина измененно- го слоя, мм	Микротвердость, МПа		Степень накле- па, %	Примечание
		t , мм	$S_{\text{ш}}$, мм/мин	N , кВт		Поверх- ность	Сердце- вина		
5	Шлифовальный круг 25А 12П ВМ2 14 К5; схема горизонтальная попутная;	2,0	40	0,8...1,08	0,023	5600	4490	24,7	На всех проходах формируется чистая поверхность
		1,5	50	1,26					
		1,5	50	1,08					
		1,0	70	1,26					
6	Шлифовальный круг 25А 12П ВМ2 14 К5; схема горизонтальная попутная;	2,5	40	1,08...1,26	0,01	5600	4120... 4490	24,4... 35,9	Во всех случаях прижоги не наблюдались
		1,5	50	1,8					
		1,0	70	1,98...2,16					
		1,0	70	2,16					
7	Шлифовальный круг 25А 12П ВМ2 14 К5; схема горизонтальная встречная; ширина впадины 2 мм	2,0	40	1,08	Изменений в структуре не обнару- жено	5330	4490	18,7	Прижог на поверхности Поверхность чистая
		1,5	40	1,26...1,44					
		1,5	40	1,98					
		1,0	60	3,72					
		0,1	60	0,72					
8	Шлифовальный круг 25А 12П М2 16 К5; схема горизонтальная встречная; ширина впадины 2 мм	2,0	40	1,8...2,16	0,01	4810	4120... 4490	7,1... 16,7	Следы дробления и при- жога на поверхности Поверхность чистая без прижогов
		1,5	40	1,8...2,88					
		1,5	30	1,98					
		1,0	20	1,98					

Продолжение табл. 7.14

№ п/п	Условия шлифования	Режим обработки			Глубина изменения слоя, мм	Микротвердость, МПа		Степень накле- па, %	Примечание
		l , мм	$S_{\text{ш}}$, мм/мин	N , кВт		Поверх- ность	Сердце- вина		
9	Шлифовальный круг 25А 12П М2 16 К5; схема горизонтальная встречная; ширина впадины 2 мм	2,5	20	1,8...2,44	Изменений в структуре не обнару- жено	4810	4120... 4490	7,1... 16,7	Следы дробления на об- работанной поверхности Поверхность чистая
		1,5	20	1,8					
		1,5	30	1,8...2,88					
		0,5	50	1,26...1,44					
10		3,0	20	2,16...2,7	Изменений в структуре не обнару- жено	4810	4120... 4490	7,1... 16,7	Следы дробления на по- верхности Следы дробления, при- жог
		1,5	30	1,8					
		1,0	40	1,98					
		0,5	70	2,8...3,6					
11	Шлифовальный круг 25А 16П М2 12 К5; схема горизонтальная встречная; ширина впадины 2 мм	3,0	20	2,44	Изменений в структуре не обнару- жено	4910	4120... 4490	9,3... 19,2	Во всех случаях прижоги и следы дробления не наблюдались
		1,5	30	1,62					
		1,0	40	1,8					
		0,5	70	1,98					

вая возможность реализации горизонтальной и вертикальной схем профилирования. Безусловно, что для этих условий более предпочтительной для глубинного шлифования является горизонтальная схема, при которой достигается более высокая жесткость технологической системы резания.

При назначении характеристики высокопористого шлифовального круга целесообразней использовать инструмент с большей зернистостью и меньшей структурой, чем с более мелким зерном и большим номером структуры.

После анализа приведенных в табл. 7.14 результатов можно сделать заключение, что оптимальными условиями профильного глубинного шлифования зубчатых колес с точки зрения формирования поверхностного слоя с минимальными структурными изменениями является горизонтальная встречная схема обработки с минимальным числом проходов высокопористым шлифовальным кругом с характеристикой 25А 16П М2 12 К5.

Помимо многопроходного профилирования паза зубчатой рейки были проведены эксперименты по оценке прямого влияния режима глубинного шлифования на формирование свойств поверхностного слоя. Профилирование паза шириной 2 мм выполнялось при оптимальных условиях шлифования кругом с характеристикой 25А 16П М2 12 К5 при горизонтальной встречной схеме обработки. Глубина прохода изменялась от 0,5 до 3 мм, скорость продольного перемещения стола выбиралась таким образом, чтобы обеспечить постоянство произведения $tS_d = 60 \text{ мм}^2/\text{мин}$.

Результаты металлографического исследования поверхностного слоя после обработки показаны на рис. 7.37. Несмотря на то, что сохраняется постоянным произведение tS_d , глубина измененного слоя h и степень наклепа обработанной поверхности увеличивается с возрастанием глубины прохода t . Это объясняется тем, что глубина резания при профилировании зубьев неявным образом влияет на

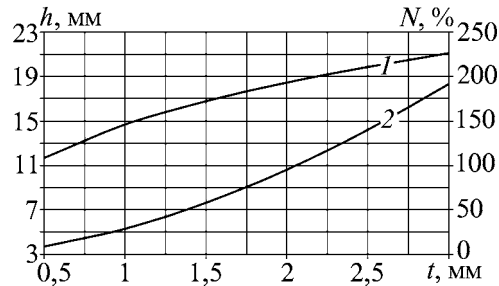


Рис. 7.37. Влияние глубины резания на глубину h (1) и степень наклепа N (2) поверхностного слоя при шлифовании кругом с характеристикой 25А16П М2 12 К5

фактический съём материала и, соответственно, на термодинамическую напряженность процесса глубинного шлифования. При увеличении глубины t от 0,5 до 3 мм, или в 6 раз, расчетная площадь сечения профилируемого паза зубчатой рейки возрастает от $1,09 \text{ мм}^2$ до $9,28 \text{ мм}^2$, или в 8,5 раз, а фактическая скорость съема металла с $130,9 \text{ мм}^3/\text{мин}$ (при $t = 0,5 \text{ мм}$, $S_d = 120 \text{ мм}/\text{мин}$) до $185,5 \text{ мм}^3/\text{мин}$ (при $t = 3 \text{ мм}$, $S_d = 20 \text{ мм}/\text{мин}$), или на 42 %.

На рис. 7.38 показаны примеры структурных изменений в поверхностном слое впадин прямозубой рейки из стали 16ХЗНВФМБ-Ш после профильного шлифования в соответствии с условиями обработки по табл. 7.14 (a — п. 3; b — п. 1; $в$ — п. 4; $г$ — п. 2). При оптимальных условиях профильного глубинного шлифования зубчатой рейки структурных изменений в поверхностном слое не наблюдается (рис. 7.39).

Остаточные напряжения. Величина, знак и характер распределения остаточных напряжений в поверхностном слое зубьев, обработанных различными методами шлифования, определялись механическим методом по Н.Н. Давиденкову на компьютеризированном комплексе контроля остаточных напряжений.

Образцы для исследований вырезались электроэрозионным способом из прямозубой рейки и зубчатого колеса. Пря-

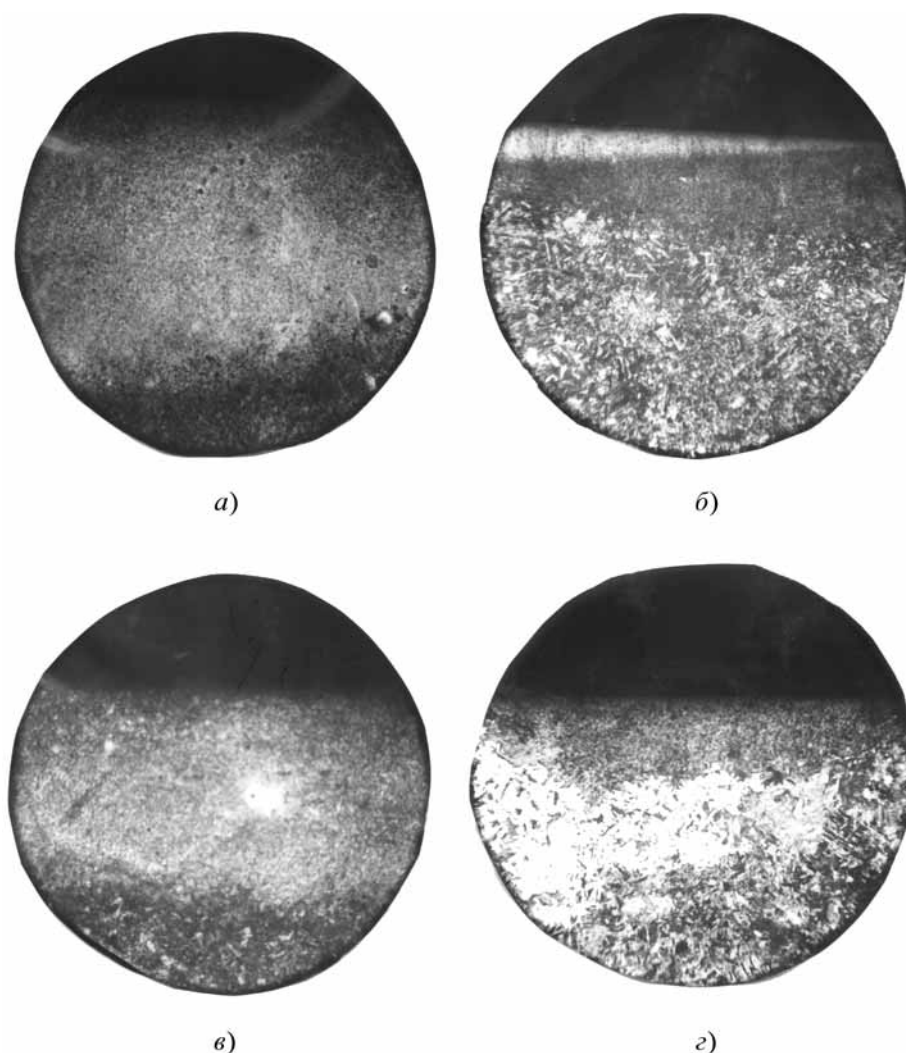


Рис. 7.38. Структурные изменения в поверхностном слое зубчатой рейки

мозубая рейка из стали 16ХЗНВФМБ-Ш, закаленная на твердость 40 HRC, с трапецеидальным профилем с углом 30° и шириной впадины 2 мм обрабатывалась высокопористым кругом с характеристикой 25A 16П M2 12 K при скорости 30 м/с. Образцы для измерения остаточных напряжений размером $25 \times 2 \times 4$ мм вырезались вдоль направления зуба рейки.

Зубчатое колесо из стали 14ХГСН2МА после цементации и закалки на твердость 64 HRC с модулем 4 мм, $z = 23$, и шириной венца 60 мм обрабатывалось кругом аналогичной характеристики на профилешлифовальном станке мод. Р600G при скорости круга 30 м/с и вертикальной подаче 800 мм/мин. Образцы размером $60 \times 2 \times 4$ мм вырезались из зубча-

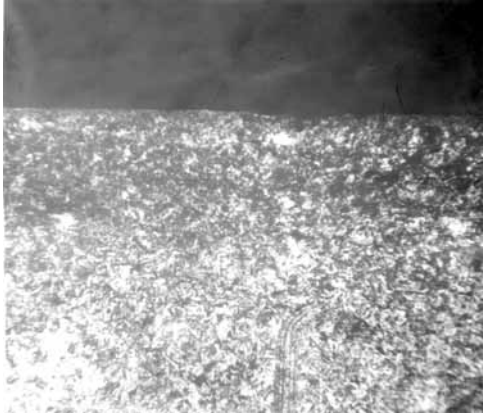


Рис. 7.39. Поверхностный слой зубчатой рейки без структурных изменений

того колеса у головки зуба вдоль его направления.

На рис. 7.40, *а* показана эпюра распределения остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя образцов, вырезанных из прямозубой рейки. Представлено три варианта профилирования зубьев: за один проход с глубиной 8 мм и скоростью стола 60 мм/мин (образец 1), за 4 прохода с различной глубиной 2,6; 1,5; 1,0 и 0,5 мм при скорости стола 30 мм/мин (см. табл. 7.14, п. 2 – образец 2) и за 4 прохода с различной глубиной 3,0; 1,5; 1,0; 0,5 мм и скоростью стола соответственно 20; 30; 40 и 70 мм/мин (см. табл. 7.14, п. 11 – образец 3).

Результаты измерения остаточных напряжений на зубчатом колесе представлены на рис. 7.40 (*б*). Образцы 1, 2, и 5 получены после профильного шлифования впадины за 3 прохода ($t = 0,1; 0,1$ и $0,05$ мм), а образец 4 – после шлифования впадины за 12 проходов с глубиной от 0,1 до 0,005 мм.

После профилирования зубьев методом глубинного шлифования на поверхности рейки (образец 1) наводятся сжимающие напряжения до 240 МПа, которые на глубине около 10...20 мкм переходят в небольшие растягивающие напряжения до 34 МПа. При шлифовании за 4 прохода с различными глубинами и ско-

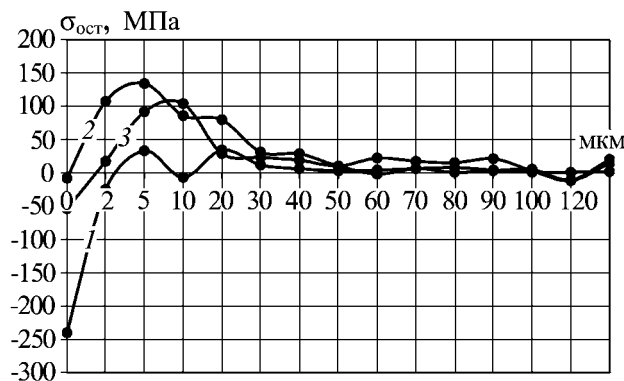
ростями стола на поверхности образца также формируются сжимающие напряжения, равные 8 МПа (образец 2) и 54 МПа (образец 3), которые быстро переходят в растягивающие напряжения до 104...134 МПа. При этом глубина распространения остаточных напряжений коррелируется с данными измерения глубины наклепанного слоя (см. табл. 7.14, пп. 2 и 11).

При чистовом профильном шлифовании зубчатого колеса за один проход (образцы 1, 2 и 5) получены практически стабильные результаты по величине и характеру распределения остаточных напряжений. На поверхности наводятся сжимающие напряжения $\sigma_{сж} = 5...42$ МПа, которые на глубине около 5 мкм переходят в растягивающие напряжения с максимальным значением 55...62 МПа с общей глубиной распространения до 90 мкм.

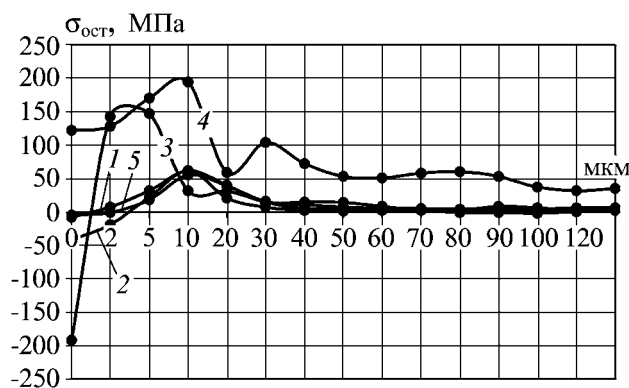
С увеличением числа проходов картина распределения остаточных напряжений существенно изменяется. При чистовом шлифовании за 3 прохода (образец 3) высокий уровень сжимающих напряжений на поверхности (192 МПа) на глубине 2 мкм резко переходит в растягивающие напряжения, равные 143...147 МПа.

При многопроходной обработке, ранее применявшейся на заводе (образец 4), на поверхности наводятся растягивающие напряжения $\sigma_{раст} = 122$ МПа, которые на глубине 10 мкм увеличиваются до 194 МПа и затем медленно уменьшаются до глубины 200 мкм.

Обобщая полученные результаты в целом, можно констатировать, что остаточные напряжения, глубина и степень наклепа как показатели качества поверхностного слоя взаимосвязаны между собой. Отсутствие заметных структурных и фазовых превращений свидетельствует о низкой температуре нагрева и небольшом силовом воздействии за счет однородного распределения нагрузки по площадке контакта при более высоком давлении на срезаемый слой, чем на поверхностный слой профилируемого зуба.



а)



б)

Рис. 7.40. Эпюры остаточных напряжений в поверхностном слое зуба зубчатой рейки (а) и зубчатого колеса (б) после глубинного шлифования

В монографии [61] подробно рассмотрено влияние структурно-фазовых изменений, микротвердости, остаточных напряжений, наличия и характера прижогов в поверхностных слоях зубьев на эксплуатационные свойства зубчатых колес после шлифования, включая также применение химико-термической обработки. Определены требования по структурному и напряженно-деформированному состоянию поверхностных слоев зубьев, при котором достигаются максимальные значения долговечности, выносливости при изгибе, контактной выносливости зубчатых колес и другие за счет повышения

сопротивления изнашиванию, развитию питтинга и усталостному выкрашиванию поверхности и появлению трещин разрушения.

Указанные требования, а также результаты исследований качества поверхностного слоя зубьев применительно к схемам профильного глубинного шлифования учитывались при разработке рекомендаций и освоении новых технологий обработки зубчатых колес различных типов.

В заключение можно отметить, что при профильном шлифовании стали 16ХЗНВФМБ-Ш как после объемной за-

калки, так и после ионной нитроцементации с последующей закалкой, а также для сталей марок 20Х2НМА, 30Х2Н2ВФМА, 40Х и других, сохраняется общая тенденция назначения характеристики высокопористого шлифовального круга: мягкий инструмент с более крупным зерном обеспечивает минимальную нагрузку при максимальной высоте микронеровностей на обработанной поверхности, в сравнении с обработкой мелкозернистым кругом повышенной твердости.

Применение высокопористых абразивных кругов дает возможность реализовать высокопроизводительную схему чистового шлифования с удалением припуска на обработку за 1–2 прохода. При этом снижение трудоемкости операции сопровождается формированием поверхностного слоя с минимальными структурными изменениями и при отсутствии дефектов шлифовочного характера.

Эксплуатационные испытания.

Целью испытаний являлось установление влияния технологии обработки на ресурс работы зубчатой передачи. В качестве объекта испытаний выбрана пара высокоскоростных цилиндрических зубчатых колес с $m = 2$ мм привода редуктора автоматики (ПРА), изготовленных методом профильного глубинного шлифования из стали с твердостью 40 HRC.

Первичная наработка на ресурс зубчатой пары составила 1500 ч (ресурс аналогичной пары, изготовленной по серийной технологии, составляет 500 ч). При дефектации деталей состояние рабочих поверхностей зубьев признано удовлетворительным, замечаний по работе передачи на изделии не было.

7.7. ПРОМЫШЛЕННОЕ ОСВОЕНИЕ НОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС И СОЕДИНЕНИЙ

Производственные испытания и освоение новой технологии изготовления зубчатых колес и соединений различных

типоразмеров и с различными требованиями по точности и качеству обработки проводились на предприятиях авиационной и станкостроительной промышленности, заводах агрегатостроения, ремонтном производстве и др.

Проведены производственные испытания и внедрение новых технологических процессов шлифования рабочих и базовых поверхностей цилиндрических, конических зубчатых колес и торцовых шлицевых соединений повышенной точности. Новая технология включает в себя комплексную обработку шлифованием поверхности зубчатого профиля (предварительное формообразование и чистовое шлифование различными методами), а также предварительное и чистовое шлифование наружных и внутренних цилиндрических и плоских поверхностей зубчатых колес.

Предварительное формообразование зубьев производилось методами профильного глубинного и врезного шлифования по целому (аналог глубинной схемы), т.е. без предварительной обработки лезвийным инструментом на зубошлифовальных станках различных типов с периодическим или непрерывным делением. Чистовое шлифование зубьев производилось после химико-термической обработки поверхности методами профильного или обкатного шлифования.

Процесс профильного шлифования цилиндрических зубчатых колес наружного и внутреннего зацепления с модулем до 10 мм, числом зубьев до 122 и шириной венца до 105 мм из сталей 16ХЗНВФМБ-Ш, 20Х2НМА, 30Х2Н2ВФМА и других освоен на станке Р600G фирмы Gleason-Pfauter. Шлифование зубьев производится либо по целому на заготовках после объемной закалки на твердость 31...40,5 HRC, либо после химико-термической обработки поверхности зубьев с твердостью до 60...62 HRC. В качестве режущего инструмента используются высокопористые круги типоразмеров 1 80×10×36, 1 200×20×76, 1 300×20×127 с характеристиками 25А 10...16П ВМ2...М2 12...16 К.

Цилиндрические колеса методом обката с непрерывным делением шлифуются на станках фирмы Reishauer мод. RZ300E и RZS. По результатам проведенных производственных испытаний для шлифования зубьев цилиндрических зубчатых колес на станках RZ300E и RZS рекомендованы к использованию следующие характеристики высокопористых кругов: для предварительного формообразования зубьев зубчатых колес из стали 16ХЗНВФМБ-Ш (35...40 HRC) или ее аналогов целесообразно применение высокопористых кругов зернистостью 16, твердостью от МЗ до СМ1 и номером структуры 10, а для чистового шлифования – высокопористые круги зернистостью 10...12, твердостью ВМ2...М2 и номером структуры 10. Применение нового инструмента дает возможность повысить производительность обработки за счет увеличения подачи на врезание на черновых проходах в 2 раза, при этом обеспечиваются все требования по точности геометрии и качеству обработки зубчатого колеса.

На станке мод. ZSTZ315 фирмы Niles, реализующем метод обкатного шлифования зубчатых колес с периодическим делением, используются высокопористые шлифовальные круги с двусторонним коническим профилем с размерами 350×32×127 из электрокорунда белого марки 25А, зернистостью 16 и 25 твердостью МЗ...СМ2, с номером структуры 10. При этом обрабатываются зубчатые колеса из цементированной и закаленной стали 16ХЗНВФМБ-Ш (62...64 HRC) с $m = 10$ мм, $b = 120$ мм, $z = 23$.

Обработка конических зубчатых колес с круговым зубом и шлицевых торцовых соединений повышенной точности Курвик на стальных и титановых заготовках методом врезного шлифования с последующим обкатом и периодическим делением производится на станках мод. WNC 30 и W800 CNC фирмы Klingelnberg и мод. 463 фирмы Gleason. При этом ис-

пользуются высокопористые круги кольцевого профиля для станков фирмы Klingelnberg с размерами 115×100×75, 150×110×100, 170×100×130, 220×115×180, 310×110×260 и чашечного профиля для станка фирмы Gleason с размерами 220×110×180. В зависимости от марки обрабатываемого материала, метода обработки и требований по качеству поверхности высокопористые круги изготавливаются из электрокорунда марки 25А или из карбида кремния зеленого марки 64С, зернистостью 6...16 на керамической связке с твердостью ВМ2... СМ1, номерами структуры 6...12. По результатам испытаний высокопористые круги с характеристикой 25А 16П СМ1 12 К рекомендованы для предварительного профилирования круговых зубьев конических зубчатых колес и шлиц соединения Курвик на заготовках из сталей марок 40Х (43...48 HRC), 16ХЗНВФМБ-Ш (39...40 HRC), а круги с характеристикой 64С 16П СМ1 12 К – для профилирования шлиц соединения Курвик на заготовках из титановых сплавов марок ВТ6, ВТ20 и др. Для чистового шлифования конических зубчатых колес используются шлифовальные круги с характеристиками 25А 8П М1-2 10 К, которые обеспечивают требуемые производительность, точность и качество обработки.

Освоена технология шлифования плоских и цилиндрических базовых поверхностей зубчатых колес новыми кругами. Ранее после шлифования кругами с нормальной структурой, как правило, около 15...20 % обрабатываемых деталей имели дефекты поверхностного слоя в виде прижогов и микротрещин.

Были изготовлены высокопористые круги с типоразмерами 25×25×6; 35×40×10; 40×40×13; 60×50×20; 100×60×20; 250×20×76, 350×40×127; 400×60×127 и 450×63×203 и характеристиками 25А 16П М2...СМ1 12 К, 25А 25П МЗ...СМ1 12 К, 25А 40П МЗ...СМ1 12 К. Их испытания проводились на различных операциях внутреннего, плоского и круглого наружного шлифования зубчатых



Рис. 7.41. Зубчатые колеса, обработанные методом глубинного шлифования

колес различной номенклатуры из цементированных и закаленных сталей 16ХЗНВФМБ-Ш (60...62 HRC) и 20ХН2МА (58...60 HRC).

Обработка посадочного отверстия зубчатых колес проводилась на внутришлифовальных станках мод. Si-4, Si-80×100 и Livnica Kikinda высокопористыми кругами прямого профиля с размерами 25×25×6, 35×40×10, 40×40×13, 60×50×20, 100×60×20. Режим обработки: скорость круга 30 м/с, скорость вращения детали 80...150 м/мин, подача на врезание 0,015...0,025 мм, продольная подача 2...8 м/мин. Правка рабочей поверхности проводилась с помощью алмазного карандаша. Охлаждение осуществлялось 2...3%-ным содовым раствором.

Плоское шлифование торцовых поверхностей проводилось на станках мод. 3Г71, 3П741АФ10 и Jotes-SPC-20b (Чехия) кругами с размерами 250×20×76 и 450×63×203. Принятые режимы шлифования: скорость круга 30...35 м/с, скорость стола 10...20 м/мин, подача на врезание 0,015...0,025 мм, продольная подача

0,05...2 мм/дв.ход. Правка круга производилась алмазным карандашом, а охлаждение зоны резания – 2%-ным содовым раствором.

Наружные цилиндрические поверхности колес шлифовались на станках Kellenderger 600U, Studer S20 и S30 (Германия) кругами с размерами: 350×40×127 и 400×60×127 на режимах обработки: скорость круга 30...35 м/с, скорость вращения детали 60...200 м/мин; подача на врезание 0,015...0,025 мм/дв.ход, продольная подача 5...12 м/мин. Правка кругов проводилась алмазным карандашом при охлаждении СОТС на основе индустриального масла.

В процессе испытаний и последующем применении новых технологических процессов внутреннего, плоского и круглого наружного шлифования зубчатых колес, прижогов и микротрещин травлением и магнито-порошковым контролем не выявлялось.

Опытные работы показали также, что новая технология позволяет эффективно обрабатывать модифицированные зубча-

тые колеса, у которых для улучшения эксплуатационных свойств конструктивно предусматривается отклонение от теоретического эвольвентного профиля. Это направление очень перспективно для изготовления силовых зубчатых передач.

Зубчатые колеса, обработанные по новой технологии, показаны на рис. 7.41.

Другие примеры использования высокопористых кругов на операциях зубошлифования приведены ниже.

Шлифование методом обката с единичным делением. Проведены испытания и внедрение новой технологии формообразования зубьев конических спиральных зубчатых колес из закаленной легированной стали 16ХЗНВФМБ-Ш. Операция выполняется на станке мод. G30 фирмы Klingelnberg высокопористыми кругами кольцевого профиля с размерами 220×112×180. Охлаждение – СОТС на основе масла Shell Mazon 2425 S-14. Правка рабочей поверхности шлифовального круга – циклическая алмазным правящим роликом.

Конические зубчатые колеса с $m_n = 3,9942$ мм, $z = 25$ и 30 обрабатываются в два этапа: предварительное профилирование зубьев методом глубинного шлифования (взамен зубофрезерования) на заготовках после объемной закалки на твердость 23,5...35,5 HRC и чистовое шлифование поверхностей зубьев после цементации и закалки на твердость 61...65 HRC. Предварительное нарезание зубьев производилось высокопористыми кругами с характеристиками 25А 16П СМ1 10 К и 25А 12П СМ1 10 К на следующих режимах шлифования: скорость круга 25 м/с, скорость подачи вращения 16 мм/мин; скорость обката: предварительно – 0,5...1 °/с, окончательно – 3...5 °/с. Правка круга встречная (направление вращения круга и ролика различные) с величиной правки 0,1 мм и со скоростью подачи 200 мм/мин.

Чистовое шлифование зубьев производилось за 7 проходов кругами с характеристиками 25А 8П М1 10 К и

25А 6П М1 10 К на следующих режимах шлифования: скорость круга – 25 м/с, осевая подача круга на деталь на 1...5 проходах 0,1 мм; 6 – 7 проходы – без подачи, скорость обката – 5...7 °/с. Правка шлифовального круга попутная (направление вращения круга и ролика совпадают) с величиной 0,09 мм, скорость подачи 30...100 мм/мин.

При чистовом шлифовании наилучшую режущую способность показывают круги с характеристикой 25А 8П М1 10 К, обеспечивая все требования по точности и качеству обработки. Шероховатость поверхности зубьев составляет $Ra = 0,32...0,4$ мкм, травлением и магнитным контролем прижоги и микротрещины на поверхностях зубьев не выявляются.

Хорошие результаты получены при производственных испытаниях технологии шлифования конических колес с круговым зубом из стали 20Х3МВ с твердостью 59...62 HRC с параметрами $m = 2,25$ мм, $z = 48$ и $m = 2,99$ мм, $z = 25$. Обработка на станке мод. 463 фирмы Gleason выполнялась высокопористыми кругами чашечного профиля 120×110×72 с характеристикой 25А 8П М1 10 К на режиме: скорость круга 22 м/с, удаляемый припуск 0,1...0,15 мм, число проходов 15, при скорости обката 8,14 с/зуб с частотой правки круга через 4 прохода.

Испытанный вариант обработки обеспечил бесприжоговое шлифование с точностью по 6-й степени, накопленной погрешностью по шагу 0,027 мм и шероховатостью обработанной поверхности зуба в пределах $Ra = 1,0...1,25$ мкм.

Чистовое шлифование цилиндрических прямозубых зубчатых колес из закаленной легированной стали 20Х3МВФА (64 HRC) с модулем 2 мм, числом зубьев 23 и шириной зубчатого венца 15 мм производилось методом обката с единичным делением на отечественном станке мод. 5М841. Испытания проводились высокопористыми кругами типоразмера 2П 350×20×127 с характеристикой 25А 25П СМ1 10 К отечественного производ-

ства на следующих режимах: скорость шлифовального круга 25 м/с, подача на врезание 0,05 мм, число двойных ходов 85 дв.ход/мин. Охлаждение зоны резания – СОТС на основе индустриального масла. Циклическая правка круга осуществлялась алмазным карандашом.

В ходе шлифования отмечено, что испытанные высокопористые круги в условиях чистового шлифования методом обката с единичным делением обладают высокой режущей способностью и размерной стойкостью. Их применение на данной операции исключило появление прижогов на обработанных поверхностях зубьев. Обеспечены также все требования чертежа по точности и качеству обработки: степень точности 6–5–5, погрешность профиля зуба 6 мкм, погрешность направления зуба 7 мкм, наибольшая разность шагов зацепления 6 мкм и параметр шероховатости зубчатого венца Ra в пределах 0,8...1,6 мкм.

Технология шлифования крупномодульных зубчатых колес методом обката с единичным делением реализована на отечественном станке мод. 5А843. При шлифовании абразивными кругами нормальной структуры с характеристикой 24А 40 М2 6...8 К5 отечественного производства на обработанных поверхностях зубьев всегда имели место термические повреждения в виде прижогов и микротрещин, что приводило к отбраковке готовых деталей.

Для испытаний была разработана и изготовлена партия высокопористого абразивного инструмента типоразмера 1 400×25×127 следующих характеристик: 25А 12П М3 12 К, 25А 16П М3 12К, 25А 16П СМ1 12К, 25А 25П СМ1 12К.

Предварительно обработанные фрезерованием зубчатые колеса из легированной стали 20Х2Н4А после ионной цементации и закалки на твердость поверхности 56 HRC с модулем 10 мм, числом зубьев 73 и шириной зубчатого венца 120 мм обрабатывались на следующих режимах чистового шлифования: скорость

круга 30 м/с, подача на врезание – 0,05 мм, число двойных ходов – 60 дв.ход/мин. Охлаждение зоны резания – СОТС на основе индустриального масла. Правка шлифовального круга осуществлялась алмазным карандашом после обработки 5 зубьев.

За весь период испытаний прижоги и микротрещины на обработанных поверхностях по вине шлифования не наблюдались. Были обеспечены все требования чертежа по точности и качеству обработанной поверхности: степень точности зубчатого колеса 7В, колебание длины общей нормали 0,06 мм, радиальное биение зубчатого венца 0,08 мм, погрешность профиля зуба 0,024 мм, погрешность направления зуба 0,02 мм, предельное отклонение шага 0,024 мм, шероховатость обработанных поверхностей зубьев Ra не более 0,8 мкм. Производительность обработки и шероховатость обработанной поверхности, как показали испытания, зависят от характеристики шлифовального круга. Для режимов обработки, принятых на заводе, целесообразно использовать инструмент с характеристикой 25А 25П СМ1 12К.

При обработке зубчатых колес, изготовленных из закаленной стали 20Х2Н4А (53...57 HRC), на отечественном станке мод. 5843 в одинаковых условиях были испытаны шлифовальные круги типоразмера 4 400×25×127 с характеристикой 24А 25Н СМ1 8 К1, изготовленные ПО "Уральские абразивы" и новые высокопористые круги с характеристикой 25А 25П СМ1 12 К. Для обработки были выбраны зубчатые колеса с модулем 8 и 9 мм, числом зубьев 25 и 22 и шириной зубчатого венца 112 и 140 мм соответственно.

Испытания проходили на режимах шлифования: скорость шлифовального круга 35 м/с, подача на врезание 0,05...0,15 мм, подача на выхаживание 0,02 мм, число двойных ходов 60...84 дв.ход/мин. Зона резания охлаждалась двухсторонней подачей индустриального масла марки И-20 с расходом $\approx$ 25...30 л/мин.

Применение высокопористых кругов оптимальной характеристики на операции чистового шлифования методом обката с единичным делением гарантировано исключает появление прижогов и микротрещин на обработанных поверхностях зубьев, которые имели место при шлифовании кругами нормальной структуры.

Шлифование методом обката с непрерывным делением. Проведены производственные испытания процесса чистового шлифования зубьев цилиндрических зубчатых колес с модулем $m = 1,5$ и 2 мм и числом зубьев $z = 92$ и 93 из цементированной закаленной стали 18ХГТ (57...63 HRC) высокопористыми абразивными кругами. Обработка производилась методом обката с непрерывным делением кругами типоразмера 1 350×84×160 с характеристиками 99А 100 I 10 V и 99А 80 K 10 V.

При шлифовании зубчатых колес высокопористыми кругами обеспечиваются требования чертежа по степени точности 6-В и шероховатости обработанной поверхности зубьев Ra не более 0,63 мкм. В сравнении с серийными кругами новый высокопористый инструмент позволил исключить прижоги на шлифованной поверхности зубьев, а также повысить производительность обработки до двух раз за счет возможности форсирования режима шлифования на предварительных проходах.

С применением новых высокопористых кругов освоена технология формообразования зубьев зубчатых колес методом обката с непрерывным делением высокопористыми абразивными кругами. Профилируются косозубые цилиндрические зубчатые колеса с модулем 0,4...1 мм, числом зубьев 40...60 и шириной зубчатого венца 6 мм, с правым углом наклона зубьев $3^{\circ}05'$ из легированных сталей 12ХН3А, 14Х17Н2А, 20Х13, 45Х14Н14В2М, термообработанных на твердость 36...40 HRC.

Применявшиеся ранее для этих операций абразивные круги с характери-

стой 24А 8П С1 9 К5 отечественного производства обладали низкой кромкостью, часто подвергались правке и замене. Процесс шлифования сопровождался возникновением прижогов на обработанных поверхностях зубьев.

Испытания и внедрение новой технологии профилирования зубчатых колес проводилось на отечественных станках мод. 5В830 и ЕЗС0918 производства егорьевского завода "Комсомолец". Шлифование высокопористыми кругами с размерами 300×50×127, 400×63×203 и характеристиками 25А 3П С1 10 К, 25А 6П С1 10 К и 25А 6П С2 10 К проводилось на следующем режиме: скорость круга 35 м/с, глубина обработки 0,9...2,25 мм, продольная подача 0,16...0,18 мм/об. Охлаждение индустриальным маслом.

При обработке высокопористыми кругами отмечено, что они по сравнению с применяемым ранее инструментом имеют лучшую режущую способность, обеспечивают бесприжоговую обработку, а также требования чертежа по шероховатости поверхности и точности зубчатого колеса при сокращении необходимого количества правок в 1,5...2 раза.

Методом обката с непрерывным делением наиболее эффективно шлифуются зубчатые колеса на станках фирм Reishausen и Liebherr. Станки этих фирм оснащаются высокопористыми шлифовальными кругами с размерами, которые не соответствуют стандартному ряду размеров для отечественного абразивного инструмента: например, 350×В×160, где В = 62, 84, 104 и 154 мм для станков фирмы Reishausen и 195×200×90 и 240×230×110 для станков фирмы Liebherr.

Особенностями шлифования зубчатых колес обкатом с непрерывным делением являются высокая производительность процесса в сочетании с большим риском появления прижогов на шлифуемых поверхностях зубьев. Чтобы избежать дефектов, фирма Winterthur в своих

рекомендациях жестко регламентирует характеристику шлифовального круга по марке электрокорундового зерна (53А, 64А, 67А), его размерах (зернистость 80...240), твердости (F...L) и номеру структуры (8...15) в соответствии с модулем обрабатываемого зубчатого колеса (0,5...6 мм).

Характеристика круга также зависит от обрабатываемого материала, технического состояния станка и других факторов, которые могут оказать влияние на процесс зубошлифования. Фирмы, которые специализируются на изготовлении такого класса инструмента, чтобы учесть отмеченные особенности шлифовальных кругов для обката с непрерывным делением, используют оригинальные рецептурные составы и технологии производства.

В России такой инструмент производит Волжский абразивный завод. Перед шлифованием зубчатых колес круга необходимо отпрофилировать на требуемый модуль и заданное количество заходов червяка. Лучше эту операцию выполнять вне рабочего станка. Для этой цели применяют специальные станки для профилирования рабочей поверхности шлифовальных кругов, например, фирмы Вит с комплектом правящих алмазных роликов на заданную конфигурацию.

Фирма Dr. Kaiser Diamantwerkzeuge предлагает для этих целей более простую и существенно более дешевую схему профилирования шлифовальных кругов с помощью правящего устройства, которое может устанавливаться, например, в суппорте токарного станка.

Профильное шлифование. Проведены испытания при профильном глубинном и чистовом шлифовании зубчатого венца внутреннего зацепления планетарного редуктора. Шлифование зубчатого профиля с $m = 4$ мм, $z = 126$, $\alpha = 20^\circ$ и высотой венца 81 мм из стали 18Х2Н4МА перед азотированием производилось на модернизированном для профильного шлифования зубчатых колес многоцелевом обрабатывающем центре "Horison 3"

(Италия) высокопористым кругом 200×10×52 с характеристикой 25А 25П СМ1 12 К5 на режиме обработки: скорость круга 26 м/с, скорость продольной подачи 100...800 мм/мин. Глубинное шлифование производилось с глубиной 4 мм на проход (по условиям жесткости системы резания), чистовая обработка до 0,1 мм на проход круга при общем припуске 0,5...0,6 мм на сторону зуба. Правка круга периодическая, попутная с величиной 0,1 мм через 8 зубьев при глубинном шлифовании и через 22...35 зубьев при чистовой обработке алмазным профильным роликом при соотношении скоростей ролика и круга 0,7...0,8. Охлаждение – 2,5%-ным водным раствором эмульсии "Экокул-Солюбль".

Было установлено, что в сравнении с серийным инструментом с характеристикой 25А 25П СМ2 7 К5 высокопористые круги отличаются лучшими режущими свойствами, меньше засаливаются, что позволяет повысить производительность чистового шлифования в 2 раза за счет увеличения подачи на врезание при обеспечении бездефектной обработки поверхности, а при глубинном шлифовании заменить лезвийную обработку. Точность обработки повышена до 4–4–4 (ранее обеспечивалась 5–4–4).

Освоена бесприжоговая технология глубинного обката с периодическим делением на зубошлифовальном станке мод. 463 фирмы Gleason конических шестерен с круговым зубом из стали 20Х3МВФ-Ш. Обрабатываются шестерни с внешним окружным модулем 2,4 мм, числом зубьев 22 и 29, углом наклона зубьев 15° и соответственно правым и левым направлением зуба со степенью точности 6–5–5 и шероховатостью до $Ra\ 0,4$.

Высокопористые круги чашечного профиля с размерами 120×110×72 и с характеристиками 25А 16П СМ1 10 К и 25А 8П М1 10 К используются для предварительного профилирования заготовки с твердостью 302...363 НВ и чистового шлифования после азотирования.

7.15. Циклы профильного шлифования зубчатых колес

Номер	Припуск, мм	Глубина резания, мм	Число проходов	Величина правки, мм	Число впадин, обработанных до правки
1	0,2	0,1	2	0,05	28
2	0,8	0,067	12	0,04	7
3	0,03	0,015	2	0,035	14
4	0,005	0,005	1	Без правки	

На операции профильного шлифования зубчатых колес на профилешлифовальном станке мод. "OPAL-80" фирмы Oerlikon зубчатые колеса с $m = 4,5$ мм, $z = 97$, $\alpha = 20^\circ$, $\beta = 21^\circ$, ширина зубчатого венца 45 мм, из стали 12X2H4A-Ш после цементации и закалки на твердость ≥ 61 HRC обрабатывались высокопористым шлифовальным кругом 300×25×127 с характеристикой 25A 16П M1 12 K5. Зубья обрабатывались методом профильного шлифования на режимах: скорость шлифовального круга 23 м/с, вертикальная подача 1800 мм/мин, радиальная подача (глубина на врезание) изменялась от 0,04 до 0,18 мм, припуск на обработку 0,3 мм на сторону, количество проходов шлифования – 8. Правка круга производилась после обработки 12 зубьев.

В результате обработки все технические требования чертежа детали и технологии по точности и шероховатости обработанной поверхности выполнены, шлифовочных прижогов по профилям зубьев травлением не обнаружено. В сравнении со шлифовальными кругами фирмы Winterthur, которыми был оснащен станок мод. "OPAL-80" при поставке на завод, новый высокопористый инструмент позволил вести обработку с более форсированной радиальной подачей – в 1,5 раза больше при снижении времени шлифования до 30 %.

При оснащении профилешлифовального станка мод. "OPAL-80" целесообразно иметь комплектацию из высокопористых кругов прямого и конического профилей с размерами: 125×12×51, 300×12×127, 300×25×127, 300×32×127 с характеристикой A99 80 I 12 V (25A 16П M2 12 K) с рабочей скоростью до 50 м/с. Такая комплектация обеспечивает:

1. Профильное глубинное шлифование "по целому" цилиндрического зубчатого колеса из стали 40X (300 HB) с модулем $m = 6$ мм, числом зубьев $z = 20$, углом зацепления $\alpha = 20^\circ$, шириной зубчатого венца $b = 50$ мм. Обработку производили кругом с размерами 300×25×127 за 5 циклов шлифования на следующих режимах: скорость резания 28 м/с, скорость продольной подачи 2000 мм/мин.

За первый цикл шлифования производится предварительное нарезание зубьев на глубину впадины 10,22 мм за 15 дв.ходов с глубиной резания на проход, равной 0,34 мм. За второй цикл обработки производилось снятие припуска с глубиной резания 0,25 мм. Получистовое шлифование зубьев с удалением припуска 0,2 мм осуществляется за 2 дв.хода с глубиной резания 0,05 мм. Четвертый и пятый циклы чистового шлифования производятся с удалением припуска 0,04 и 0,03 мм за 1 дв.ход соответственно. За время обработки зубчатого колеса осуше-

7.16. Циклы профильного шлифования зубчатых колес

Номер	Припуск, мм	Глубина резания, мм	Число проходов	Величина правки, мм	Число впадин, обработанных до правки
1	1,6	0,13	12	0,05	5
2	0,2	0,03	6	0,04	5
3	0,03	0,015	2	0,035	11
4	0,01	0,005	2	Без правки	

ствляется 19 циклов правки шлифовального круга.

2. Чистовое профильное шлифование косозубых цилиндрических колес с характеристиками: $m = 4$ мм, $z = 29$ и 30 , $\alpha = 20^\circ$, $\beta = 14,5833^\circ$, $b = 25$ мм из стали 12ХН3А после цементации и закалки на твердость 58...60 HRC. Обработка производится со скоростью 24 м/с и скоростью продольной подачи 2000 мм/мин за четыре цикла (табл. 7.15).

3. Чистовое профильное шлифование косозубого колеса с $m = 4$ мм, $z = 11$, $\alpha = 20^\circ$, $\beta = 31,1667^\circ$, $b = 22,25$ мм из стали 40ХН2МА (280...300 НВ) после улучшения. Шлифование производилось также за четыре цикла со скоростью резания 34 м/с и скоростью продольной подачи 2000 мм/мин (табл. 7.16)

После чистового профильного шлифования зубчатые колеса соответствуют 3–4 степени точности, шероховатость обработанных поверхностей зубьев составляет по $Ra = 0,32...0,4$ мкм, прижоги и микротрещины во всех случаях отсутствуют.

4. Профилирование "по целому" и чистовое шлифование эвольвентных шлицев с $m = 1,5$ мм, $z = 35$, $\alpha = 30^\circ$, $b = 31$ мм на заготовке вала из термоулучшенной стали 40ХН (280...300 НВ) перед азотированием. Предварительное нарезание и окончательная обработка шлицев выполняется за четыре цикла со скоростью резания 34 м/с и продольной подачей круга 2000 мм/мин (табл. 7.17).

Новая технология обеспечивает формообразование шлицевого вала мето-

7.17. Циклы профильного шлифования зубчатых колес

Номер цикла	Припуск, мм	Глубина резания, мм	Количество проходов	Величина правки, мм	Количество впадин, обработанных до правки
1	0,6	0,1	6	0,05	15
2	0,8	0,08	10	0,04	4
3	0,03	0,015	2	0,035	14
4	0,01	0,005	2	Без правки	

дом шлифования в кратчайшие сроки, исключив при этом необходимость использования специального оборудования, а также проектирования и изготовления червячных модульных фрез.

Описанные выше результаты исследований, производственных испытаний и внедрения технологий глубинного и маятникового шлифования зубчатых колес и шлицевых соединений получены высокопористыми кругами, которые в основном изготавливались на зарубежных фирмах.

На ОАО "Волжский абразивный завод" совместно с МГТУ "Станкин" разработаны и освоены технологии изготовления высокоструктурного ($N = 7...9$) и высокопористого ($N = 10...14$) абразивного инструмента.

Высокопористые круги, в том числе, ориентированы на профильное шлифование зубчатых колес, а также для шлифования методом единичного и непрерывного обката (для станков фирм Reishauer, Liebherr и др.).

На ОАО "Волжский абразивный завод", например, был изготовлен шлифовальный круг 1 350×32×127 с характеристикой 25A 16 M3 12 K для бездефектного профильного шлифования зубчатых колес. Его испытания проводились на профилешлифовальном станке мод. P600G фирмы Gleason-Pfauter при обработке партии цилиндрических зубчатых колес планетарного редуктора. Зубчатые колеса имели характеристику: $m = 6$ мм, $z = 41$, $b = 105$ мм, $\alpha = 20^\circ$ с цементированной и закаленной до твердости 60...62 HRC поверхностью зубьев.

Обработка велась в полном соответствии с технологией, принятой для профильного шлифования данного типа зубчатых колес кругом с характеристикой 99A 80 J 12 V импортного производства.

Удаление припуска с боковых сторон зубьев осуществлялось при постоянной скорости круга, равной 30 м/с, по схеме маятникового шлифования за семь предварительных проходов с радиальным врезанием 0,108 мм за проход с продольной подачей $S_{пр} = 2778$ мм/мин и за два чисто-

вых прохода с радиальным врезанием 0,028 мм при $S_{пр} = 2700$ на первом и 1350 мм/мин на последнем проходе.

Для правки круга использовался алмазный ролик фирмы Dr. Kaiser Diamantwerkzeuge (Германия) типа NC80 с наружным диаметром 130 мм и радиусом при вершине режущей части $R = 0,5$ мм. Периодическая правка круга с величиной 0,05 мм выполнялась при соотношении скоростей круга и ролика, равном 0,8. Круг правился один раз перед началом обработки и после предварительного шлифования каждой шестой впадины зубчатого колеса. Чистовое шлифование всех зубьев колеса осуществлялось только с одной предварительной правкой круга.

Максимальная нагрузка при обработке на режиме предварительного шлифования достигала 28...32 % от номинальной мощности привода (допустимая нагрузка 80 %). На режиме чистового шлифования токовая нагрузка достигала 16...18 % на первом проходе и 10...12 % – на последнем. Данные по токовой нагрузке приведены с учетом нагрузки холостого хода, которая составляла 8 %.

В ходе испытаний была обработана партия из 17 зубчатых колес. В связи с применением нового инструмента для ответственной обработки промышленной партии деталей после их шлифования осуществлялся обязательный контроль параметров точности, шероховатости поверхностей зубьев, наличие на них прижогов и трещин. В соответствии с требованиями технологии, выборочному контролю точности и шероховатости обработанных поверхностей зубьев были подвергнуты три зубчатых колеса, травлению на прижоги одна деталь из партии. Магнитно-порошковый контроль на наличие трещин производился у всех семнадцати деталей.

Контроль обработанных зубчатых колес выявил полное соответствие параметров качества техническим требованиям (табл. 7.18). При контроле на прижоги и трещины указанных дефектов на всех обработанных зубьях не выявлено.

7.18. Результаты контроля обработанных зубчатых колес

Наименование параметра	Обозначение	Допустимое значение, мкм	Полученное значение		
			Деталь 1	Деталь 2	Деталь 3
Погрешность профиля	f_f	11	3,1...4,2	2,4...3,5	1,9...3,6
Погрешность направления	F_β	11	0,8...4,3	0,6...5,5	0,7...3,9
Отклонение окружного шага	f_p	14	2,5...2,9	1,6...3,4	1,8...2,2
Накопленная погрешность шага	F_p	63	16,7...19,0	5,7...5,8	3,7...4,1
Параметр шероховатости	Ra	0,4	0,35...0,41	0,29...0,32	0,32...0,35

Проведенные испытания показали, что новый круг по характеру протекания процесса шлифования, интенсивности изнашивания и полученным результатам по точности и качеству обработки зубчатых колес показал аналогичные результаты с ранее применяемым на данной операции импортным высокопористым кругом.

В результате внедрения новой технологии зубошлифования высокопористыми кругами стало возможным высокопроизводительное и качественное изготовление зубчатых колес с высокой степенью точности (до 3...4) для нужд предприятий нефтехимической, газовой и других отраслей промышленности. Технологические возможности и универсальность применяемого оборудования и высокопористого абразивного инструмента позволяют выполнять как серийные, так и единичные заказы по изготовлению зубчатых колес из различных марок конструкционных легированных сталей, в том числе после химико-термической обработки с модулями от 1 до 16 мм для колес наружного зацепления и $m = 1...7$ мм для колес

внутреннего зацепления с числом зубьев от 8 до 180.

7.8. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА НОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПРОФИЛИРОВАНИЯ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

В настоящее время традиционная технология изготовления высокоточных зубчатых колес определяется последовательным применением следующих основных операций: предварительное профилирование зубьев методом лезвийной обработки (зубофрезерование, зубодолбление или зубострогание), чистовое шлифование зубьев, термообработка (закалка) или химико-термическая обработка (цементация, азотирование, нитроцементация с последующей закалкой) и, наконец, завершающая операция чистового зубошлифования, обеспечивающая все необходимые требования по точности и качеству профиля.

Применяемая технология трудоемка и материалоемка. В производственный цикл при отсутствии специального режущего инструмента входят временные и материальные затраты на его проектиро-

вание и изготовление. В этой связи подготовка производства зубчатого колеса нового типоразмера, как уже выше упоминалось, может составить от 1 до 3 месяцев, что не позволяет быстро реагировать на изменение номенклатуры выпускаемых изделий. Очевидно, что традиционная технология эффективна только при выпуске больших партий зубчатых колес.

Разработанная и внедренная новая гибкая технология изготовления высоконагруженных зубчатых колес повышенной точности использует в качестве формообразующей операции профильное глубинное шлифование на закаленной заготовке. Промышленная практика применения новой технологии при изготовлении зубчатых колес с наружным и внутренним зацеплением с модулем до 8 мм и шлицевых соединений повышенной точности Курвик различных типов и размеров свидетельствует о ее высокой технико-экономической эффективности [62, 83, 95].

Новый технологический подход к формообразованию зубчатого венца предполагает только три основных операции: профилирование зубьев глубинным шлифованием, последующая химико-термическая обработка и чистовое зубошлифование. Принципиальным достоинством новой технологии является применение при формообразовании зубчатых колес высокопористого абразивного шлифовального круга на керамической связке, который легко и быстро универсальными правящими средствами заправляется на станке на любой профиль впадины между смежными зубьями. Благодаря этому, сроки технологической подготовки выпуска зубчатого колеса любой степени сложности и точности обусловлены временем изготовления заготовки и не привязаны к проектированию и изготовлению специального режущего инструмента.

Чтобы оценить эффективность новой технологии, ниже рассмотрены два варианта профилирования зубчатого колеса из закаленной (40 HRC) стали 16X3НВФМБ-Ш с

модулем 3 мм, числом зубьев 35 и шириной венца 60 мм. Указанная характеристика является наиболее употребляемой в различных отраслях машиностроения и может рассматриваться как типовой представитель зубчатых колес. Сравнение вариантов изготовления производилось с учетом конкретных особенностей оплаты труда, материалов, энергии, нормативных отчислений и т.д.

При экономической оценке использованы два равноценных по мощности станка для зубофрезерования мод. Р600 и профильного шлифования мод. Р600G одной фирмы изготовителя – Gleason-Pfauter. Балансовая стоимость шлифовального станка мод. Р600G на 32,8 % больше, чем зубофрезерного станка мод. Р600.

При изготовлении высокоточных зубчатых колес предварительное профилирование зубьев включает в себя обязательное зубофрезерование и чистовое шлифование. Глубинное шлифование совмещает эти операции в одном проходе. На режимах обработки, принятых на заводе, машинное время профилирования одного зубчатого колеса – зубофрезерование с чистовым шлифованием – составило 1,05 ч (11 % этого времени занимает чистовое шлифование), при глубинной схеме обработки – 0,67 ч, или почти на 60 % меньше. С учетом вспомогательных операций расчетное нормированное время обработки равно соответственно 4,87 и 2,79 ч, т.е. имеет место снижение трудоемкости на 42,7 % и рост производительности труда в 1,75 раз при замене зубофрезерования на профильное глубинное шлифование.

Трудоемкость обоих вариантов зависит от модуля и габаритных размеров обрабатываемых зубчатых колес. Например, при профилировании зубчатого колеса с модулем 2 мм, числом зубьев 19 и шириной венца 6 мм машинное время при зубофрезеровании с чистовым шлифованием составило 0,67 ч, а при глубинном шлифовании – 0,57 ч, или на 17,5 % меньше. Следовательно, эффективность

новой технологии по критерию снижения трудоемкости изготовления будет тем выше, чем больше габаритные размеры обрабатываемых зубчатых колес и сложнее их конструкция.

В расчетах себестоимости операций профилирования по двум вариантам общие затраты приходились на объем партии изготавливаемых зубчатых колес. Результаты расчета представлены на рис. 7.42. Как и ожидалось, объем партии очень сильно влияет на себестоимость зубофрезерования, так как затраты на проектирование и изготовление червячных фрез, а также их эксплуатацию распределяются на количество деталей, обрабатываемых в одной партии.

Некоторое увеличение себестоимости профилирования глубинным шлифованием при изготовлении одной детали в сравнении с изготовлением из пяти и более деталей связано с тем, что затраты на наладку операции – установку детали и шлифовального круга, его правку, программирование обработки и т.д. – приведены к себестоимости изготовления одной детали, в других случаях они равномерно распределяются на обработку нескольких зубчатых колес. Аналогичным образом при зубофрезеровании затраты на проектирование, изготовление и эксплуатацию инструмента вместе с затратами на наладку операции распределены на соответствующее количество обрабатываемых зубчатых колес.

В структуре себестоимости большой удельный вес занимают затраты, связанные с инструментальным обеспечением технологического процесса. При зубофрезеровании – это, как уже отмечалось, затраты на проектирование, изготовление и эксплуатацию (переточки) специальных червячных фрез под каждый конкретный профиль зубчатого колеса. При зубофрезеровании только одной детали их удельный вес в структуре себестоимости операции составляет 85,9 %, уменьшаясь до 25,5 % при обработке 50 деталей.

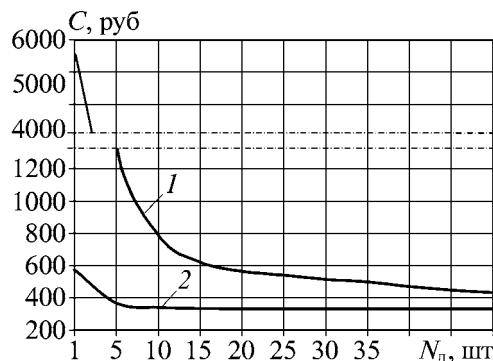


Рис. 7.42. Зависимость себестоимости профилирования зубчатого колеса зубофрезерованием (1) и профильным глубинным шлифованием (2) от числа изготавливаемых деталей

В случае профильного глубинного шлифования затраты на инструментальное обеспечение включают в себя стоимость высокопористого шлифовального круга и алмазного правящего ролика с учетом их износа на каждой операции. При профильном шлифовании применяется универсальный шлифовальный и правящий инструмент, пригодный для формообразования практически любого типоразмера цилиндрических и конических зубчатых колес. Удельный вес затрат на инструмент в структуре себестоимости при зубошлифовании одной детали составляет всего 14,5 % (почти в 6 раз меньше, чем при зубофрезеровании), повышаясь до 25 % при изготовлении партии из 50 зубчатых колес.

При изготовлении только одного зубчатого колеса себестоимость операции профилирования глубинным шлифованием в 9,7 раз меньше, 5 штук – в 3,7 раза, даже при изготовлении 50 штук себестоимость нового процесса сохраняется в 1,3 раз ниже, чем при обработке зубофрезерованием. Это дает экономию на одно колесо только по себестоимости при изготовлении партии из 5 деталей около 1000 руб, а для партии из 10 деталей – 450 руб.

Практически одинаковый характер с рис. 7.42 имеет зависимость удельных за-

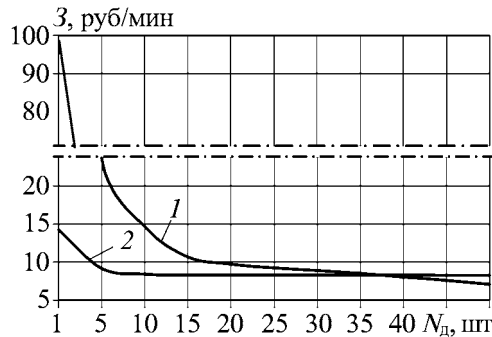


Рис. 7.43. Зависимость удельных затрат на профилирование зубчатого колеса зубофрезерованием (1) и профильным глубинным шлифованием (2) от числа изготавливаемых деталей

трат (себестоимость, отнесенная к минуте машинного времени) от объема партии изготавливаемых зубчатых колес (рис. 7.43). При этой оценке эффективности новой технологии глубинное шлифование также имеет большое преимущество перед зубофрезерованием: при изготовлении только одной детали, удельные затраты меньше в 6,2 раза, 5 деталей – в 2,4 раза и только при обработке более 37 деталей удельные затраты при зубофрезеровании становятся меньше, чем при глубинном шлифовании (при обработке 50 деталей в 1,2 раза).

Таким образом, приведенный анализ свидетельствует о чрезвычайно высокой эффективности профилирования зубчатых колес методом глубинного шлифования при изготовлении небольших партий – до 50 зубчатых колес в сравнении с традиционной технологией зубофрезерования. Расчеты также показывают, что профильное глубинное шлифование экономически целесообразно применять и при изготовлении больших партий деталей. А учитывая его универсальность как метода профилирования высокоточных зубчатых колес практически любой конфигурации и степени сложности, новый процесс можно рассматривать как альтернативу методам лезвийной обработки с последующим чистовым шлифованием.

Дополнительно к приведенным расчетным характеристикам эффективности новой технологии можно также отметить, что при этом число базовых операций профилирования зубчатых колес снижается с 3 до одной при соответствующем уменьшении потребности в инструменте и оборудовании, времени межоперационного пролеживания детали, ее установки на станке, наладке и т.д. Трудоемкость профилирующих операций в структуре общей трудоемкости изготовления зубчатого колеса составляет 18...35 % в зависимости от степени его сложности. Следовательно, внедрение новой технологии обеспечивает снижение общей трудоемкости изготовления зубчатого колеса в среднем на 8 %.

Можно также добавить, что комплексное использование новых высокопористых кругов на всех операциях шлифования зубчатых колес и соединений устраняет брак по прижогам и микротрещинам шлифовочного характера, который ранее достигал 15...30 % от общего числа обработанных деталей. Это дополнительный источник экономии материальных и энергетических ресурсов.

Опыт промышленного освоения новой технологии на предприятиях различных отраслей подтверждает ее чрезвычайную гибкость, универсальность и эффективность при изготовлении зубчатых колес, у которых конструктивные особенности, применяемые материалы и эксплуатационные требования, в том числе к точности обработки, отличаются от колес, используемых в авиации.

В заключение, обобщая все вышеизложенное, можно отметить, что принципиальным достижением результатов работы, изложенной в главе 7, является кардинальное изменение применяемых в настоящее время технологических принципов изготовления зубчатых колес и соединений. Как уже отмечалось, промышленная практика при их изготовлении использует методы лезвийной и абразивной обработки, причем соотношение станоч-

ного парка при этом приблизительно составляет 70 и 30 % соответственно.

Освоение разработанной технологии при модернизации существующих или создании новых производств зубчатых колес и соединений дает возможность исключить использование большого числа дорогостоящего зуборезного оборудования и сложнофасонного инструмента из быстрорежущих сталей и твердых сплавов и затраты на их изготовление и эксплуатацию. Это дополнительный источник экономии и важный фактор ресурсосбережения и экологической безопасности машиностроительного производства.

Можно также отметить, что новая технология, как показали исследования и промышленный опыт ее освоения, универсальна, мобильна и экономична по отношению к известным типам зубчатых колес: их изготовление в любых количествах может быть очень быстро организовано на оборудовании с универсальными

правлящими средствами и программируемым циклом обработки с применением нового высокопористого абразивного инструмента стандартных форм и размеров. При мелкосерийном и единичном производствах, а также изготовлении сложных в конструктивном и технологическом исполнении зубчатых колес и соединений, альтернативы новой технологии по этим показателям среди известных вариантов нет.

Разработанную технологию, которая сочетает в себе формообразование методом глубинного шлифования и чистовую обработку зубчатых колес, выполняемых на одном станке с помощью универсальных высокопористого инструмента и направляющих средств можно рассматривать как репрезентативную. Она легко и в короткие сроки может обеспечить изготовление маленьких партий в противовес известным автоматизированным переналаживаемым системам обработки.

Глава 8

ВЫСОКОСКОРОСТНОЕ ШЛИФОВАНИЕ БЕЗ ПРИМЕНЕНИЯ СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СРЕД

Современное промышленное производство решает в настоящее время сложную и противоречивую задачу: как повысить производительность и экономичность изготовления своей продукции при одновременном выполнении требований экологической безопасности технологического процесса.

Одной из экологических проблем, связанных с применением процессов механической обработки и, в частности, шлифования является использование в больших объемах смазочно-охлаждающих технологических сред. Возрастающие объемы их использования, с одной стороны, повышают себестоимость обработки деталей. С другой стороны, увеличивается количество отходов, которые после шлифования представляют собой мелкодисперсный шлам из смеси абразивов и стружки, трудно поддающийся утилизации.

В рамках международного проекта EUREKA ABRASIVE-2000 "Сухое шлифование – экологически безопасное шлифование" были проведены научно-исследовательские работы и промышленные испытания процесса шлифования без применения смазочно-охлаждающих средств. Это направление в решении проблемы экологической безопасности шлифования является наиболее радикальным среди других известных подходов. Ее в принципе удалось решить за счет использования высокопористого абразивного инструмента, изготовленного по новой экологически безопасной технологии.

Проект был инициирован и выполнялся под руководством Фраунхоферского института станков и пресового оборудо-

вания – Fraunhofer – IWU Chemnitz, на экспериментальной базе которого были выполнены с участием автора основные исследования.

В проекте также принимали участие МГТУ "Станкин" и известные зарубежные фирмы Германии, Австрии и Чехии.

В данной главе представлены результаты научных исследований, которые проводились в соответствии с программой международного проекта. В представленных материалах описаны различные методологические подходы к анализу работоспособности шлифовальных кругов, особенности правки алмазными инструментами без охлаждения, влияния режимов обработки на процесс высокоскоростного сухого шлифования и др.

Важнейшим достижением совместного сотрудничества специалистов из разных стран стала разработка научно обоснованных предпосылок для практического применения высокопроизводительного шлифования без охлаждения со скоростями до 100 м/с и создание высокопористого абразивного инструмента на керамических связках, эффективно работающего в таких экстремальных условиях.

8.1. АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

Обработка резанием остается доминирующим методом формообразования деталей в современном машиностроении, эффективность которого в значительной степени определяется применением смазочно-охлаждающих технологических сред (СОТС).

Роль смазочно-охлаждающих сред в обработке резанием постоянно возрастает. Интенсификация традиционных методов и внедрение новых более производительных методов обработки, возрастающее применение труднообрабатываемых материалов, усложнение конструкций и повышение требований к точности и качеству обработки – все эти тенденции, так или иначе, связаны с увеличением объемов применения СОТС. Франция, например, по данным 1994 г., ежегодно потребляет до 70 млн л, а годовая потребность США на тот период достигла 230 млн л [122]. Нет оснований считать, что за прошедшее время потребность в СОТС в промышленно развитых странах уменьшилась.

Известно, что эффективность составов современных СОТС определяется оптимальным сочетанием ее разнообразных функциональных свойств, включая охлаждающий, смазывающий, моющий, защитный эффекты, способность уменьшать энергию диспергирования обрабатываемого материала и упрочнять рабочие поверхности режущего инструмента. Поэтому современные СОТС представляют собой сложное сочетание многочисленных компонентов на основе серы, хлора, фосфора, азота и т.д., различные мыла, поверхностно-активные вещества, хладагенты, антикоррозионные и моющие добавки, антивспениватели, биоциды и многие другие. Для их утилизации выделяется все больше средств: только в Германии на утилизацию СОТС ежегодно расходуется свыше миллиарда евро [124].

Применяемые СОТС, особенно масляные, а также многие из компонентов, входящих в их состав, вредны для здоровья человека [103, 136]. По мнению Р.М. Матвеевского, трихлорэтилен, ортофосфаты могут вызывать депрессию нервной системы; нитриты и комбинации с диэтанолaminaми – это канцерогены; свинцовые мыла и хлорированный нафталин приводят к кожным заболеваниям; сернистые соединения – токсичны. Изменения pH в процессе работы СОТС также

могут вызывать кожные заболевания. В результате термодеструкции смазочно-охлаждающих технологических сред при резании окружающая воздушная среда загрязняется химическими веществами, такими как масляные аэрозоли, альдегиды, хлористый водород, формальдегиды, нитрит натрия и другие, которые зачастую не являются индифферентными для организма человека.

В этой связи проблема воздействия используемых смазочно-охлаждающих технологических средств на экологию окружающей среды и организм человека является одной из актуальных задач современного машиностроения. Постоянно ужесточающиеся требования к защите окружающей среды и обслуживающего персонала от техногенных воздействий выдвигают на первое место безопасность СОТС, простоту и экономичность их утилизации. Далее следуют такие параметры, как совместимость СОТС с инструментальным и обрабатываемым материалами, возможности их регенерации. Только после этого оценивается эффективность СОТС и их окупаемость [137].

Абразивная обработка и, в частности, процессы шлифования имеют свои особенности, которые выделяют их среди других методов обработки резанием. Процессы шлифования отличаются высокая интенсивность теплообразования, которая может приводить к нежелательным структурно-фазовым изменениям в поверхностном слое обрабатываемой детали и повышенному расходу инструмента. Для снижения температуры резания наиболее эффективным и распространенным методом в настоящее время остается применение различных смазочно-охлаждающих технологических средств с оптимально подобранным составом, расходом и способом подачи в зону шлифования. Расход СОТС при шлифовании, как правило, больше, чем в аналогичных по производительности методах лезвийной обработки – протягивании, фрезеровании и др.

Стремление интенсифицировать процессы шлифования путем увеличения скорости и глубины резания приводит к пропорциональному возрастанию теплонапряженности в зоне обработки и необходимости увеличивать расход смазочно-охлаждающей жидкости для снижения риска термических повреждений обрабатываемой детали. Реализация современных высокопроизводительных методов шлифования, например, высокоскоростного шлифования по методу Гюринга или профильного глубинного шлифования обеспечивается при подаче смазочно-охлаждающей жидкости под давлением 0,5...2 МПа с расходом до 200...400 л/мин и связано с применением специальных устройств для ее фильтрации и охлаждения, что усложняет конструкцию станочной системы и удорожает стоимость обработки детали [17, 53].

Особенностью процесса шлифования является также формирование после обработки мелкодисперсного шлама, который трудно поддается утилизации. По данным работы [6] после шлифования образуется смесь абразива (до 15 % по массе) и металлической стружки (от 37 до 92 %) с дисперсностью 1...200 мкм, в состав которой входит вода (2...25 %), твердые и жидкие нефтяные фракции – масла, парафины и пр. (4...23 %). Шлам представляет собой весьма устойчивую мелкодисперсную систему, стабилизированную парафинами и стеарином. Технические трудности утилизации предопределены его степенью окисленности, особенностями структуры и удельным содержанием компонентов.

Затраты, обусловленные использованием смазочно-охлаждающей жидкости при шлифовании, возрастают с повышением производительности обработки. Одновременно повышается негативное воздействие на окружающую среду по причинам вредности СОТС и отсутствия рациональных методов утилизации образующегося после обработки шлама. Применение смазочно-охлаждающих жидко-

стей при шлифовании, таким образом, оказывает существенное влияние на экологию и себестоимость обработки.

Решение проблемы экологической безопасности процессов шлифования, как и в целом обработки резанием, не может не учитывать и проблему обеспечения конкурентоспособности получаемой продукции. Оптимальным может быть ее решение при условии сохранения или, лучше, повышении производительности и экономичности обработки. Такой вариант решения представляется, на первый взгляд, труднодостижимым, но имеющий опыт свидетельствует о его реальности.

Можно выделить несколько направлений повышения экологической безопасности применительно к процессам шлифования.

Наиболее простым решением представляется создание экологически безопасных составов СОТС, в которых производится замена компонентов (минеральные масла, хлор и его соединения, азотистые и серные добавки, фенолы и др.), оказывающих вредное воздействие на оператора и оборудование, на безвредные вещества аналогичного действия. В этом же аспекте можно рассматривать и создание новых безопасных СОТС.

Однако простота этого решения проблемы экологической безопасности обратно пропорциональна сложности создания составов, оптимально сочетающих в себе эффективность многофункционального воздействия на процесс шлифования, безвредность и экономичность использования. При шлифовании, когда в зоне резания развиваются высокие температуры вплоть до температуры плавления обрабатываемого материала в сочетании с большими контактными давлениями, происходит сильное физико-химическое взаимодействие – схватывание контактирующих материалов и их взаимной диффузии. Эти явления негативно сказываются на работоспособности инструмента, производительности и качестве обработки. Эффективным средством их предотвращения

является создание защитных термостойких пленок за счет состава СОТС или импрегнирования рабочей поверхности шлифовального круга.

Другим направлением является ограниченная или дозированная подача смазочно-охлаждающих средств в зону резания, в том числе через поры шлифовального круга.

Оригинальный подход к решению проблемы экологической безопасности шлифования предложен Л.В. Худобиным и Н.И. Вектасовым в виде многофазной подачи, при которой одновременно используются несколько различных по составу и свойствам сред. Практическая реализация этого подхода связана с созданием композиционных шлифовальных кругов, имеющих конструктивные элементы для размещения твердых смазочных композиций или пластичной смазки. При шлифовании таким кругом в зону обработки подается СОТС относительно простого химического состава, которая обладает хорошими охлаждающими и моющими свойствами.

Радикальный вариант решения проблемы экологической безопасности процесса шлифования – это отказ от использования каких-либо смазывающе-охлаждающих средств. Это направление не является новым и оригинальным, так как давно известен и применяется в промышленности МААГ-метод зубошлифования тарельчатыми шлифовальными кругами без охлаждения обкатом с единичным делением. Также без СОТС шлифуют твердосплавный инструмент кругами из карбида кремния, ведут обработку "вручную" пера лопаток турбинных двигателей шлифовальными кругами, зачистку сварных швов и обработку фасонных поверхностей шлифовальными головками и т.д. Часто отказываются от применения СОТС при шлифовании ответственных деталей высокой точности, когда нежелательны температурные деформации от смены режима нагрев-охлаждение. В случае обработки сборочных узлов или комплектов,

где недопустимо по техническим требованиям присутствие СОТС, тоже используют сухое шлифование.

Указанные единичные примеры свидетельствуют, однако, о том, что шлифование без охлаждения, или сухое шлифование, применяется либо как средство повышения точности и качества прецизионной обработки, либо как вынужденная мера при особых требованиях к обрабатываемым изделиям. Задачи повышения производительности и экономичности при этом не ставятся, и научно обоснованные предпосылки широкого внедрения высокопроизводительных методов шлифования без охлаждения в промышленность в настоящее время отсутствуют. Экономическая целесообразность внедрения шлифования без охлаждения обусловлена не только отказом от применения СОТС. Образующийся при сухом шлифовании шлам легче поддается утилизации: его рекуперация возможна при использовании только магнитной сепарации для разделения на металлическую и абразивную фракции. Во всех других случаях с применением смазочно-охлаждающих средств сохраняется проблема экономичной утилизации отходов шлифования.

Повысить экологическую безопасность процессов шлифования, отказавшись от применения смазочно-охлаждающих средств, при одновременном повышении производительности и снижении себестоимости обработки – такая цель была поставлена в международном проекте "Сухое шлифование – экологически безопасное шлифование". Проблема высокоэффективного шлифования без применения смазочно-охлаждающих средств связана с решением взаимообусловленных задач: выбора и оптимизации параметров шлифовальных кругов и режимов сухого шлифования, а также правящего инструмента и условий сухой правки, разработки требований к станку по удалению стружки и продуктов износа шлифовального круга.

Рассматривая сухое шлифование как метод экономичной и экологически безопасной обработки, необходимо отметить, что к этому процессу должны предъявляться требования по обеспечению точности и качества обработанной детали, включая безусловное отсутствие термических дефектов – прижогов, трещин, нежелательных структурно-фазовых изменений в поверхностном слое и др. Только сочетание высокой производительности и экономичности с высоким качеством обработки будет определять эффективность и область практического использования этого процесса.

Впервые предпринята попытка комплексного исследования процесса шлифования – его термодинамических характеристик, работоспособности инструмента и состояния обработанной поверхности детали при отсутствии СОТС в широком диапазоне изменения условий обработки, включая параметры режима шлифования и технологические свойства абразивного инструмента.

Такое исследование представляет большую научную ценность, так как раскрываются взаимосвязи и моделируется взаимодействие шлифовального круга и обрабатываемой детали в экстремальных условиях интенсивного съема материала без внешнего принудительного охлаждения. Охлаждение всегда было мощным возмущающим фактором процесса шлифования, который трудно достоверно учитывать в термодинамических расчетах. В данном случае процесс протекает как бы в «чистом» виде, что позволяет раскрыть истинные его закономерности для последующего управления за счет оптимизации характеристики инструмента, параметров режима шлифования и, при необходимости, условий охлаждения.

8.2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ РЕАЛИЗАЦИИ СУХОГО ШЛИФОВАНИЯ

Теоретические предпосылки реализации сухого шлифования основаны на

идее совмещения в одном процессе высоких скоростей обработки – до 100 м/с, с применением абразивного инструмента различной твердости на керамических связках с высокими номерами структур – 9...20, т.е. с пористостью до 70 %.

Работа резания при шлифовании, как известно, практически полностью переходит в теплоту, поэтому мощность шлифования определяет интенсивность теплообразования в зоне обработки, а кинематика взаимодействия шлифовального круга с обрабатываемой деталью – интенсивность и распределение тепловых потоков в деталь, с удаляемой стружкой и в окружающую среду. На интенсивность теплообразования в значительной степени оказывает влияние характеристика шлифовального круга (точнее, его режущая способность) и режим шлифования, в меньшей степени – условия правки абразивного инструмента. На распределение тепловых потоков в зоне обработки, скорость и время нагрева детали влияют в основном параметры режима шлифования: скорость вращения детали, глубина обработки и скорость круга [21, 57].

Шлифование с повышенными скоростями приводит к возрастанию интенсивности теплообразования и, как следствие, к чрезвычайно высоким контактным температурам в зоне обработки. При этом, несмотря на увеличение мощности шлифования, собственно работа резания, затрачиваемая на срез обрабатываемого материала, с увеличением скорости шлифовального круга уменьшается. Это объясняется особенностями физики процесса резания на высоких скоростях, когда механизм удаления материала под воздействием высокоскоростной деформации из пластичного разрушения трансформируется в квазихрупкое разрушение, которому предшествует существенно меньший объем упругопластической деформации обрабатываемого материала. Формирование новой поверхности в этих условиях проходит с меньшими энергетическими затратами, что становится причиной

уменьшения силы резания при увеличении скорости шлифования.

Поэтому с увеличением скорости круга составляющая мощности шлифования, связанная с собственно процессом резания, минимизируется, а ее вклад в интенсивность теплообразования существенно снижается.

При увеличении скорости шлифовального круга пропорционально, как правило, возрастает и скорость вращения обрабатываемой детали для сохранения постоянства отношения этих скоростей, что, в свою очередь, приводит к перераспределению тепловых потоков в зоне обработки: все меньше тепла уходит в заготовку и больше тепла удаляется вместе со стружкой [93].

Высокие скорости вращения шлифовального круга сопровождаются образованием турбулентного воздушного потока, охлаждающего зону обработки, мощность которого пропорциональна скорости круга. Интенсивность охлаждения эффекта будет выше, если использовать при обработке шлифовальный круг с развитым рельефом рабочей поверхности, например, за счет большого количества пор. Быстрое вращение заготовки также дает дополнительное охлаждение.

Работа резания при шлифовании – это в основном работа трения абразивных зерен об обрабатываемую поверхность, удельный вес которой составляет до 70...80 % от общих энергетических затрат на съем материала. Это обусловлено тем, что часть абразивных зерен, которые находятся на рабочей поверхности шлифовального круга, не участвуют в процессе резания, а только деформируют (сминают) обрабатываемый материал, являясь существенным источником теплообразования при шлифовании [13, 54].

В этой связи применение шлифовальных кругов с уменьшенным содержанием абразивных зерен в объеме инструмента и, соответственно, на его рабочей поверхности, т.е. с высокими номерами структур, является фактором снижения

работы трения при шлифовании и, как следствие, интенсивности теплообразования [59].

Естественно ожидать, что при меньшем количестве зерен на рабочей поверхности инструмента, все большее их число будет активно участвовать в работе резания и более полно будет использован их режущий потенциал для удаления материала [80].

Благоприятные условия для шлифования обеспечиваются также и крупнозернистыми абразивными кругами, у которых количество зерен на поверхности инструмента уменьшается с увеличением размера зерна более существенно, чем с уменьшением их объемного содержания. Практика шлифования также свидетельствует о том, что с повышением зернистости круга снижается теплонапряженность процесса и вероятность появления дефектов шлифовального характера – трещин, прижогов, структурно-фазовых изменений в поверхностном слое обработанной детали и др.

Однако по совокупности факторов, которые оказывают воздействие на процесс шлифования, предпочтение следует отдать высокопористым кругам, чем кругам с абразивными зёрнами больших размеров.

Оптимальные условия для формирования срезов с точки зрения физики процесса микрорезания достигаются при использовании инструмента с абразивными зёрнами небольших размеров. При увеличении размера зерен, например, от 120 до 400 мкм для обеспечения условий шлифования с минимальной деформацией обрабатываемого материала необходимо увеличить глубину шлифования t почти в 9,7 раз, что характерно для черновой или предварительной обработки.

Другими ограничениями по использованию крупнозернистых шлифовальных кругов являются требования по шероховатости обработанной поверхности детали и технологические трудности получения инструмента для работы с высокими рабочими скоростями [93].

В конечном итоге оптимальный выбор характеристики шлифовального круга предусматривает взаимосвязанное назначение зернистости и структуры инструмента с учетом безусловных ограничений по обеспечению заданных параметров по интенсивности съема материала, шероховатости обработанной поверхности детали и теплонапряженности в зоне резания. Оптимизация других характеристик высокопористого инструмента по материалу абразивного зерна, твердости и эксплуатационным свойствам связки учитывает, помимо указанных ограничений, необходимость обеспечения повышенной износостойкости и экономичности процесса шлифования.

Приведенный анализ подтверждается практикой использования высокопористых шлифовальных кругов [59] и результатами предварительных исследований процесса шлифования высокопористыми кругами без применения смазочно-охлаждающих средств [140].

При наличии пор на рабочей поверхности шлифовального круга, где может собираться стружка, повышается режущая способность инструмента, так как увеличивается время, когда может наступить его "засаливание", т.е. потеря режущих свойств за счет заполнения пор стружкой. Кроме того, подбирая оптимальное соотношение зернистость–твердость–структура за счет оптимизации состава абразивной массы и количества керамической связки, можно обеспечить условия шлифования, при которых процесс изнашивания шлифовального круга протекает в режиме самозатачивания, т.е. сохранения постоянной режущей способности в течение длительного времени обработки при оптимальной его износостойкости и формоустойчивости.

Преимущество легкой и быстрой правки абразивных кругов на керамической связке на любой профиль, в сочетании с малым числом правок за период эксплуатации инструмента, становятся

дополнительным фактором снижения себестоимости сухого шлифования.

Таким образом, применение высокоструктурных или высокопористых абразивных кругов с повышенной режущей способностью обеспечивает минимальную интенсивность теплообразования при шлифовании, а повышение скорости обработки в сочетании с оптимизацией других параметров режима обеспечивает минимальный нагрев обрабатываемой заготовки. Таковы предпосылки для реализации и управления процессом сухого шлифования в отсутствие внешнего принудительного охлаждения.

Другой особенностью проведенного исследования стала высокая скорость шлифования – до 100 м/с.

В теории резания, которая базируется в основном на описании обработки материалов лезвийным инструментом, нет однозначного представления о влиянии высоких скоростей резания на выходные параметры процесса. Противоречивость прогнозных оценок объясняется неопределенностью возможной реакции обрабатываемого материала на воздействие режущего клина при околосвуковой и звуковой скоростях. Именно к таким скоростям приближается современная технология шлифования, рабочие скорости которой на два-три порядка превышают достигнутый уровень в лезвийной обработке.

Перспективы и целесообразность применения высоких и сверхвысоких скоростей при обработке резанием можно оценить с помощью положений теории дислокаций.

Наличие дефектов кристаллической структуры упрочняет материал и существенно снижает работу по его пластической деформации и разрушению. Однако эффект действия, например, дислокаций в механизме пластической деформации обусловлен критической скоростью ее движения. На наличие критической скорости движения дислокации, которая меньше скорости звука, впервые указали Я.И. Френкель и Т.А. Конторова.

Действительно, такой вывод следует из уравнения волновой механики сплошных сред для малых пластических деформаций, где уравнение движения имеет вид

$$\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 W}{\partial \tau^2}, \quad (8.1)$$

где τ – время; c – скорость волн сдвига в данной среде или скорость звука.

Практический предел скорости достигается, когда энергия, которую движущаяся дислокация получает от прикладываемой нагрузки, компенсируется той энергией, которую дислокация теряет вследствие различных процессов рассеяния. Поэтому предельная скорость пластической деформации не может достигнуть скорости звука.

Наибольший интерес представляет повышение скорости в процессах обработки резанием. Разберем некоторые теоретические аспекты повышения скорости разрушения металлов.

Из опытов известно, что существует критическая скорость распространения трещин, выше которой не происходит пластической релаксации [65, 77, 94].

Движущей силой распространения трещины является энергия деформации W , которая уравнивается поверхностной энергией γ и кинетической энергией E_k :

$$E_k = \beta \frac{\dot{\epsilon}^2}{c_0^2 W}, \quad (8.2)$$

где c_0 – скорость волн напряжения; β – постоянная, связанная с разделением поверхностей трещины.

Тогда предельная скорость распространения трещины Гриффитса равна

$$v_c = \beta c_0 \left[1 - \frac{\gamma}{W} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (8.3)$$

и составляет около 1/3 скорости звука в материале.

Выше предельной скорости распространения трещины необходимая энергия

разрушения составит

$$U_p \approx 2\gamma \approx 0,2 G. \quad (8.4)$$

Такую энергию, необходимую для разрыва атомных связей, можно получить в результате концентрации напряжений в локализованной области разрушения. Необходимый эффект может быть получен в результате повышения скорости воздействия инструмента.

Действительно, при значительном увеличении скорости воздействия неоднородность напряженного состояния в объеме настолько резко увеличивается, что возникают локальные сильно деформированные зоны, непосредственно прилегающие к месту воздействия.

Следовательно, при повышении скорости воздействия выше предельной скорости распространения трещины, разрушение будет являться абсолютно хрупким. Скорости распространения волн напряжения в твердых телах заключены приблизительно в интервале от 900 до 6000 м/с, предельная же скорость распространения трещин находится в пределах 1500...2000 м/с. Таким образом, область абсолютно хрупкого разрушения, когда справедливо выражение (8.4), составляет примерно $2000 < v_c < 6000$ м/с.

С другой стороны, скорость звука в физике твердого тела рассматривается, по существу, как сигнал, который переносится в периодической атомной структуре волнами деформации. При скорости выше скорости распространения сигнала, разрушение можно рассматривать как сдвиг путем мгновенного разделения атомных слоев вдоль всей плоскости разрушения. Необходимая энергия разрушения в этом случае может быть определена из схемы жесткого сдвига двух атомных плоскостей.

Сила, необходимая для того, чтобы сдвинуть верхнюю атомную плоскость относительно нижней, является периодической функцией с периодом a и симметричной для $x > 0$ и $x < 0$. Простейшая

функция, удовлетворяющая этим условиям, в теории упругости следующая:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{Ga^3}{2\pi d} \sin \frac{2\pi x}{a}, \quad (8.5)$$

$$U_p = \int F dx = -\frac{Ga^4}{4\pi^2 d} \cos \frac{2\pi x}{a} + C, \quad (8.6)$$

при $x = 0$, $C = \frac{Ga^4}{4\pi^2 d}$;

$$U_p = \frac{Ga^4}{4\pi^2 d} \left(1 - \cos \frac{2\pi x}{a} \right), \quad (8.7)$$

с максимумом

$$U_p = \frac{Ga^4}{4\pi^2 d}. \quad (8.8)$$

По расчетам энергия разрушения при скорости выше скорости звука будет в 4 раза меньше энергии разрушения в интервале скоростей $v_c < v < v_{зв}$. В данном случае следует, однако, говорить лишь о снижении сопротивления обрабатываемого материала разрушению, так как достижение высоких скоростей инструментом требует больших затрат энергии.

Возможность разрушения металлов при сверхзвуковых скоростях рассматривает и волновая механика сплошных сред, исследуя разрушение металла как результат действия напряжений высоких амплитуд. В этом случае амплитуды напряжений превышают на несколько порядков значения начальных пределов текучести и становятся сравнимыми, или даже превышают значение модуля упругости. Сопротивление среды принимается почти пренебрежимо малым при описании природы движения, а механическое поведение материала аппроксимируется как поведение жидкости.

Повышение скорости разрушения выше скорости звука интересно и с другой точки зрения. Как известно, скорость распространения тепловых волн определяется скоростью звука. Поэтому следует

ожидать при сверхзвуковых скоростях "отставание" теплового потока. На практике это подтверждается уменьшением коэффициента теплопроводности металлов с увеличением скорости обработки.

8.3. АБРАЗИВНЫЙ ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО СУХОГО ШЛИФОВАНИЯ

Абразивный инструмент, как известно, является определяющим элементом технологической системы шлифования. От правильного назначения характеристики шлифовального круга в значительной степени зависит характер протекания процесса шлифования, уровень его производительности, интенсивность теплообразования, износостойкость инструмента, точность и качество обработки, особенно при отсутствии принудительного охлаждения.

При шлифовании без смазочно-охлаждающей среды взаимодействие каждого абразивного зерна и шлифовального круга в целом с обрабатываемым материалом происходит в наиболее экстремальных условиях, существенно отличных от шлифования с охлаждением. В отсутствие охлаждающего эффекта и защитных пленок при сухом шлифовании интенсифицируются контактные физико-химические явления. Под воздействием высоких давлений и температур в зоне резания происходит адгезионное схватывание абразива с обрабатываемым материалом, взаимная диффузия химических элементов, увеличение работы трения связки и абразивных зерен шлифовального круга с обрабатываемой поверхностью детали и, как следствие, разупрочнение и разрушение абразивных зерен и формирование поверхностного слоя детали с неблагоприятными для условий эксплуатации свойствами.

В этих сложных термодинамических условиях работоспособность шлифовального круга будет определяться способностью абразивных зерен на рабочей по-

верхности инструмента сопротивляться указанным контактными физико-химическим явлениям и, прежде всего, их термическому разупрочнению и разрушению, а также способностью связки удерживать абразивные зерна до потери ими режущих свойств.

Установлены следующие основные направления создания шлифовальных кругов с характеристиками, наиболее оптимальными для условий сухого шлифования закаленной стали 45, принятой в данных экспериментальных исследованиях. К ним можно отнести:

- назначение оптимальной модификации оксида алюминия в качестве абразивного материала, устойчивого к адгезии со сталью при высоких температурах и с повышенной сопротивляемостью к хрупкому разрушению;
- выбор зернистости круга, обеспечивающей заданную производительность шлифования при минимальной шероховатости обработанной поверхности;
- поиск оптимального соотношения структуры (пористости) шлифовального круга и его твердости для обеспечения минимальной интенсивности теплообразования и максимальной износостойкости инструмента;
- подбор керамической связки, которая прочно удерживает абразивные зерна в условиях интенсивного теплообразования при минимальной работе трения с обрабатываемой поверхностью детали.

Главным требованием к абразивному инструменту для сухого шлифования является выполнение указанных условий в сочетании с повышенной прочностью на разрыв, чтобы обеспечить его работоспособность при обработке со скоростями резания в диапазоне от 35 до 100 м/с и более.

Шлифовальные круги для проекта были изготовлены фирмами Rappold Winterthur Schleiftechnik GmbH (Австрия)* и Weber & Reik Schleifmittelwerke Dresden GmbH (Германия)**. Исследовали также

высокопористые шлифовальные круги, изготовленные по технологии, разработанной автором в МГТУ "Станкин", на основе невымарающих порообразователей – микросфер различного состава и размеров, в том числе в сочетании с различными вымарающими порообразователями. Эти круги были изготовлены совместно с Carborundum Electrite a.s. (обозначение в последнем изложении – CE-St), Rappold Winterthur Schleiftechnik GmbH (RW-St) и в России на ОАО "Завод "Ильич" (RU-St).

Все шлифовальные круги были изготовлены с размерами 500×80×203,2 мм на различных керамических связках. В качестве абразивного материала использовался оксид алюминия различных марок и модификаций с размером зерна в диапазоне от 120 мкм (№ 100) до 500 мкм (№ 36). В качестве абразива в шлифовальных кругах Reik использовалась также абразивная смесь из зерен корунда различных размеров. Твердость шлифовальных кругов изменялась от F до N, а структура инструмента от № 9 до № 20.

Шлифовальные круги Reik из корунда марки 21A на различных бакелитовых связках 21A 36 L 9/11 B21, 21A 46 L 8 B25 и 21A 36 L 13/47 B21 в предварительных экспериментах показали очень низкую износостойкость и в дальнейшем не исследовались.

Характеристики исследованных при сухом шлифовании кругов представлены в табл. 8.1. В качестве основных характеристик шлифовальных кругов приведены данные по модулю упругости (*E*-модуль), твердости по методике RW (*Grado*) и по глубине лунки, полученной методом Маккензи. Возможная предельная скорость шлифования для конкретного шлифовального круга может быть определена из значения его разрывной скорости.

*В дальнейшем изложении шлифовальные круги этой фирмы сокращенно обозначаются RW.

**Аналогично круги этой фирмы в дальнейшем обозначаются Reik.

8.1. Исследованные круги при сухом шлифовании

№ п/п	Характеристика	Плотность, г/см ³	<i>E</i> -модуль, ГПа	Твердость <i>Grado</i> (RW); по глубине лунки	Разрывная скорость, м/с	Фирма	Особенности изготовления
1	21A/74A 46 K 16 V11	1,66	20,4	83,5	93,6	Reik	Смесь абразивов: 21A+40 % сферокорунда
2	21A/72A 36 K 14 V11	1,90	29,5	70,3	99,3	Reik	Смесь абразивов: 21A+20 % сферокорунда
3	3CB3 46/60 J 10 V09 R	1,92	33		120	Reik	Смесь зернистостей 46 и 60, и абразивов 21A и 3CB3
4	21A 36 K 13 V11	1,93	36,9	53	92,1	Reik	
5	21A 46/60 K 10/34 V09	1,94	35	53,5	117,2	Reik	Смесь зернистостей 46 и 60
6	21A 36 K 13 V14	1,95	38,8	43,7	91,5	Reik	
7	21A 46/60 K 10/43 V09	1,96	36,9	43,2	116,7	Reik	Смесь зернистостей 46 и 60
8	21A 46/80 K 9/9 V09	2,05	40,9	40,2	112	Reik	Смесь зернистостей 46 и 80
9	3CB3 100 J 7 12/40 V09 R	–	–	–	[80]*	Reik	
10	21A 100 J 12/34 V09 R	–	–	–	[80]*	Reik	
11	85S 100 K 15 PPVP601	1,53	47	32	85	RW	
12	49A 100 M 15 PVP601	1,84	42,1	21	105	RW	

Продолжение табл. 8.1

№ п/п	Характеристика	Плотность, г/см ³	E-модуль, ГПа	Твердость <i>Grado</i> (RW); по глубине лунки	Разрывная скорость, м/с	Фирма	Особенности изготовления
13	85A 100 M 15 PVP601	1,92	44,6	19	105	RW	
14	85A 100 L 15 PVP601	1,97	48,4	25	112	RW	
15	49A 100 L 15 PVP601	1,99	49,3	22	112	RW	
16	85A 46 L 15 VB MF 901 WS-Z	2,05	47,3	42	136	RW	Зерно SG
17	49A 46-0 L 15 VB MF 901 WS-Z	2,07	48,7	40	135	RW	Смесь зернистостей 46, 80, 100
18	85A 46 L 15 VB MF 901 WS-Z	2,09	49,1	39	137	RW	Зерно Cubitron
19	85A 100 K 15 PVP601	—	—	—	[80]*	RW	
20	49A 90 F 20 V	1,65	31,1	57	127	RW-St	Упрочненное отверстие
21	49A 90 G 18 V	1,80	33,2	48	132,5	RW-St	Упрочненное отверстие
22	49A 90 I 14 V	1,86	38,7	37	137	RW-St	Упрочненное отверстие
23	49A 90 H 12 V	1,92	42,4	40	128,6	RW-St	Упрочненное отверстие
24	25A 16П CM1 18 K5 EK1 80 M 18 V	1,76	48,6	$h_{11} = 5,5$ мм	92,8	RU-St	
25	99BA 90 M 14 V	1,86	51,1	$h_{11} = 3,4$ мм	91,6	CE-St	
26	99BA 90 N 14 V	1,97	53,2	$h_{11} = 3,2$ мм	131	CE-St	
27	99BA 90 M 19 V	1,66	—	$h_{11} = 3,5$ мм	138,7	CE-St	

* Допустимая рабочая скорость круга.

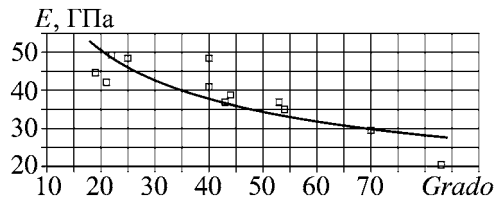


Рис. 8.1. Взаимосвязь модуля упругости шлифовального круга с его твердостью

В зависимости от разрывной скорости исследованные шлифовальные круги могли работать на скорости 60...105 м/с. В отдельных случаях круги изготавливали с упрочненным отверстием из более плотной абразивной массы, что обеспечивало дополнительное повышение разрывной прочности инструмента на 4...8 %.

Идентификация свойств шлифовальных кругов. Общепринятая практика идентификации эксплуатационных характеристик абразивного инструмента предусматривает в обозначении шлифовального круга маркировку материала и размера абразивного зерна, твердости, номера структуры, связки и допустимой скорости обработки. Однако в ряде случаев провести их идентификацию для инструмента, изготовленного различными фирмами, бывает сложно или практически невозможно.

Указанные в маркировке абразивного инструмента характеристики, например, по материалу абразивного зерна, твердости и структуре основываются на собственных стандартах фирм-изготовителей и учитывают особенности принятых методик измерения твердости, размера пор и объема порового пространства и других, что зачастую не соответствует стандарту DIN 69100.

Чтобы идентифицировать абразивный инструмент различных фирм-изготовителей через единый комплексный показатель, была принята в качестве такой оценки его интегральная характеристика — плотность с размерностью г/см³.

Известно, что модуль упругости является характеристикой неразрушающего

контроля твердости абразивного инструмента, поэтому его величина должна коррелироваться с другими оценочными характеристиками твердости, например, по Маккензи или *Grado*.

Для кругов RW и Reik, представленных в табл. 8.1, установлена общая связь между модулем упругости E и твердостью по *Grado* (Gr) в виде линейной логарифмической модели:

$$\ln E = 5,184 - 0,421 \ln Gr, \quad (8.9)$$

которая графически показана на рис. 8.1.

Наличие тесной корреляции между этими величинами (коэффициент парной корреляции равен 0,815) подтверждает связь E -модуля с твердостью шлифовальных кругов, что дает возможность корректировать их значения с поправкой, например, на изменение структуры инструмента за счет упрочняющего центра.

По результатам статистической обработки экспериментальных данных можно сделать заключение о степени влияния компонентов шлифовального круга на его плотность: наибольшее влияние на плотность оказывает содержание в круге абразивного зерна (коэффициент парной корреляции $R = 0,804$), меньшее — размер абразивного зерна ($R = 0,756$) и твердость, т.е. содержание керамической связки ($R = -0,129$). Причем достаточно сильно проявляется взаимосвязанное влияние объемного содержания абразивных зерен и их размеров на плотность шлифовального круга (коэффициент парной корреляции равен 0,664).

Полученные данные позволили по измеренному значению плотности шлифовального круга γ и его твердости определить фактическое объемное содержание абразивных зерен, т.е. фактическую структуру инструмента для анализа его режущей способности при шлифовании и

* Методика статистической обработки и математического моделирования экспериментальных данных изложена в следующем разделе.

разработке рекомендаций по совершенствованию технологии его изготовления.

На рис. 8.2 представлена зависимость плотности исследованных шлифовальных кругов RW и Reik от их модуля упругости, линейная модель взаимосвязи которых имеет следующий вид ($R = 0,805$):

$$\ln \gamma = 0,183 \ln E - 0,011. \quad (8.10)$$

Таким образом, по экспериментально определенному значению плотности конкретного шлифовального круга можно оценить для него реальное значение номера структуры (пористости) в зависимости от его твердости или определить возможное сочетание номера структуры и твердости круга. Предложенная методика идентификации шлифовальных кругов была использована при анализе представленного различными фирмами инструмента для исследований по сухому шлифованию.

Разрывная прочность шлифовальных кругов. Важным и обязательным направлением создания шлифовальных кругов для сухой обработки явилось обеспечение их высокой разрывной скорости (прочности). Эти две характеристики взаимосвязаны между собой, но оценить скорость круга, при которой происходит его разрушение, значительно проще, чем оценить его разрывную прочность.

В работе [93] приведены различные экспериментальные и расчетные данные по разрывной скорости для кругов из электрокорунда нормальной структуры с различной зернистостью и твердостью. Их статистическое обобщение позволило сделать вывод, что разрывная и, соответственно, допустимая рабочая скорость шлифования линейно возрастают с уменьшением размера абразивных зерен и увеличением твердости инструмента, что является приоритетным направлением в создании высокоскоростных шлифовальных кругов.

Обеспечение высокой рабочей скорости для высокопористых шлифоваль-

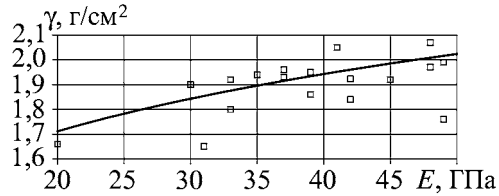


Рис. 8.2. Взаимосвязь плотности шлифовального круга с его модулем упругости

ных кругов с эксплуатационными свойствами в широком диапазоне (по зернистости, твердости и номеру структуры) остается достаточно сложной технической проблемой, тем более для крупногабаритного инструмента, применяемого в экспериментах по сухому шлифованию.

Шлифовальный круг представляет собой сложную многокомпонентную композитную систему, в которой неоднородные по форме и размерам абразивные зерна закреплены мостиками связки, размеры которых обусловлены случайным характером распределения абразива в объеме инструмента. При изготовлении высокопористых шлифовальных кругов вместе с естественными порами дополнительно образуются искусственные поры путем выгорания вводимых в абразивную массу порообразователей различных видов и размеров. Пористая структура может также создаваться за счет применения невыгорающих порообразователей.

Основным фактором, определяющим прочность шлифовального круга, является центробежная сила, пропорциональная квадрату скорости вращения инструмента. Под действием центробежной силы в объеме шлифовального круга формируется неоднородное напряженное состояние в соответствии с его неоднородным строением. На отдельных неоднородностях строения могут возникнуть флуктуации растягивающих напряжений, что может стать причиной разрушения инструмента.

По мнению авторов работы [29], структурная неоднородность строения шлифовального круга, а также характер и

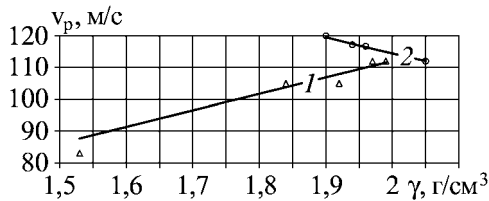


Рис. 8.3. Влияние плотности шлифовальных кругов RW зернистостью 100 (1) и кругов Reik из абразивной смеси различной зернистости (2) на их разрывную скорость

прочность адгезии абразивных зерен и связки оказывает значительное влияние на прочность шлифовального круга. При слабой адгезии зерна и связки основную нагрузку несет связка, и разрушающая трещина будет распространяться преимущественно по связке или по границе раздела со связкой в направлении от посадочного отверстия круга к его рабочей поверхности. В этом случае прочность шлифовального круга будет определяться прочностью связки и ее количеством.

В шлифовальном круге со значительной адгезией между его компонентами абразивной массы напряженное состояние и прочность инструмента зависят от прочности зерен: чем они прочнее, тем больше прочность инструмента. У такого типа абразивного инструмента достигается наибольшая разрывная прочность. Установлено также, что вероятность разрушения шлифовального круга возрастает с увеличением концентрации абразивных зерен в объеме инструмента (исследования проводились для номеров структур 3...12) и их размеров. С другой стороны, увеличение количества и размеров пор снижает прочность инструмента.

Плотность шлифовального круга как его обобщенная структурная характеристика, связанная с содержанием зерна и связки, таким образом, должна оказывать влияние на разрывную скорость (прочность) инструмента.

На примере анализа эксплуатационных свойств кругов Reik (см. табл. 8.1) экспериментально подтверждается, что

разрывная скорость v_p шлифовальных кругов тесно коррелирована с их плотностью γ . Статистической обработкой опытных данных по шлифовальным кругам Reik установлено, что модель связи между v_p и γ может быть аппроксимирована линейной или нелинейной моделью в виде логарифмического квадратичного полинома. При этом линейная модель оказалась нечувствительной к изменению зернистости шлифовальных кругов, имея при этом более низкий уровень адекватности в сравнении с нелинейной моделью (коэффициент множественной корреляции моделей, например, соответственно равен 0,503 и 0,954). В этой связи, учитывая лучшее соответствие нелинейной модели опытным данным по принятым критериям качества и экспериментальный характер зависимости $v_p(\gamma)$, можно прогнозировать (так как отсутствует прямое экспериментальное подтверждение) возможность повышения разрывной скорости шлифовальных кругов Reik до 110 м/с или на 11 % в случае, если его плотность будет равна 1,8 г/см³.

Использование в качестве абразивного материала однородных (50:50 %) смесей из двух зернистостей также позволяет повысить разрывную скорость шлифовальных кругов, при этом сохраняется тесная корреляция между v_p и плотностью инструмента (рис. 8.3). Для абразивной смеси состава 46/80 неоднородность в размерах зерен, составляющих абразивную смесь, больше, чем для смеси 46/60, поэтому прочность такого инструмента оказывается на 5 % меньше.

Для шлифовальных кругов RW из различных модификаций корунда зернистостью 100, различной твердости на одинаковой керамической связке (рис. 8.3, табл. 8.2) также наблюдается линейная связь между разрывной скоростью и плотностью. С увеличением плотности шлифовального круга в диапазоне от 1,53 до 1,99 г/см³ сохраняется тенденция пропорционального увеличения разрывной скорости инструмента за счет повышения

8.2. Математические модели связи разрывной скорости шлифовальных кругов с их характеристиками

Произ- води- тель	Диапазон изменения характеристик кругов			Вид модели	Коэффициент парной корреляции				Оценка адекватности		
	зерни- стость	плот- ность γ , г/см ³	твердость по <i>Grado</i>		γ	A	Gr	КМК	ОД	F-отн.	
Reik	36; 46	1,66... 1,95	43,7... 83,5	$\ln v_p = 3,903 + 1,402 \ln \gamma - 0,630 \ln A + 1,057 \ln \gamma \ln A$	0,343	-0,083	—	0,503	0,838	1,352	
Reik	36; 46	1,66... 1,95	43,7... 83,5	$\ln v_p = 29,188 \ln \gamma - 0,113 \ln A - 24,761 \ln^2 \gamma - 4,022$	0,343	-0,083	—	0,954	0,178	6,819	
Reik	Смесь 46/60; 46/80	1,94... 2,05	40,2... 53,5	$\ln v_p = 5,330 - 0,851 \ln \gamma$	0,996	—	—	0,996	0,008	243,8	
RW	100	1,53... 1,99	19...32	$\ln v_p = 4,084 + 0,916 \ln \gamma$	0,860	—	—	0,860	0,026	8,492	
RW-St	90	1,65... 1,92	37...57	$\ln v_p = 6,436 - 2,076 \ln \gamma - 0,410 \ln Gr + 0,549 \ln \gamma \ln Gr$	0,361	—	-0,455	0,571	0,751	2,176	
RW-St	90	1,65... 1,92	37...57	$\ln v_p = 4,863 + 6,058 \ln \gamma - 0,521 \ln Gr - 7,191 \ln^2 \gamma + 0,424 \ln \gamma \ln Gr$	0,361	—	-0,455	0,991	0,026	84,101	

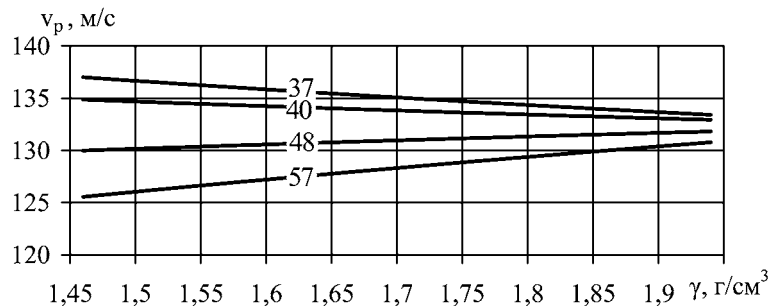


Рис. 8.4. Влияние плотности кругов RW-St с различной твердостью по *Grado* на их разрывную скорость (линейная модель)

его твердости от 85 до 112 м/с, или на 32 %.

Более сложный и интересный характер связи разрывной скорости шлифовального круга с его плотностью имеет место у кругов RW-St.

По четырем шлифовальным кругам RW-St по аналогии с кругами Reik аппроксимированы две модели: линейная с низким уровнем соответствия (КМК = 0,571) и нелинейная квадратичная модель, которая обеспечила более высокий уровень достоверности (КМК = 0,991) опытными данным (табл. 8.2, рис. 8.4, 8.5). Наблюдается экстремальный характер зависимости v_p от плотности γ , причем экстремум функции $v_p(\gamma)$ зависит от твердости шлифовального круга. Если для твердости по *Grado*, равной 57 ед., максимальное значение разрывной скорости составляет 128,9 м/с при плотности $\gamma = 1,74$ г/см³, то с увеличением твердости до *Grado* = 37, разрывная скорость шлифовального круга по расчетной модели должна составить 149,9 м/с при его плотности $\gamma = 1,70$ г/см³. Значения плотности γ даны с учетом упрочнения отверстия шлифовальных кругов с применением более плотной абразивной массы, за счет чего общая плотность инструмента возрастает на 3...6 %, а его разрывная скорость – до 8...9 %.

На Carborundum Electrite автором были проведены специальные исследова-

ния по оценке новой технологии изготовления высокопористых кругов и ее влияния на разрывную скорость инструмента в зависимости от их плотности. Было изготовлено и испытано 19 шлифовальных кругов диаметром 500 мм с посадочным отверстием $\varnothing 203$ мм из электрокорунда марки 99BA зернистостью 100, 90 и 60 на керамической связке 03. Отверстие шлифовального круга специально не упрочнялось. Плотность инструмента в зависимости от его состава и твердости изменялась от 1,66 до 1,97 г/см³, твердость у кругов составила G (BM2)...N (C2), структура – 10...19, разрывная скорость – 87...138,7 м/с.

Проведенные исследования экспериментально подтверждают возможность изготовления высокопористых кругов по новой технологии с разрывной скоростью до 138,7 м/с (по расчетному прогнозу возможно до 146 м/с), что гарантирует рабочую скорость шлифования до 105 м/с. Также экспериментально подтверждается экстремальный характер зависимости разрывной скорости высокопористых шлифовальных кругов от их плотности, который сохраняется при изменении размеров абразивных зерен и твердости инструмента. С уменьшением размера абразива разрывная скорость круга возрастает, а при увеличении его твердости максимальное значение v_p смещается в сторону более высокой плотности.

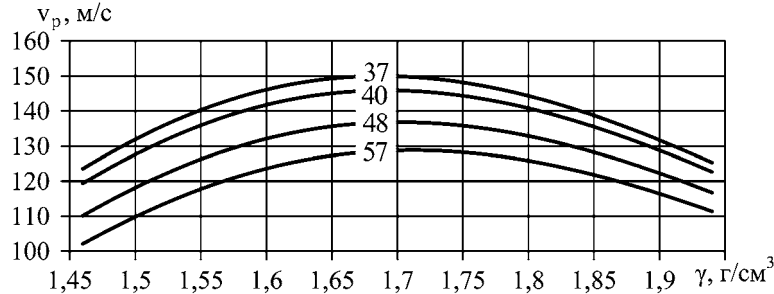


Рис. 8.5. Влияние плотности кругов RW-St с различной твердостью по *Grado* на их разрывную скорость (нелинейная модель)

Чтобы получить обобщающую модель связи разрывной скорости круга с его плотностью, были объединены экспериментальные данные по кругам RW-St и CE-St, представленным в табл. 8.1. Указанные круги были одного размера $500 \times 80 \times 203$, изготовлены из электрокорунда с одинаковым размером абразивного зерна на керамической связке и по одной технологии с применением невыгорающих корундовых микросфер. Для статистической обработки данных по этим кругам необходимо было дополнительно пронормировать их твердость к одному оценочному показателю – твердости по глубине лунки h_n , полученной методом Маккензи.

После нормирования экспериментальных данных по кругам RW-St и CE-St применительно к твердости по ГОСТ 18118–79 (в ред. 1981 г.) статистическая нелинейная модель зависимости разрывной скорости шлифовального круга от его плотности получена в виде:

$$\ln v_p = 3,652 + 0,104 \ln h_n + 5,039 \ln \gamma - 0,565 \ln h_n \ln \gamma - 4,063 \ln^2 \gamma. \quad (8.11)$$

Модель разработана и может быть применена для высокопористых кругов из электрокорунда зернистостью 16 (90) без упрочнения посадочного отверстия, изготовленных на основе невыгорающих корундовых микросфер. Наибольшее статисти-

ческое влияние на разрывную скорость инструмента оказывает его твердость по глубине лунки ($R = -0,890$), меньшее влияние – плотность круга ($R = 0,255$).

На рис. 8.6 представлена графическая интерпретация модели (8.11) для высокопористых кругов зернистостью 16 и твердостью BM2, M2 и CM2. Расчетная модель с высокой степенью адекватности ($KMK = 0,997$, ошибка сглаживания составила менее 1 %) отображает экспериментальные данные и позволяет прогнозировать требования к шлифовальному кругу в зависимости от его максимальной разрывной прочности. Например, v_p возрастает с повышением твердости круга и соответствующим увеличением номера структуры. Для исходных данных, представленных на рис. 8.6, максимум разрывной скорости круга достигается при структурах 15, 16 и 17 соответственно для твердости BM2, M2 и CM2.

Объяснить необычный характер изменения разрывной скорости высокопористых кругов от их плотности можно следующим образом. В главе 1 приведена расчетная формула (1.3) критической разрывной скорости кругов на керамической связке.

Для принятых в данном исследовании размеров шлифовального круга формула (1.3) может быть преобразована к виду

$$v_p = 3,41 \sqrt{\frac{\sigma_p}{\gamma}}. \quad (8.12)$$

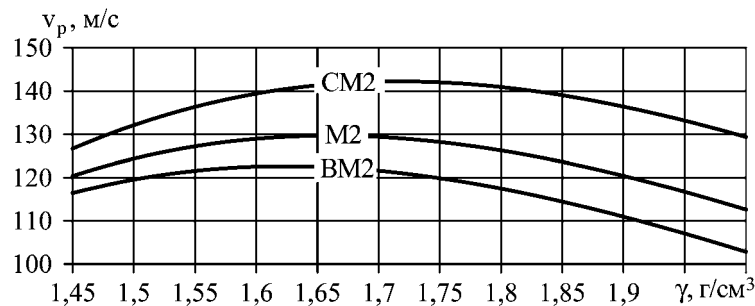


Рис. 8.6. Зависимость разрывной скорости шлифовального круга от его плотности и твердости, зернистость 16

Следовательно, наблюдаемый в исследованиях экстремальный характер изменения разрывной скорости v_p высокопористых кругов в зависимости от их плотности γ должен быть связан с соответствующим экстремальным характером изменения функции $\sigma_p(\gamma)$. Именно разрывная прочность шлифовального круга как свойство композитной системы тесно связана с его структурно-объемным строением и физико-химическим механизмом связи и взаимодействия его составляющих компонентов: зерна, связки, искусственных порообразователей и естественных пор. Сложный характер такой взаимосвязи применительно к высокопористому абразивному инструменту с невыгорающим порообразователем, анализ которого приведен выше, предопределяет и сложный характер зависимости его разрывной прочности от плотности.

Наблюдаемый экстремальный характер прочности высокопористых шлифовальных кругов от их плотности, по видимому, объясняется существованием оптимального соотношения между объемной концентрацией абразивных зерен, с одной стороны, и формой, размерами и количеством пор, которые формируются при введении невыгорающих полых сферических частиц геометрически правильной формы, с другой стороны.

Как уже отмечалось, уменьшение объемного содержания зерен в круге спо-

собствует увеличению его разрывной прочности, но связанное с этим повышение пористости, напротив, снижает ее. Положительный эффект от введения микросфер заключается в стабилизации напряженного состояния в объеме шлифовального круга путем создания объемного каркаса из равномерно распределенных абразивных зерен и невыгорающего порообразователя, соединенных между собой мостиками керамической связки. Такая конструкция устойчива к деформации в процессе высокотемпературного обжига и, следовательно, не создает дополнительных остаточных напряжений. Микросферы, кроме того, являются эффективными препятствиями для распространения трещины разрушения.

Указанный механизм соответствует представлениям механики прочности многокомпонентных полиморфных систем, а применительно к абразивному инструменту подтверждается результатами исследования влияния формы зерна на прочность шлифовального круга [32]. Показано, что напряжения во вращающемся круге меньше в том случае, когда он изготовлен из абразивных зерен изометрической формы. При спекании в процессе изготовления такого круга уровень остаточных теплонпряжений в объеме инструмента также меньше, чем для абразивного инструмента с зернами неправильной формы. В совокупности это создает

благоприятные условия для повышения разрывной прочности шлифовального круга.

На основании анализа экспериментально полученных результатов можно сделать заключение, что для высокопористых кругов с плотностью 1,6...1,95 г/см³ (структура 12...20) с использованием невыгорающих порообразователей имеет место экстремальный характер зависимости разрывной скорости (и соответственно рабочей скорости) инструмента от его плотности.

Обобщая полученные в данной работе результаты, можно прогнозировать повышение рабочих скоростей шлифования при уменьшении зернистости и увеличении твердости таких высокопористых кругов, но при этом максимум v_p может быть достигнут при оптимальном значении плотности γ инструмента. Оптимальное значение γ тем меньше, чем меньше размер абразивных зерен и больше твердость круга. Большое значение имеет также состав, размеры и содержание микросфер как порообразователя.

Анализ характеристик шлифовальных кругов, представленных в табл. 8.1, дает возможность определить принципы, на основе которых изготовлялся инструмент для экспериментальных исследований по сухому шлифованию.

Шлифовальные круги Reik были изготовлены из крупного абразивного зерна зернистостью 36 и 46 с одной твердостью К (однако значение твердости по *Grado* изменялось в диапазоне 40,2...83,5), с номерами структур 9...16 на различных керамических связках. Использование абразивной смеси из зерен различной зернистости позволило повысить разрывную скорость шлифовальных кругов со структурой 9...10 до 27 %, но для шлифовальных кругов структур 13...16 возможная рабочая скорость обработки не превысила 60 м/с.

В шлифовальных кругах RW использованы различные модификации корунда как абразивного материала, две зернисто-

сти абразива 46 и 100, смесь из абразива зернистостью 46, 80, 100 и две керамические связки. На одной из связок шлифовальные круги имели высокую разрывную скорость до 137 м/с, но по значению их плотности γ эти круги не относятся к инструменту с высоким номером структуры.

Оригинальная технология изготовления высокопористых шлифовальных кругов RW-St и CE-St с использованием выгорающих и невыгорающих порообразователей позволила создать шлифовальные круги, у которых высокая структура 12...20 и твердость от F до N сочетаются с высокой рабочей скоростью обработки – до 105 м/с. Высокая скорость шлифования при этом может быть гарантирована как мягкими (твердость F) кругами со структурой 20, так и более твердыми кругами (твердость N) со структурой 12...19.

Результаты статистического моделирования полученных данных по разрывной скорости шлифовальных кругов и ее зависимости от плотности инструмента дают основание прогнозировать возможность создания высокопористых шлифовальных кругов стандартной конструкции с рабочей скоростью шлифования до 120 м/с.

8.4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Схема установки и особенности измерений. Для проведения исследований по сухому шлифованию в Fraunhofer – IWU (г. Хемнитц, Германия) была создана специальная экспериментальная установка, на которой обработка осуществлялась методом круглого наружного шлифования на врезание с поперечной подачей круга на заготовку.

Реализация процесса шлифования без применения смазочно-охлаждающих сред само по себе представляет достаточно сложную научно-техническую проблему, для решения которой необходимо создавать специальный абразивный инстру-

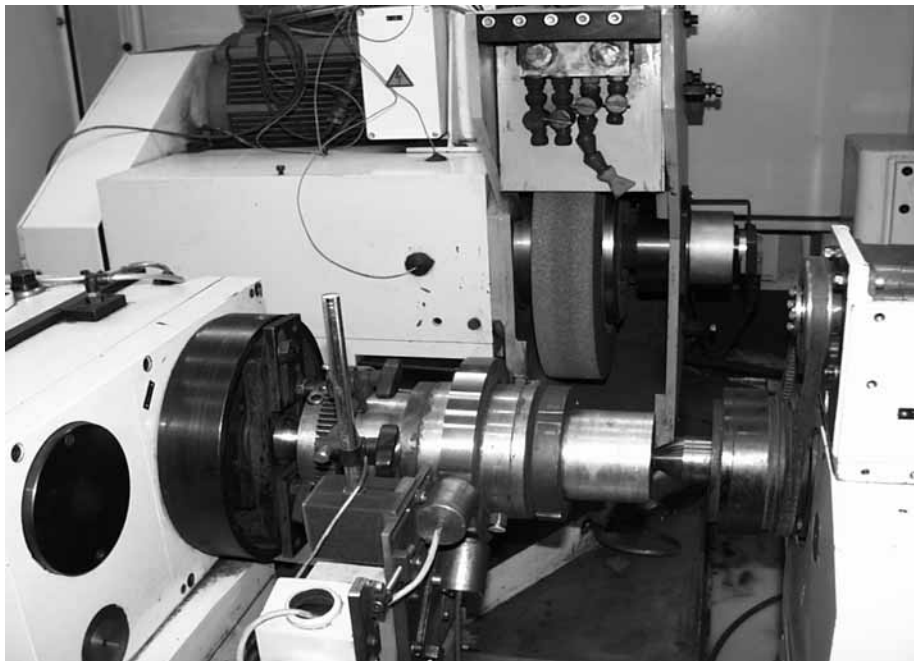


Рис. 8.7. Зона обработки экспериментальной установки для сухого шлифования

мент для работы в экстремальных условиях без охлаждения и оптимизировать условия его сухой правки. Самостоятельной сложной проблемой является и создание оборудования для сухого шлифования, в котором без применения обильного полива должна удаляться стружка, продукты износа инструмента и др. В этой связи использование в экспериментальных исследованиях схемы обработки на врезание является дополнительным фактором, усложняющим решение проблемы сухого шлифования. В отличие, например, от схемы маятникового шлифования, при обработке на врезание имеется еще меньше возможностей для охлаждения зоны резания воздушными потоками от вращения шлифовального круга и обрабатываемой детали, а обрабатываемые участки чаще вступают в контакт с рабочей поверхностью инструмента и идет более интенсивное накопление теплоты деталью.

Для получения достаточно полной картины о результатах сухого шлифования в экспериментах оценивались следующие характеристики:

- мощность шлифования;
- сила резания (нормальная и тангенциальная составляющие);
- износ шлифовального круга;
- температура обрабатываемой поверхности детали;
- температура и скорость нагрева правочных карандашей;
- шероховатость обработанной поверхности детали.

Экспериментальная установка представляет собой круглошлифовальный станок с ЧПУ мод. SA 6/2-CNC 1000 SMW, изготовленный фирмой Schaudt, в который вмонтирован комплект датчиков для параллельного измерения параметров процесса шлифования во время обработки (рис. 8.7, 8.8). Станок SA 6/2-CNC 1000 SMW был модернизирован при изготовле-

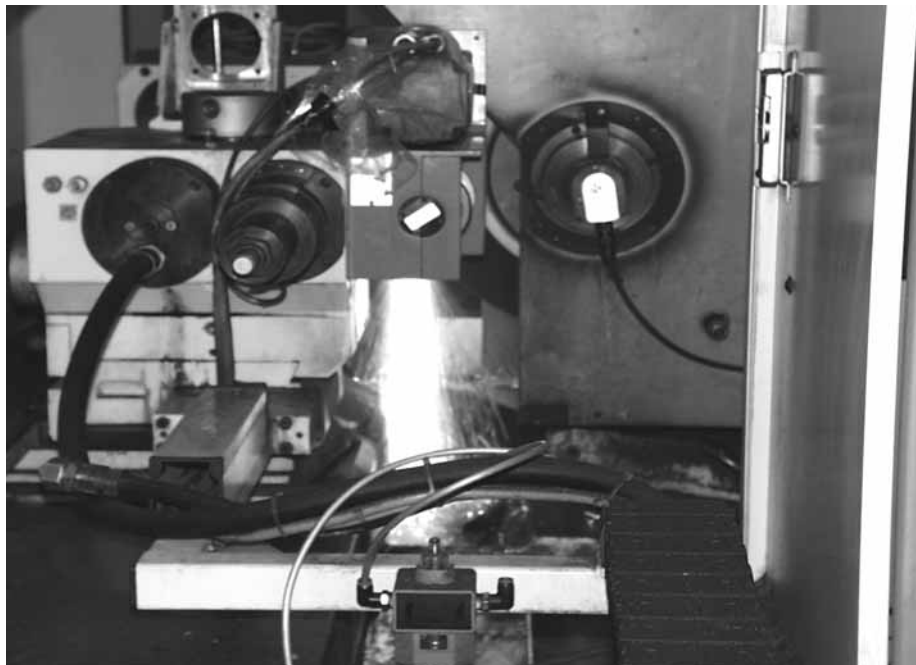


Рис. 8.8. Процесс шлифования без охлаждения на экспериментальной установке

нии, чтобы обеспечить повышенные частоты вращения главного шпинделя и привода детали таким образом, чтобы при скорости вращения круга 100 м/с можно было обеспечить отношение скоростей круга и детали, равным 10 при среднем диаметре детали 200 мм. С помощью встроенных датчиков в процессе обработки измеряются: мощность шлифования, нормальная и тангенциальная составляющие силы резания, фактические частоты вращения главного шпинделя и привода детали, температура обрабатываемой поверхности и правочных алмазных карандашей и др. Указанные характеристики фиксируются с учетом их изменения за время опыта.

Мощность шлифования регистрируется с помощью специального трехфазного подключенного ваттметра как электрическая мощность, потребляемая шпинделем станка во время обработки за вычетом мощности холостого хода до врезания.

Электрическая мощность измерялась с помощью специального ваттметра "Messgeraet WT 130" фирмы Yokogawa, имеющего диапазон от 0 до 50 кВт. Ошибка измерения составляет $\pm 0,5$ % измеряемой величины.

Для измерения составляющих силы резания использовались пьезоэлектрические сенсоры "Quartz Longitudinal Measuring Pin" фирмы Kistler.

Износ шлифовального круга определялся методом врезного профилирования металлической пластины толщиной 1 мм с последующим измерением линейного износа на микроскопе "Hommel Profilmessplatz T 4000".

Шероховатость обработанной поверхности заготовки измерялась непосредственно на станке с помощью портативного профилометра типа "Stylus" фирмы Mitutoyo и качество ее оценивалось по стандартным параметрам Ra , Ry , Rt и Rz . Измерения проводились после шлифова-

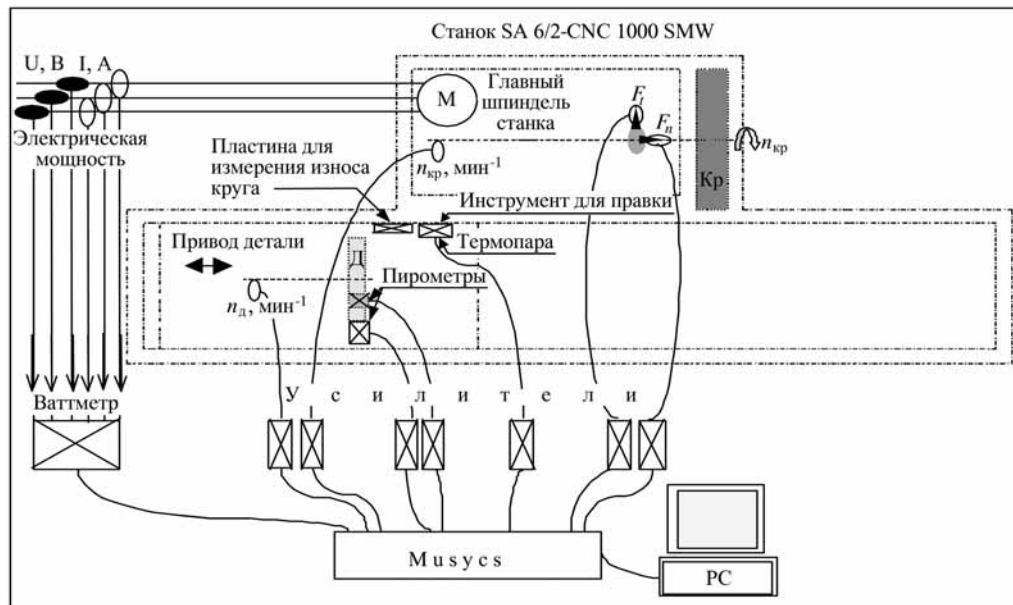


Рис. 8.9. Схема экспериментальной установки для исследования процесса сухого шлифования

ния в трех равноудаленных точках на поверхности заготовки для конкретных условий опыта.

В качестве датчиков для измерения температуры детали были использованы пирометры. Принцип их работы – это преобразование интенсивности инфракрасного излучения от нагрева обрабатываемой поверхности в электрическое напряжение. В установке используются три пирометра типа "Thermalert MI 40" фирмы Raytek. Диапазон измерения температуры составляет от 0 до 500 °С, чувствительность $\pm 2\%$, время реагирования (запаздывания) 120 мкс. Первый из трех пирометров установлен на угловом расстоянии 90° от места контакта круга с деталью, остальные – равномерно распределены по окружности обрабатываемой детали.

Принятая схема измерения обеспечивала определение усредненной температуры детали непосредственно в процессе шлифования с учетом динамики ее возрастания по времени. Так как время

проведения эксперимента было существенно больше, чем время запаздывания измерительного импульса, то можно полагать, что фиксируемая температура достаточно достоверно отражает реальные условия нагрева детали при обработке.

Одновременное применение трех пирометров, как показали исследования, вносит существенное искажение в количественную оценку температурного режима нагрев–охлаждение обрабатываемой детали, и в дальнейшем учитывались только показания пирометра, ближайшего к месту контакта шлифовального круга с деталью.

Температуру правочных карандашей измеряли с помощью термопары, концы которой приваривали в непосредственной близости от режущей кромки карандаша. Датчики и термопару соединяли через усилители, а ваттметр напрямую был связан с центральным электроизмерительным устройством "Musyos", который служил для окончательного усиления и преобра-

зования приходящих сигналов и подачи информации о них в персональный компьютер.

Таким образом схема измерительной установки представляет собой четырехзвенную иерархию: датчики–усилители – "Musyucs"–ПК (рис. 8.9). Устройство "Musyucs" работает под управлением специального программного обеспечения, активного в этот момент, и обладает широкими возможностями для непрерывного приема, переработки и хранения сигналов, поступающих одновременно от большого количества разнообразных датчиков.

Разные по характеру и уровню сигналы могут быть преобразованы единообразным образом и переданы в компьютер в едином формате. "Musyucs" обладает большой гибкостью, поскольку оборудовано множеством каналов для приема сигналов, и у пользователя имеется возможность легко коммутировать нужные датчики, конфигурировать каналы в интегрированные модули данных в соответствии с экспериментами, сохранять данные конфигурации в программе и активировать их по желанию. Устройство "Musyucs" передает данные об измерениях в программу, в которой хранятся данные о калибрации всех сигналов для их графического представления либо в текущем численном виде.

Данные из программы "Musyucs" по мощности, составляющим силы резания и времени обработки, температурам детали и правочных инструментов, а также данные непосредственных измерений износа шлифовального круга и шероховатости обработанной поверхности детали переносятся в таблицы Excel, соответствующие отдельным инструментам.

"Musyucs" является оригинальным и центральным звеном в лабораторной шлифовальной установке в Fraunhofer – IWU. Датчики являются типовыми, их выбор определяется соответствием служебного назначения поставленной задаче измерения. Устройство "Musyucs" в комплекте с

одноименным программным обеспечением является рыночным изделием, выпускаемым фирмой IMB GmbH.

Устройство "Musyucs" во включенном состоянии находится в состоянии постоянного приема информации от датчиков, поэтому для сигнализации передачи в компьютер только значимых данных была реализована схема так называемого "триггера" (спуска), которая основана на датчике акустической эмиссии. Датчик акустической эмиссии регистрирует возникающий интенсивный ультразвуковой сигнал в момент врезания шлифовального круга в заготовку либо начала правки шлифовального круга, приводя к срабатыванию "триггера" и началу передачи данных в компьютер. В этот момент из "Musyucs" в компьютер переписываются все данные, которые поступили и хранились в памяти на настоящий момент за определенный интервал времени в прошлом, например 1 с.

Общий вид экспериментальной установки для сухого шлифования показан на рис. 8.10.

Методика проведения исследований. Разработанная экспериментальная установка дает возможность сравнительной оценки различных характеристик процесса применительно к схеме попутного круглого наружного шлифования на врезание.

В качестве обрабатываемой детали использовалась заготовка с начальным диаметром 200 мм из закаленной стали 45 с твердостью 60 HRC. Заготовка имела внутренние полости для циркуляции охлаждающей жидкости, что позволяло после каждого эксперимента быстро охлаждать ее до комнатной температуры.

Обработка производилась при постоянной ширине рабочей части круга, равной 20 или 24 мм, результаты измерений при необходимости приводились к 1 мм ширины обработки. В каждом эксперименте с обрабатываемой заготовки удалялся постоянный объем материала, равный 100 мм³ на 1 мм ширины обработки.



Рис. 8.10. Экспериментальная установка для сухого шлифования

Это важный методологический аспект настоящего исследования, который соответствует реальным условиям шлифования в производственных условиях: необходимо удалить заданный объем материала (припуск на шлифование) за минимальное время с выполнением необходимых требований по точности и качеству обработанной поверхности детали.

Эксперимент для получения статистически достоверного результата повторялся от 3 до 6 раз.

Правку шлифовальных кругов выполняли алмазным карандашом всухую с глубиной правки 20 мкм и коэффициентом перекрытия 4. По сухой правке различными правочными инструментами было выполнено специальное исследование.

Основными управляемыми параметрами процесса сухого шлифования были выбраны следующие:

- $v_{кр}$ – скорость шлифовального круга, м/с;

- v_d – скорость вращения детали, м/мин;

- q – отношение скорости шлифовального круга к скорости вращения обрабатываемой детали;

- t – глубина шлифования или подача на 1 оборот детали, мкм/об.дет.

В качестве основных выходных характеристик сухого шлифования для сравнения различных шлифовальных кругов и режимов обработки были использованы следующие:

- Q_w – скорость съема металла или производительность обработки, мм³/(мм·с):

$$Q_w = \frac{v_{кр} t}{q}; \quad (8.13)$$

- P_w – мощность шлифования, приведенная к 1 мм ширины шлифовального круга, кВт/мм;

- $\Delta\Theta$ – приращение температуры обрабатываемой детали за время эксперимента, °С;

8.3. Исследованные параметры режимов сухого шлифования

Скорость круга $v_{кр}$ м/с	Отношение $q = v_{кр}/v_d$	Скорость детали v_d , м/мин	Глубина обработки t , мкм/об.дет	Минутный съем материала $Q_{ш}$, мм ³ /(мм·с)	Время обработки τ , с
35	100	21	1	0,35	285,7
35	100	21	5	1,75	57,1
35	60	35	1	0,58	172,4
35	60	35	2	1,17	85,5
35	60	35	3	1,75	57,1
35	60	35	5	2,92	34,3
35	40	52,5	3	2,63	38,0
35	20	105	1	1,75	57,1
35	20	105	3	5,25	19,0
35	20	105	5	8,75	11,4
50	100	30	1	0,50	200,0
50	100	30	5	2,70	37,0
50	60	50	1	0,83	120,5
50	60	50	5	4,17	24,0
50	40	75	3	3,75	26,7
50	20	150	1	2,50	40,0
50	20	150	5	12,50	8,0

Продолжение табл. 8.3

Скорость круга $V_{\text{сп}}$, м/с	Отношение $q = V_{\text{сп}}/V_d$	Скорость детали V_d , м/мин	Глубина обработки t , мкм/об.дет	Минутный съем материала $Q_{\text{мр}}$, мм ³ /(мм·с)	Время обработки τ , с
60	100	36	1	0,60	166,7
60	100	36	5	3,00	33,3
60	60	60	1	1,00	100,0
60	60	60	5	5,00	20,0
60	20	180	1	3,00	33,3
60	20	180	5	15,00	6,7
80	100	48	1	0,80	125,0
80	100	48	5	4,00	25,0
80	60	80	1	1,33	75,2
80	60	80	5	6,67	15,0
80	20	240	1	4,00	25,0
80	20	240	5	20,00	5,0
90	60	90	1	1,50	66,7
90	60	90	5	7,50	13,3
90	20	270	1	4,50	22,2
90	20	270	5	22,50	4,4
96	60	96	1	1,60	62,5
96	60	96	5	8,00	12,5
96	20	288	1	4,80	20,8
96	20	288	5	24,00	4,2

- U – удельная мощность (энергоемкость) шлифования, кДж/мм³:

$$U = \frac{P_w}{Q_w}; \quad (8.14)$$

- G – удельная производительность или коэффициент шлифования:

$$G = \frac{Q_w}{Q_k}; \quad (8.15)$$

где Q_k – расчетная интенсивность изнашивания шлифовального круга, мм³/(мм·с).

Через мощность P_w и скорость круга $v_{кр}$ можно определить силу резания (точнее – ее тангенциальную составляющую):

$$P_z = \frac{P_w}{v_{кр}}; \quad (8.16)$$

тогда раскрывается связь между силой резания и удельной мощностью шлифования:

$$U = P_z \frac{q}{t}. \quad (8.17)$$

Кроме того, в экспериментальных исследованиях оценивалось время шлифования τ , с:

$$\tau = \frac{100}{Q_w} = \frac{100q}{v_{кр} t} = \frac{100}{v_d t}. \quad (8.18)$$

Качество процесса шлифования и шлифовального круга сравнивались также по стандартным характеристикам шероховатости обработанной поверхности детали – различным оценкам высоты микронеровностей: Ra (среднеарифметическому отклонению профиля, мкм), Rt и Ry (максимальной высоте неровностей профиля и высоте максимального пика относительно самой глубокой впадины профиля, мкм), Rz (высоте неровностей профиля по 10 точкам, мкм).

Различные шлифовальные круги исследовались при скорости, которая изменялась в диапазоне 35...96 м/с. При этом

значение q составляло 100, 60, 40 и 20, а глубина шлифования $t = 1$ и 5 мкм/об. дет. Принятое соотношение параметров режимов шлифования обеспечило минутный съем металла в диапазоне от 0,35 до 24 мм³/(мм·с), а время обработки в одном эксперименте изменялось от 285,7 до 4,2 с. Исследованные параметры режимов сухого шлифования приведены в табл. 8.3.

Графическое оформление результатов экспериментов производилось их сглаживанием методом наименьших квадратов. Статистическая обработка экспериментальных данных включала расчеты их средних величин, среднеквадратичных отклонений и коэффициентов вариации. По значению среднеквадратичного отклонения исследуемой величины давалась оценка ее стабильности в зависимости от условий шлифования.

Статистическое обобщение в виде математических моделей связи исследуемой характеристики процесса с условиями обработки выполнялось с помощью специальных компьютерных программ многофакторного корреляционного и регрессионного анализов. Выбор вида математической модели и оценка ее адекватности экспериментальным данным осуществлялись дисперсионным анализом по критерию Фишера (F-отн.), коэффициенту множественной корреляции (КМК) и остаточной дисперсии (ОД).

8.5. ВЛИЯНИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ШЛИФОВАЛЬНОГО КРУГА И РЕЖИМА ОБРАБОТКИ НА ПРОЦЕСС СУХОГО ШЛИФОВАНИЯ

Эксплуатационные свойства шлифовального круга, обусловленные его характеристикой – материалом абразивного зерна, его размером, твердостью и структурой (пористостью) инструмента, видом связки и др., принято оценивать через его режущую способность в процессе шлифования. Режущая способность абразивного инструмента – это комплексная или интегральная оценка способности шлифоваль-

ного круга обеспечить заданную производительность шлифования при максимальной его износостойкости, минимальных энергетических затратах на процесс съема материала при выполнении необходимых требований к качеству поверхностного слоя обработанной детали.

Свойства шлифовального круга различным образом влияют на процесс шлифования в целом и его выходные параметры в частности. Поэтому чрезвычайно сложно представить режущую способность круга через какую-либо одну характеристику, которая бы объективно отражала его влияние на все основные выходные параметры процесса шлифования: термодинамическую напряженность, износостойкость, качество обработки и т.д. Это относится и к процессу шлифования без применения смазочно-охлаждающих средств.

Сложность оценки режущей способности абразивного инструмента усугубляется и тем обстоятельством, что эта оценка зависит от условий шлифования: один и тот же круг по-разному ведет себя при мягких или форсированных режимах обработки, а тем более в экстремальных условиях без охлаждения.

В первом приближении режущую способность различных шлифовальных кругов можно охарактеризовать через удельную энергоемкость съема материала U при одинаковых условиях обработки. По этому критерию исследованные в проекте шлифовальные круги (см. табл. 8.1) значительно различаются между собой: на самом мягком режиме сухого шлифования с $v_{кр} = 35$ м/с, $q = 60$ и $t = 1$ мкм/об.дет мощность обработки, приведенная к 1 мм ширины круга, составила от 0,018 до 0,140 кВт/мм, а удельная энергоемкость U от 31 до 241,4 Дж/мм³, т.е. разница в режущей способности шлифовальных кругов составляет 7,8 раз. При увеличении нагрузки при этой же скорости обработки ($v_{кр} = 35$ м/с, $q = 20$, $t = 5$ мкм/об.дет) происходит пропорциональное возрастание мощности шлифования исследованными кругами до 0,075...0,348 кВт/мм и удель-

ной энергоемкости до 8,57...39,8 Дж/мм³, но с уменьшением разницы между этими значениями до 4,6 раз.

Указанное различие в режущей способности исследованных шлифовальных кругов свидетельствует о существенном различии в стартовых условиях работы инструмента, которые в дальнейшем усугубляются при форсировании режима сухого шлифования с увеличением скорости и глубины обработки. Очевидно, что чем больше мощность и удельная энергоемкость шлифования, тем соответственно больше нагрузка на шлифовальный круг и режущие абразивные зерна, а также больше термодинамическое воздействие на обрабатываемую деталь. Поэтому стартовые условия шлифования с минимальными значениями мощности и удельной энергоемкости можно рассматривать как предпочтительные для экстремальных условий сухого шлифования.

Исследования режущей способности шлифовальных кругов, представленных в табл. 8.1, проводили в широком диапазоне изменения скорости и глубины шлифования и отношения q (см. табл. 8.3). Основными ограничениями при испытаниях были: допустимая скорость шлифования, интенсивный (катастрофический) износ круга и отсутствие прижогов на обработанной поверхности детали. Условия сухого шлифования, при которых наблюдались прижоги обработанной поверхности, при статистической обработке данных не анализировались и в дальнейшем не обсуждались.

Каждый круг тестировался на 4 режимах шлифования: $q = 60$, $t = 1$ мкм/об.дет; $q = 20$, $t = 1$ мкм/об.дет; $q = 60$, $t = 5$ мкм/об.дет; $q = 20$, $t = 5$ мкм/об.дет, соответственно при скорости круга 35, 50, 60, 70, 80 и 90 м/с. Предельная скорость шлифования ограничивалась возможностями инструмента. Два круга CE-St и один круг RW-St были испытаны на скорости 96 м/с – предельной скорости, допускаемой станком мод. SA 6/2 CNC 1000 SMW.

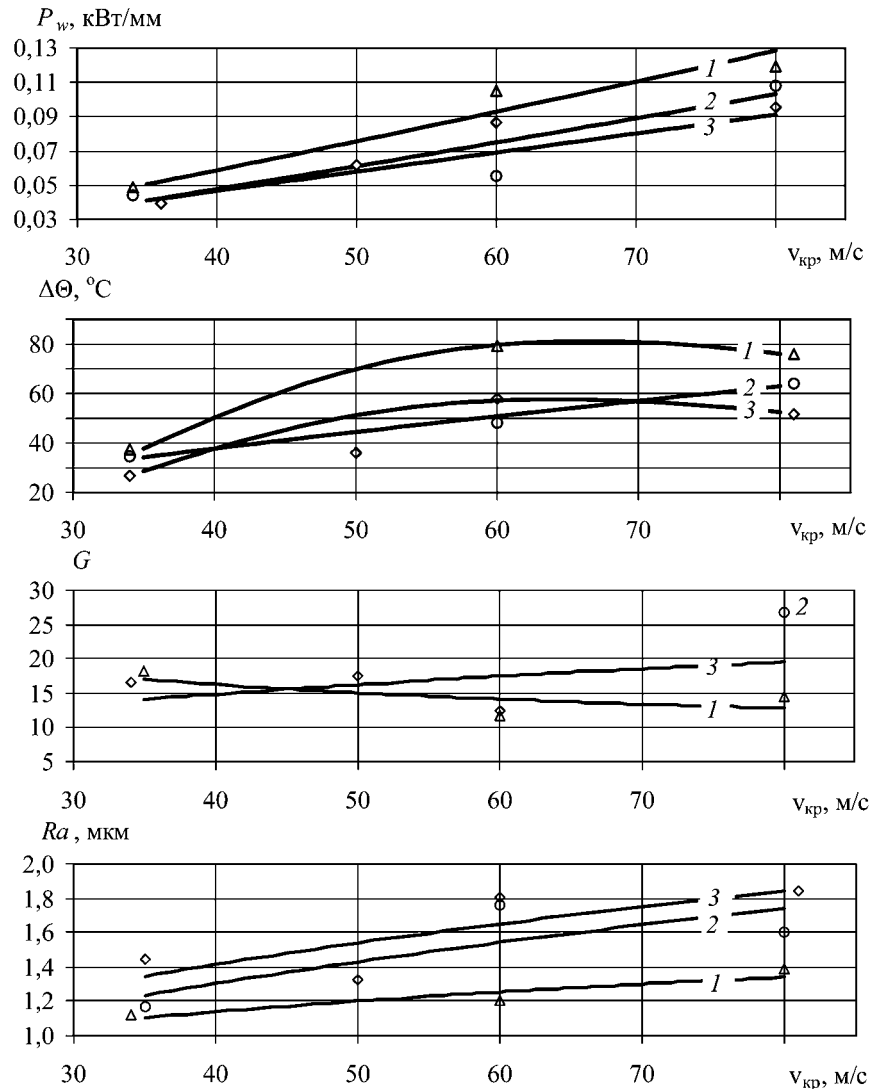


Рис. 8.11. Влияние скорости круга из электрокорунда белого различных модификаций на характеристики процесса сухого шлифования при $q = 60$, $t = 1$ мкм/об.дет:
 1 – 49A 46-0 L 15 V; 2 – 85A 46 L 15 V (Cubitron); 3 – 85A 46 L 15 V (SG)

Режущая способность шлифовальных кругов и, в целом, характер протекания процесса сухого шлифования оценивались и анализировались по изменениям основных выходных параметров: мощности шлифования P_w , температуры детали $\Delta\Theta$, удельной производительности G и шероховатости обработанной поверхности

детали Ra в зависимости от скорости шлифования $v_{кр}$ при различных соотношениях значений q и t (см. табл. 8.3). Для конкретных условий обработки при выбранной характеристике инструмента и заданного соотношения значений q и t экспериментальные данные статистически обрабатывались в виде линейных или не-

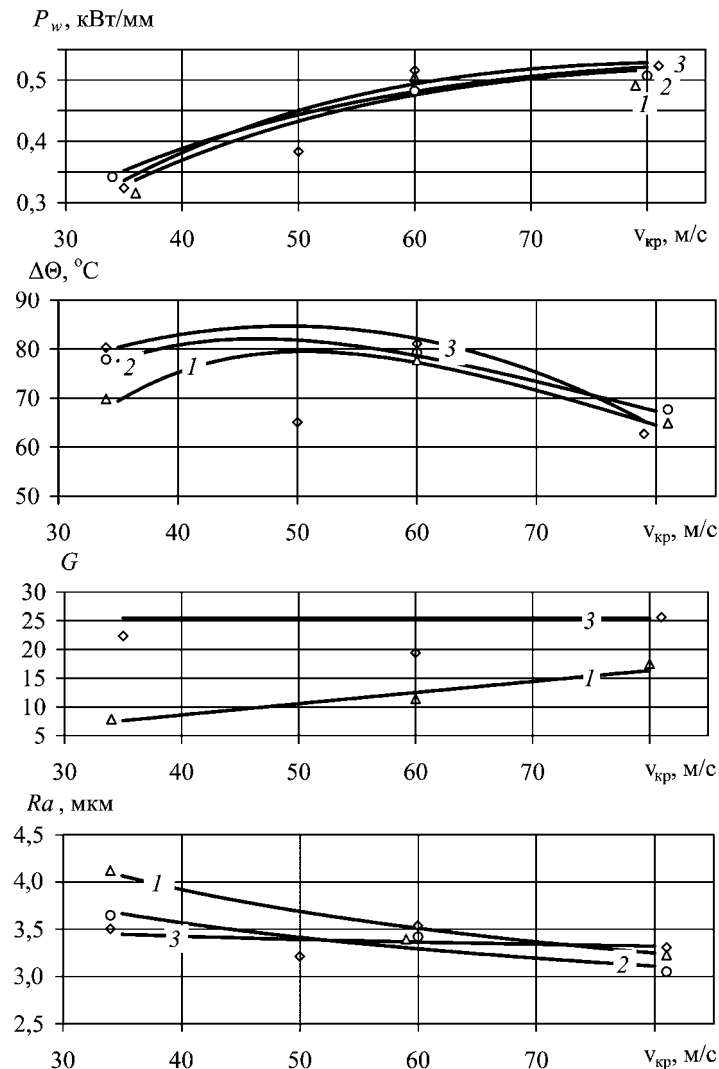


Рис. 8.12. Влияние скорости круга из электрокорунда различных модификаций на характеристики процесса сухого шлифования при $q = 20$, $t = 5$ мкм/об.дет:
 1 – 49А 46-0 L 15 V; 2 – 85А 46 L 15 V (Cubitron); 3 – 85А 46 L 15 V (SG)

линейных моделей связи исследуемого выходного параметра со скоростью шлифовального круга. Вид модели выбирался в соответствии с уровнем адекватности экспериментальным данным, результаты статистической обработки представлены в табличной и графической формах. Кроме того, разрабатывались статистические

модели, обобщающие результаты исследований нескольких характеристик шлифовальных кругов различных производителей в широком диапазоне изменения режимов обработки.

Влияние материала абразива. Для изучения работоспособности шлифовальных кругов с различными модификациями

электрокорунда исследовались круги RW одинаковой твердости L и структуры 15 (по стандартам RW) на одной керамической связке из электрокорунда белого (Edelkorund 49A), Cubitron (85A) и микрокристаллического корунда (SG-Korn) зернистости 46 (см. табл. 8.1, пп. 16, 17, 18). Результаты сухого шлифования указанными кругами при значениях $q = 60$, $t = 1$ мкм/об.дет и $q = 20$, $t = 5$ мкм/об.дет представлены на рис. 8.11 и 8.12.

На мягком режиме шлифования исследованными кругами при $q = 60$ и $t = 1$ мкм/об.дет наблюдается достаточно большой разброс в значениях выходных параметров P_w , $\Delta\Theta$, G и Ra , особенно при максимальной скорости обработки 80 м/с: для мощности шлифования рассеяние составляет 33 %, для температуры детали – 15 %, удельной производительности – 107 % и для шероховатости обработанной поверхности детали – 28,5 %. Такой значительный разброс в результатах шлифования свидетельствует о том, что на мягком режиме обработки велико влияние материала абразивных зерен инструмента на процесс сухого шлифования. Однако отдать предпочтение какому-либо варианту шлифовального круга в этих условиях невозможно: круг из зерна марки 49A обеспечивает, например, минимальное значение Ra во всем диапазоне скоростей шлифования от 35 до 80 м/с, но при этом наблюдаются наибольшие значения P_w и $\Delta\Theta$ и стабильное уменьшение удельной производительности G . При шлифовании кругом с абразивным зерном SG на скорости 80 м/с зафиксирована минимальная температура детали и стабильное увеличение средних значений G от 17,3 до 29,8 или в 1,72 раза, но при этом всегда сохраняются наибольшие значения Ra в сравнении с обработкой другими кругами.

При переходе на более форсированный режим обработки при $q = 20$ и $t = 5$ мкм/об.дет, при котором средняя расчетная толщина удаляемой стружки увеличивается в 15 раз и соответственно воз-

растает термодинамическая напряженность в зоне резания и нагрузка на режущий инструмент, ситуация с результатами шлифования инструментом с различным материалом абразива кардинально меняется.

На этом режиме обработки, особенно при скорости 80 м/с, как и в предыдущем случае, конечные результаты шлифования практически не зависят от применяемого абразива, так как значения P_w , $\Delta\Theta$ и Ra практически одинаковы, отличаясь только на 4...6 %, что сопоставимо с погрешностью измерения. Исключение составляет только износостойкость инструмента, напрямую связанная с удельной производительностью G (8.15), которая на форсированном режиме шлифования оказалась больше на 27...46 % для круга с абразивным зерном SG, чем для инструментов с другими абразивами (рис. 8.12). Повышенную износостойкость шлифовальный круг с зерном SG показал и на другом форсированном режиме обработки при $q = 60$ и $t = 5$ мкм/об.дет: значение G для него в 1,6...1,7 раз больше, чем у инструмента с другими исследованными абразивными материалами. При скорости круга 80 м/с на более мягких режимах сухого шлифования повышенную износостойкость по q и t обеспечивает шлифовальный круг с абразивным зерном из электрокорунда марки Cubitron.

В целом же, сравнивая результаты сухого шлифования кругами из различных абразивов в исследованном диапазоне по скорости круга от 35 до 80 м/с, по величине q от 100 до 20 и при $t = 1$ и 5 мкм/об.дет, необходимо отдать предпочтение инструменту с характеристикой 85A 46 L 15 VB MF 901 WS-Z, в котором в качестве абразивного материала использовано зерно SG. При шлифовании этим кругом во всем исследованном диапазоне режимов обработки обеспечивалась минимальная температура обрабатываемой детали и максимальная его износостойкость при форсированных режимах съема материала 8,75...20 мм³/(мм·с).

8.4. Влияние размера зерна шлифовального круга на характеристики процесса сухого шлифования

$V_{кр},$ м/с	q	$t,$ мкм/об. дет	$P_w,$ кВт/мм		$U,$ Дж/мм ³		$\Delta\Theta,$ °C		$Ra,$ мкм	
			Зернистость							
			46	100	46	100	46	100	46	100
35	60	1	0,05	0,02	86	34	37,6	26,2	1,1	1,5
35	20	1	0,12	0,05	68	28	63,2	42,1	2,0	1,6
35	60	5	0,15	0,08	51	27	67,3	57,1	2,2	2,2
35	20	5	0,32	0,16	36	18	69,8	58,1	4,1	2,7
60	60	1	0,10	0,05	100	50	76,0	62,5	1,2	1,2
60	20	1	0,20	0,08	67	27	63,4	36,6	2,1	1,8
60	60	5	0,24	0,13	48	26	69,6	68,2	2,1	2,1
60	20	5	0,51	0,22	34	17	64,9	66,4	3,4	2,7

Необходимо также отметить экстремальный характер изменения температуры детали $\Delta\Theta$ при увеличении скорости шлифования, который сохраняется для кругов с различными абразивами и при различных соотношениях значений q и t . Это является важной особенностью процесса сухого шлифования, природа которого будет рассмотрена ниже.

Влияние размера зерна шлифовального круга. Чтобы оценить влияние зернистости шлифовального круга на выходные параметры сухого шлифования, из массива исследованного инструмента были выбраны две характеристики с зернистостью 46 и 100. Шлифовальные круги RW (см. табл. 8.3, пп. 15 и 17) по представленной фирмой спецификации имеют одинаковую марку абразива 49А, твердость L и структуру 15, но различные керамические связки. По плотности эти шлифовальные круги практически одинаковы (разница в значениях γ составляет 4 %), по модулю упругости E их различие составляет всего 1,2 %, что в соответствии с рис. 8.1 позволяет предположить одинаковую твердость (приведенные в табл. 8.1 данные по твердости существенно разнятся между собой).

В шлифовальном круге с характеристикой 49А 46-0 L 15 VB MF 901 WS-Z основной фракцией является зернистость 46, но в нем также содержатся абразивные зерна с зернистостью 80 (20 %) и 100 (20 %), которые, как показали последующие исследования, не оказывают решающего влияния на выходные характеристики сухого шлифования.

В табл. 8.4 приведены данные по мощности P_w и удельной энергоемкости U шлифования, а также температуре детали $\Delta\Theta$ и параметру шероховатости обработанной поверхности Ra при обработке этими кругами в зависимости от их зернистости и изменения режимов обработки.

Обращает внимание, что шлифовальный круг с мелким зерном, т.е. зернистостью 100, на съем материала затрачивает в 2...2,5 раз меньше энергии, чем круг с более крупным абразивным зерном. Причем это соотношение сохраняется во всем исследованном диапазоне режимов шлифования с минутным съемом от 0,58 до 15 мм³/(мм·с). Кроме того, наблюдается еще одна особенность использования мелкозернистого круга: несмотря на то что мощность и удельная энергоемкость шлифования при скорости 60 м/с и $t =$

= 5 мкм/об.дет у него почти в 2 раза меньше, чем у круга зернистостью 46, температура обрабатываемой детали в обоих случаях практически одинакова.

Объяснить выявленные особенности можно следующим образом. Рельеф рабочей поверхности шлифовального круга формируется за счет выступания над уровнем связки случайно ориентированных абразивных зерен, закрепленных связкой. Высота выступания зерен над связкой и геометрия их режущих элементов зависит в основном от размера абразивных зерен, а также от типа связки, твердости круга, условий правки и т.д. Для крупнозернистых шлифовальных кругов высота выступания абразивных зерен над связкой (разновысотность), радиусы округления и углы заострения их режущих кромок больше, чем для мелкозернистого инструмента. В то же время число зерен, находящихся на рабочей поверхности крупнозернистого круга, и соответственно число зерен, которое участвует в процессе резания, всегда меньше, чем у инструмента с мелкими зернами.

Если сравнить по этим характеристикам два круга с одним номером структуры зернистостью 46 и 100, то оказывается, что у мелкозернистого круга на рабочей поверхности находится в 18 раз больше зерен, чем у круга зернистостью 46, а их радиус округления при этом почти в 3 раза меньше. Следовательно, режущий рельеф рабочей поверхности мелкозернистого круга наиболее оптимален для исследованных условий шлифования с малыми толщинами среза.

Крупные абразивные зерна при обработке на мягких режимах шлифования в меньшей степени, чем мелкие зерна, участвуют в процессе резания из-за больших радиусов округления и заострения режущих кромок, а в большей степени только деформируют обрабатываемый материал, затрачивая дополнительную энергию. Косвенно это объяснение подтверждается результатами измерения шероховатости обработанной поверхности: несмотря на

существенную разницу в размерах абразивных зерен значения Ra во всем исследованном диапазоне режимов сухого шлифования двумя исследованными кругами практически одинаковы (табл. 8.4).

Другим подтверждением предложенного объяснения является сопоставление режущей способности исследованного круга зернистостью 46 и шлифовального круга Reik зернистостью 36 с характеристикой 21A 36 K 13 V 14 (табл. 8.1, п. 6). На режиме $v_{кр} = 35$ м/с, $q = 60$, $t = 1$ мкм/об.дет мощность и соответственно удельная энергоемкость шлифования кругом зернистостью 36 в 2 раза больше, чем кругом зернистостью 46. Различие в энергетических затратах при шлифовании этими кругами уменьшается до 9,4 % на режиме $v_{кр} = 35$ м/с, $q = 20$, $t = 5$ мкм/об.дет с увеличением толщины среза, т.е. пропорционально возрастанию отношения t/q .

Что касается равенства температур детали при различии энергетических затрат при шлифовании кругами зернистостью 100 и 46, то, по-видимому, это связано с охлаждающим эффектом от вращения шлифовального круга, величина которого будет меньше для рабочей поверхности с небольшой высотой выступания абразивных зерен.

Таким образом, при сухом шлифовании подтверждаются известные закономерности влияния размера абразивного зерна на режущую способность шлифовального круга и выходные параметры процесса шлифования в целом. Размер зерна необходимо назначать в соответствии с условиями шлифования: на мягких режимах шлифования с небольшими толщинами среза предпочтительнее использовать мелкозернистые шлифовальные круги; на форсированных режимах обработки с повышенной производительностью – инструмент с крупными абразивными зернами.

Для исследованной схемы сухого шлифования на врезание с параметрами

режима обработки $q = 20 \dots 100$ и $t \leq 5$ мкм/об.дет высокую режущую способность обеспечивают шлифовальные круги зернистостью 100.

Влияние структуры и твердости шлифовального круга. Для сухого шлифования, как уже отмечалось выше, большое значение приобретает использование шлифовальных кругов с оптимально подобранным соотношением структура (пористость)–твердость.

Для оценки режущей способности шлифовальных кругов с различными номерами структур и твердости анализировались результаты испытаний кругов RW-St (табл. 8.1, пп. 20–23), которые были изготовлены из абразивного зерна одной марки 49А, одинаковой зернистости 90 и на одной и той же керамической связке. Исследовалось влияние четырех соотношений структура–твердость в достаточно широком диапазоне: 12–Н, 14–I, 18–G и 20–F на выходные характеристики сухого шлифования со скоростью обработки от 35 до 90 м/с.

Экспериментальные исследования показали, что удельная энергоемкость, так же, как и мощность шлифования, тесно коррелированы с плотностью γ шлифовального круга: их значения тем больше, чем больше значение γ . В свою очередь установлено, что, например, для высокопористых шлифовальных кругов RW-St на режиме сухого шлифования $v_{кр} = 35$ м/с, $q = 20$, $t = 5$ мкм/об.дет удельная энергоемкость процесса возрастает с увеличением объемного содержания абразивного зерна в шлифовальном круге v_z (от 22 до 38 %) и его твердости (по величине *Grado*) по следующей зависимости:

$$\ln U = 4,086 + 0,172 \ln V_z - 0,298 \ln Gr. \quad (8.19)$$

Степень влияния структуры круга и его твердости на удельную энергоемкость шлифования одинаковы: коэффициент парной корреляции для них соответственно равны 0,511 и 0,516.

Можно, следовательно, утверждать, что режущая способность шлифовального круга зависит от его структуры и твердости: для высоких номеров структур и мягких по твердости кругов энергетические затраты на сьем материала минимизируются. Эта закономерность, как показали эксперименты, сохраняется при изменении $v_{кр}$, q и t в исследованном диапазоне.

На рис. 8.13 и 8.14 представлены данные по влиянию плотности (соответственно структуры), твердости и скорости круга на выходные характеристики сухого шлифования при граничных условиях обработки: мягком $q = 60$ и $t = 1$ мкм/об.дет и форсированном режиме $q = 20$ и $t = 5$ мкм/об.дет. Статистическое обобщение экспериментальных данных показано для двух характеристик инструмента: наиболее твердого из четырех рассматриваемых кругов RW-St с твердостью I и структурой 14 и наиболее мягкого с твердостью F и наибольшей пористостью со структурой 20.

Общим для представленных на рис. 8.13 и 8.14 шлифовальных кругов является стабилизация температуры обрабатываемой детали с увеличением скорости от 35 до 90 м/с при $q = 60$ и $t = 1$ мкм/об.дет и ее снижение при $q = 20$ и $t = 5$ мкм/об.дет. При этом мягкий круг со структурой 20 обеспечивает более низкую температуру $\Delta\Theta$, однако при максимальной скорости резания 90 м/с эта разница становится незначительной (до 17 %) в зависимости от интенсивности съема материала.

На самом интенсивном режиме шлифования при $q = 20$ и $t = 5$ мкм/об.дет зафиксирована также общая тенденция повышения удельной производительности G с увеличением скорости круга. Ее увеличение тем больше, чем тверже шлифовальный круг, что можно объяснить повышением так называемой динамической твердости инструмента, обусловленной уменьшением нагрузки на режущие абразивные зерна при увеличении его скорости вращения.

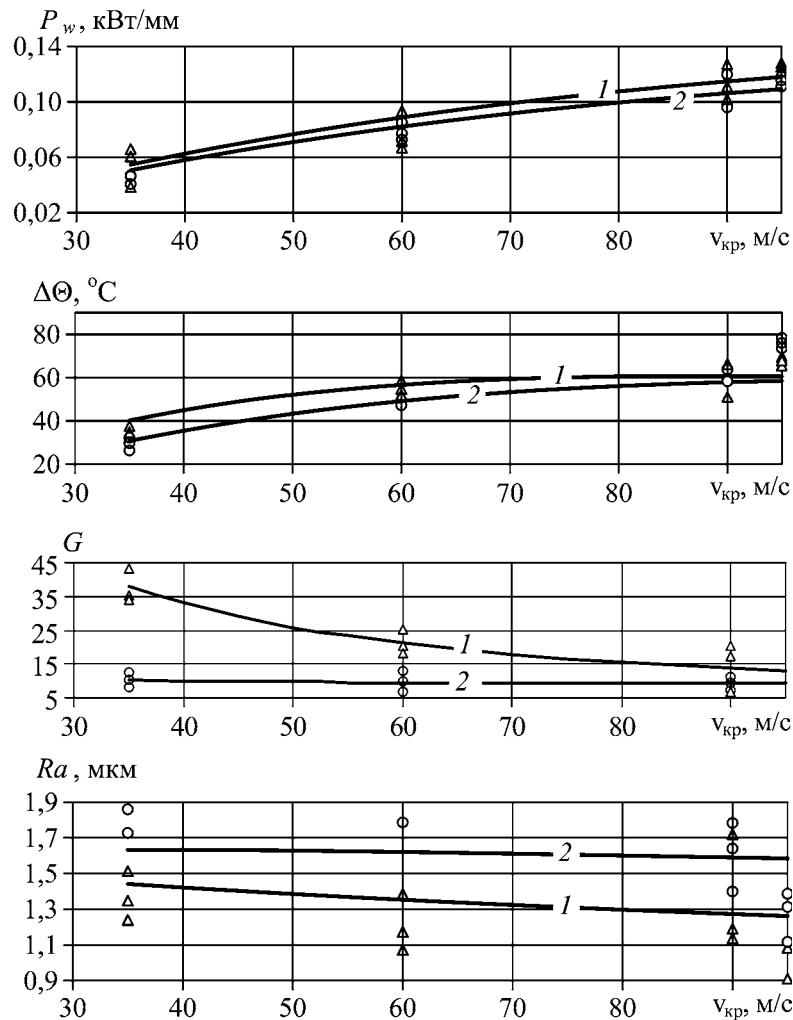


Рис. 8.13. Влияние плотности, твердости и скорости круга на характеристики сухого шлифования при $q = 60$, $t = 1$ мкм/об.дет:
1 – 49A 90 I 14 V; 2 – 49A 90 F 20 V

На всех исследованных режимах сухого шлифования наблюдается незначительное уменьшение шероховатости обработанной поверхности детали с увеличением $v_{кр}$, причем значение Ra всегда меньше после обработки более твердым инструментом. Отмеченное в данных экспериментах и известное из практики шлифования влияние твердости круга на шероховатость обработанной поверхности

подтверждается результатами испытаний при сухом шлифровании других шлифовальных кругов (например, круг CE-St 99BA 90 M 14 V – табл. 8.1, п. 25).

Статистическим обобщением экспериментальных данных по влиянию структуры и твердости шлифовальных кругов во взаимосвязи со скоростью обработки и другими параметрами режима шлифования разработаны специальные математи-

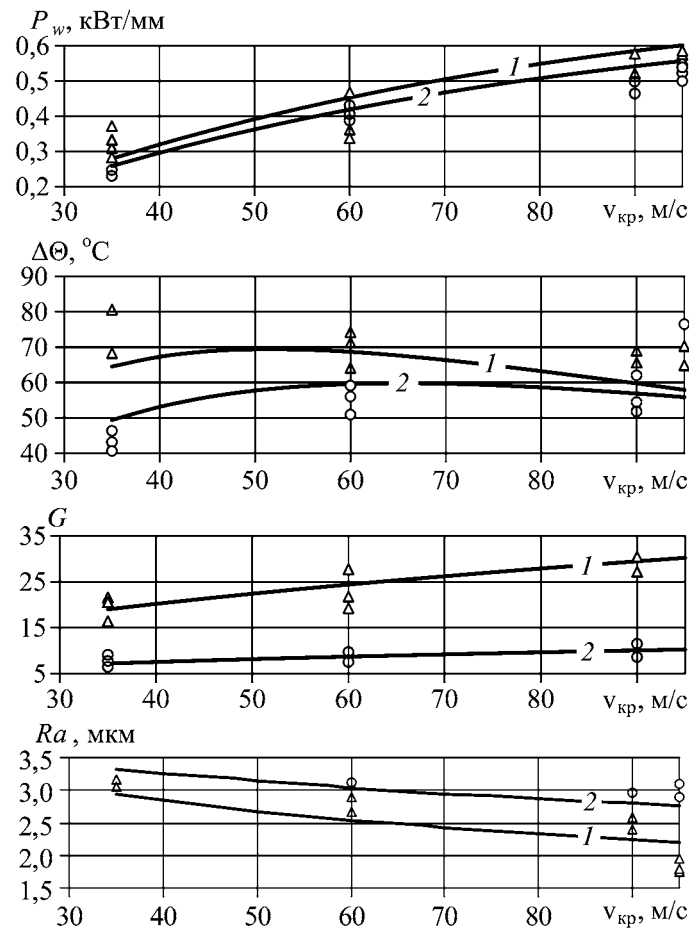


Рис. 8.14. Влияние плотности, твердости и скорости круга на характеристики сухого шлифования при $q = 20$, $t = 5$ мкм/об.дет:
1 – 49A 90 I 14 V; 2 – 49A 90 F 20 V

ческие модели в виде нелинейных логарифмических полиномов. С их помощью можно прогнозировать степень и характер совместного и раздельного влияния структуры и твердости высокопористого шлифовального круга, его скорости, а также параметров режима обработки q и t на основные выходные характеристики сухого шлифования кругами RW-St (табл. 8.5) и кругами Reik (табл. 8.6).

Из корреляционного анализа экспериментальных данных следует, что характеристика инструмента (его плотность γ и

твердость H по *Grado*) очень слабо коррелированы с мощностью шлифования P_w (коэффициенты парной корреляции соответственно равны 0,040 и 0,052). Более сильное влияние на мощность шлифования оказывают: подача на глубину t ($R = 0,735$), скорость круга $v_{кр}$ ($R = 0,450$) и отношение q ($R = 0,451$).

Температура обработанной детали $\Delta\Theta$ и удельная производительность G , напротив, очень сильно зависят от плотности и твердости шлифовального круга (для температуры $R_\gamma = 0,429$ и $R_H = 0,290$,

8.5. Обобщенные математические модели выходных параметров сухого шлифования для кругов RW-St

Математические модели связи	Коэффициенты парной корреляции				Оценка адекватности		
	γ	H	$v_{\text{кр}}$	q	t	КМК	ОД F-отн.
$\ln P_w = 0,237 \ln \gamma - 0,113 \ln H + 3,048 \ln v_{\text{кр}} - 0,564 \ln q + 0,628 \ln t - 0,281 \ln^2 v_{\text{кр}} - 7,621$	-0,040	-0,052	0,450	-0,451	0,735	0,972	0,063 114,822
$\ln \Delta \Theta = 10,899 + 0,248 \ln \gamma - 2,557 \ln H + 1,227 \ln v_{\text{кр}} - 2,261 \ln q + 0,147 \ln t - 0,630 \ln^2 v_{\text{кр}} + 0,525 \ln H \ln v_{\text{кр}} + 0,561 \ln v_{\text{кр}} \ln q$	0,429	-0,290	0,317	-0,024	0,413	0,799	0,470 3,052
$\ln \Delta \Theta = 14,016 \ln \gamma + 1,363 \ln H + 4,157 \ln v_{\text{кр}} - 1,907 \ln q + 0,140 \ln t - 0,488 \ln^2 v_{\text{кр}} - 2,256 \ln \gamma \ln v_{\text{кр}} - 0,090 \ln H \ln v_{\text{кр}} + 0,473 \ln v_{\text{кр}} \ln q - 11,481$	0,429	-0,290	0,317	-0,024	0,413	0,821	0,394 8,737
$\ln G = 7,459 + 0,383 \ln \gamma - 1,621 \ln H + 0,098 \ln v_{\text{кр}} + 0,335 \ln q - 0,107 \ln t$	0,752	-0,777	0,345	0,489	0,084	0,847	0,553 3,052
$\ln Ra = 2,174 + 2,184 \ln \gamma + 0,044 \ln H - 1,294 \ln v_{\text{кр}} - 0,834 \ln q + 0,218 \ln t - 0,035 \ln^2 v_{\text{кр}} + 0,239 \ln H \ln v_{\text{кр}} + 0,142 \ln v_{\text{кр}} \ln q$	-0,067	0,151	-0,135	-0,409	0,521	0,734	0,553 5,122

8.6. Обобщенные математические модели выходных параметров сухого шлифования для кругов Reik

Математические модели связи	Коэффициенты парной корреляции				Оценка адекватности		
	γ	$v_{\text{кр}}$	q	t	КМК	ОД	F-отн.
$\ln P_w = 155,018 \ln \gamma + 3,595 \ln v_{\text{кр}} - 0,848 \ln q + 0,641 \ln t + 0,039 \ln v_{\text{кр}} \ln q - 4,633 \ln \gamma \ln v_{\text{кр}} - 103,355 \ln^2 \gamma - 59,186$	-0,369	0,279	-0,516	0,696	0,993	0,016	308,110
$\ln \Delta \Theta = 1,266 - 0,727 \ln \gamma + 2,60 \ln v_{\text{кр}} - 1,153 \ln q + 0,141 \ln t - 0,402 \ln^2 v_{\text{кр}} + 0,245 \ln v_{\text{кр}} \ln q$	-0,132	0,428	-0,396	0,478	0,799	0,421	8,858
$\ln G = 1,113 \ln \gamma + 1,151 \ln v_{\text{кр}} + 1,821 \ln q - 0,013 \ln t - 0,415 \ln v_{\text{кр}} \ln q - 2,655$	0,173	-0,400	0,313	-0,039	0,608	0,711	3,650
$\ln Ra = 9,853 - 9,161 \ln \gamma - 2,113 \ln v_{\text{кр}} - 0,914 \ln q + 0,295 \ln t - 0,138 \ln v_{\text{кр}} \ln q + 2,362 \ln \gamma \ln v_{\text{кр}}$	0,044	-0,019	-0,592	0,707	0,933	0,151	33,556

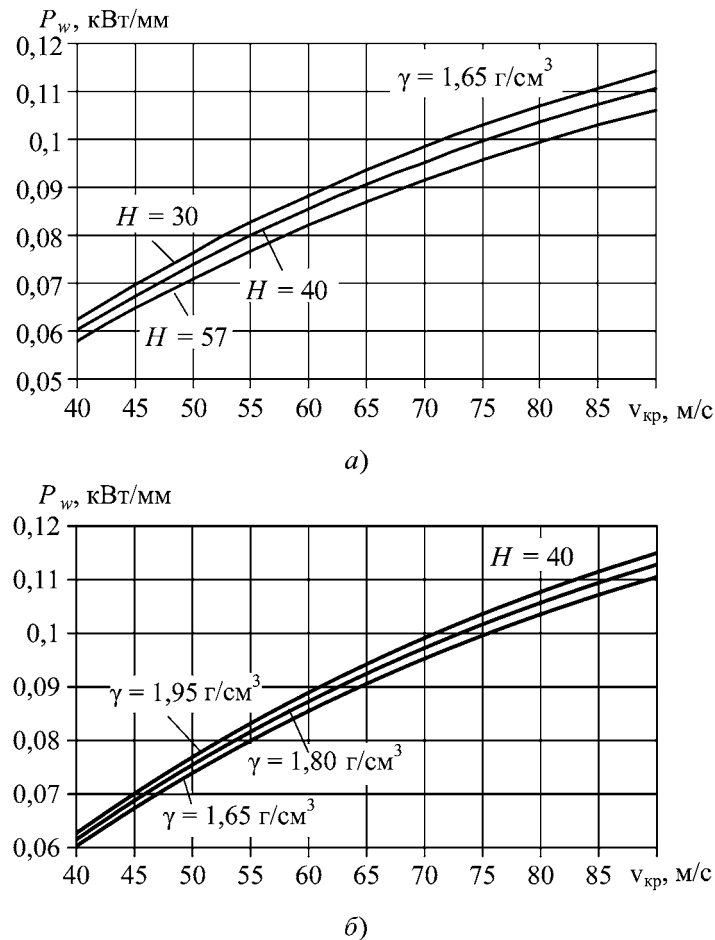


Рис. 8.15. Влияние скорости шлифования на мощность при сухом шлифовании в зависимости от твердости (а) и плотности (б) шлифовального круга ($q = 60$, $t = 1 \text{ мкм/об.дет}$; $A = 0,16 \text{ мкм}$)

для удельной производительности $R_\gamma = 0,752$ и $R_H = 0,777$ и скорости шлифования ($R_\Theta = 0,317$ и $R_G = 0,345$ соответственно). На изменение шероховатости обработанной поверхности Ra наибольшее влияние оказывает глубина t ($R_t = 0,521$) и отношение скоростей q ($R_q = 0,409$).

На рис. 8.15–8.18 в графическом виде дана прогнозная оценка изменения исследуемых выходных характеристик сухого шлифования P_w , $\Delta\Theta$, G и Ra от раздельного и совместного влияния твердости и

плотности высокопористых шлифовальных кругов при увеличении скорости круга от 35 до 90 м/с при $q = 60$ и $t = 1 \text{ мкм/об.дет}$. Мощность шлифования будет повышаться, если при постоянной плотности γ будет увеличиваться твердость круга или если при постоянной твердости круга будет возрастать его плотность (за счет увеличения объемного содержания абразива в инструменте).

Аналогичным образом твердость и плотность шлифовального круга оказы-

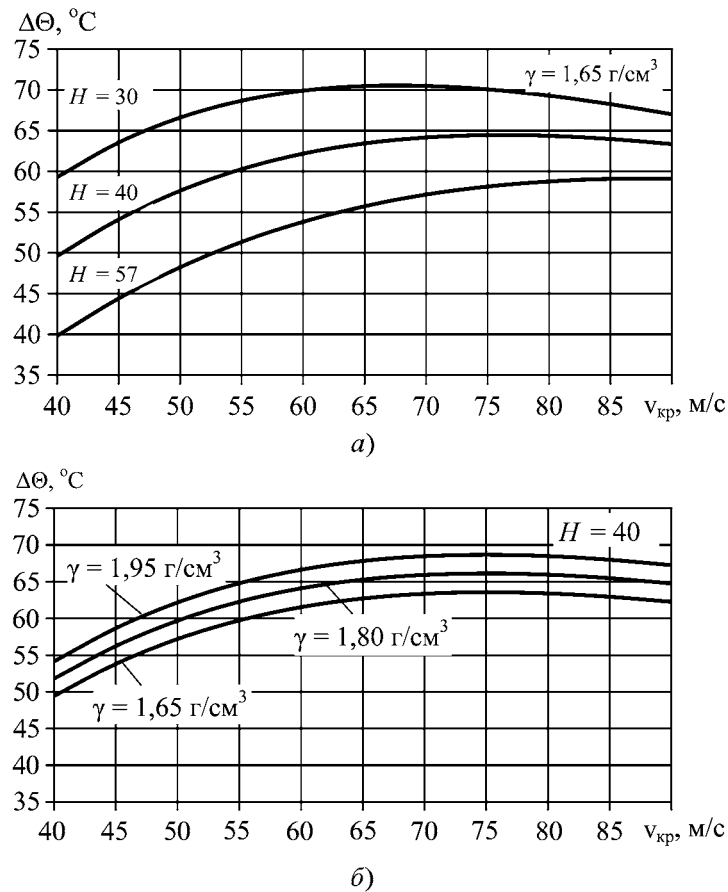


Рис. 8.16. Влияние скорости круга на температуру детали при сухом шлифовании в зависимости от твердости (а) и плотности (б) шлифовального круга ($q = 60$, $t = 1 \text{ мкм/об.дет}$; $A = 0,16 \text{ мкм}$)

вают влияние на температуру обрабатываемой детали, но характер изменения температуры от скорости шлифования носит, как это следует из экспериментальных данных, экстремальный характер (рис. 8.16). Полученная расчетная модель дает возможность связать экстремальные значения температуры с твердостью, плотностью и скоростью круга: чем тверже шлифовальный круг и больше его плотность, тем при меньшей скорости шлифования достигается максимальная температура обрабатываемой детали и начинается ее падение при дальнейшем

увеличении $v_{кр}$. Наиболее благоприятные термодинамические условия при сухом шлифовании обеспечиваются мягкими шлифовальными кругами с высокими номерами структуры при скорости шлифования более 60 м/с.

Увеличение твердости инструмента способствует повышению его износостойкости, что очевидно, так как при увеличении твердости возрастает сила, удерживающая абразивные зерна связкой инструмента. Расчетная модель также прогнозирует повышение износостойкости шлифовальных кругов в случае увеличе-

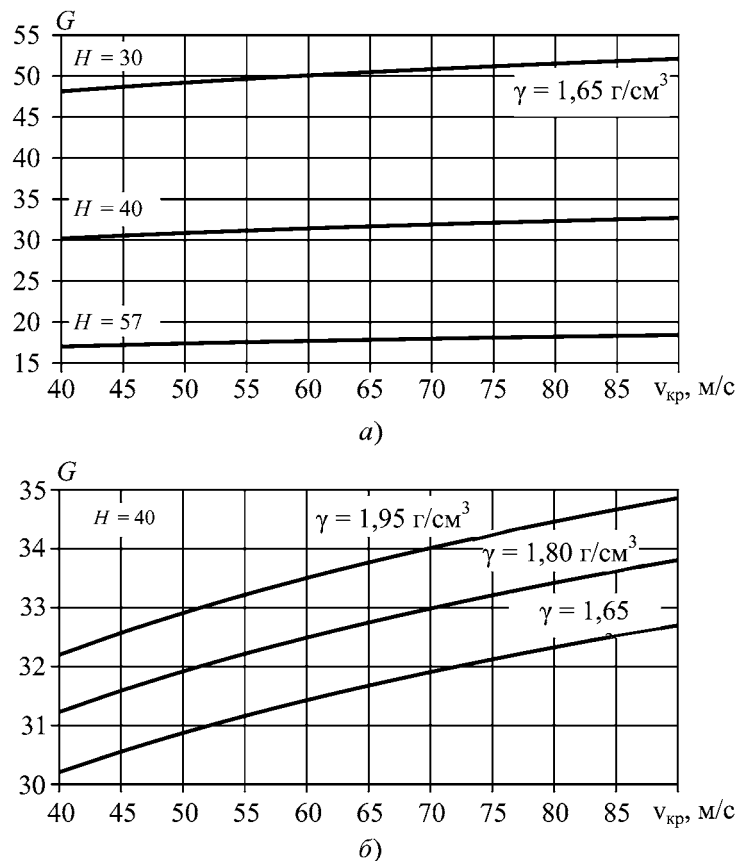


Рис. 8.17. Влияние скорости круга на удельную производительность при сухом шлифовании в зависимости от твердости (а) и плотности (б) шлифовального круга ($q = 60$, $t = 1$ мкм/об.дет; $A = 0,16$ мкм)

ния их плотности при постоянной твердости, т.е. при уменьшении номера структуры (рис. 8.17).

Более твердые с высокими номерами структуры шлифовальные круги предпочтительны для сухого шлифования в целях обеспечения минимальной шероховатости обработанной поверхности детали, величина Ra которой также дополнительно уменьшается при увеличении скорости круга (рис. 8.18).

Шлифовальные круги из абразивной смеси различной зернистости. Указанный инструмент был изготовлен фирмой

Reik и содержал смесь электрокорунда марки 21А двух зернистостей 46/60 и 46/80 в соотношении 50:50 % твердостью К на одной керамической связке V09 и с различной плотностью от 1,94 до 2,05 г/см³, что свидетельствует о различном содержании абразива в шлифовальном круге, т.е. о их различной пористости (табл. 8.1, пп. 5, 7, 8). Для этих же кругов на рис. 8.3 приведена зависимость разрывной скорости от их плотности: шлифовальный круг с характеристикой 21А 46/80 К 9/9 V09 имеет минимальную разрывную скорость и максимальную плот-

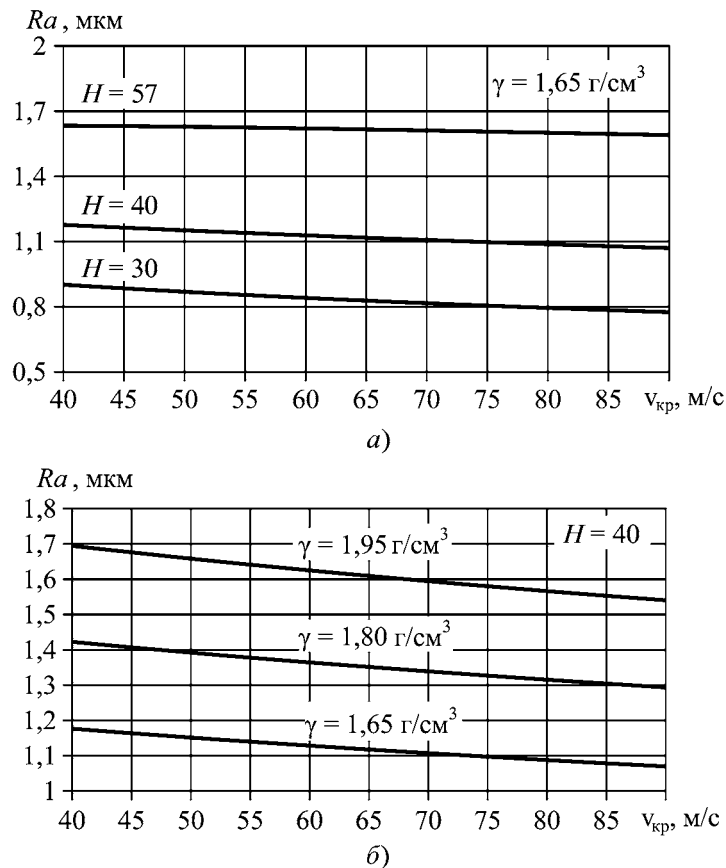


Рис. 8.18. Влияние скорости шлифования на шероховатость обработанной поверхности в зависимости от твердости (а) и плотности (б) шлифовального круга ($q = 60$, $t = 1 \text{ мкм/об.дет}$; $A = 0,16 \text{ мкм}$)

ность. Но в процессе сухого шлифования этот круг проявил аномальные эксплуатационные свойства.

На рис. 8.19 и 8.20 приведены зависимости выходных характеристик сухого шлифования в исследованиях граничных диапазонах по скорости съема материала для кругов Reik при изменении скорости от 35 до 80 м/с, а в табл. 8.6 представлены их обобщенные математические модели со статистической оценкой тесноты корреляционных связей выходных параметров процесса с условиями обработки и качества разработанных моделей.

Аномальный характер работы шлифовального круга 21А 46/80 К 9/9 V09 проявляется в том, что, несмотря на относительно более высокую плотность, этот круг на всех исследованных режимах шлифования расходует значительно меньше энергии на процесс резания материала и особенно при форсированных режимах обработки. Если на режиме $v_{кр} = 35 \text{ м/с}$, $q = 60$ и $t = 1 \text{ мкм/об.дет}$ мощность шлифования этим кругом на 61...68 % меньше, чем для других шлифовальных кругов Reik из абразивных смесей, то с увеличением скорости до 80 м/с затрачиваемая

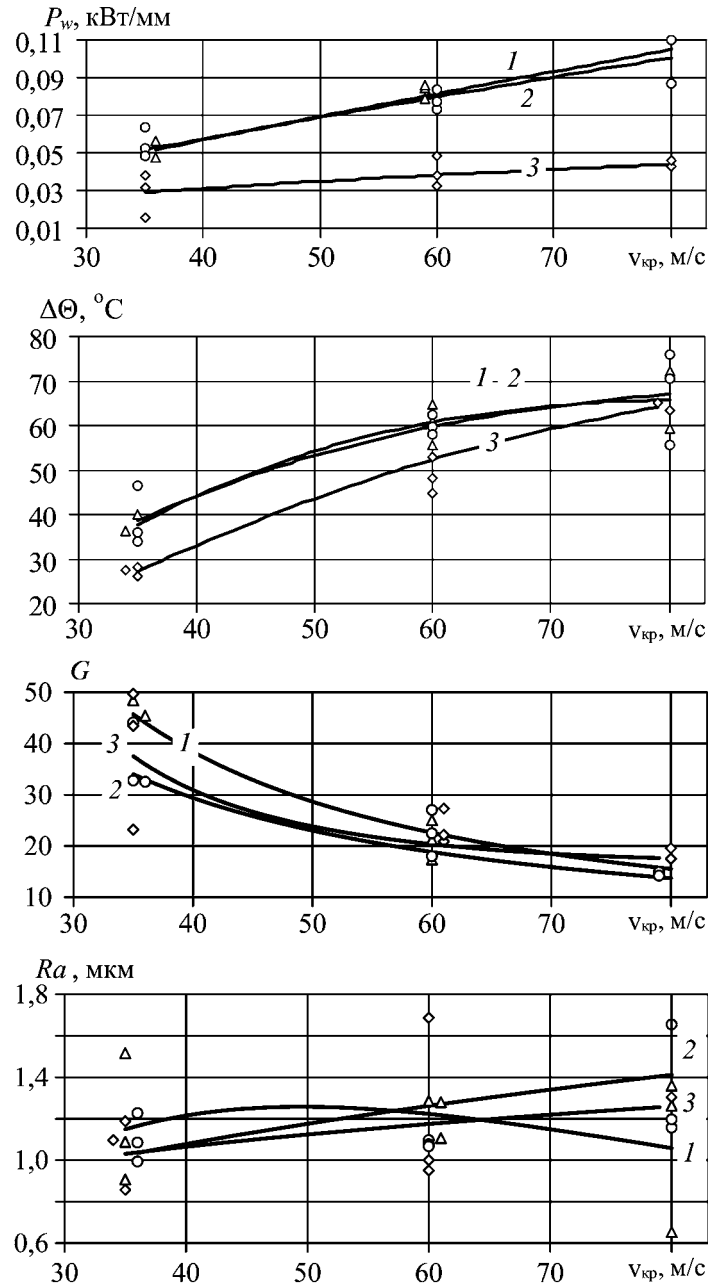


Рис. 8.19. Влияние скорости кругов Reik на характеристики процесса сухого шлифования при $q = 60$, $t = 1$ мкм/об.дет:

1 – 21A 46/60 K 10/34 V09; 2 – 21A 46/60 K 10/34 V09; 3 – 21A 46/80 K 9/9 V09

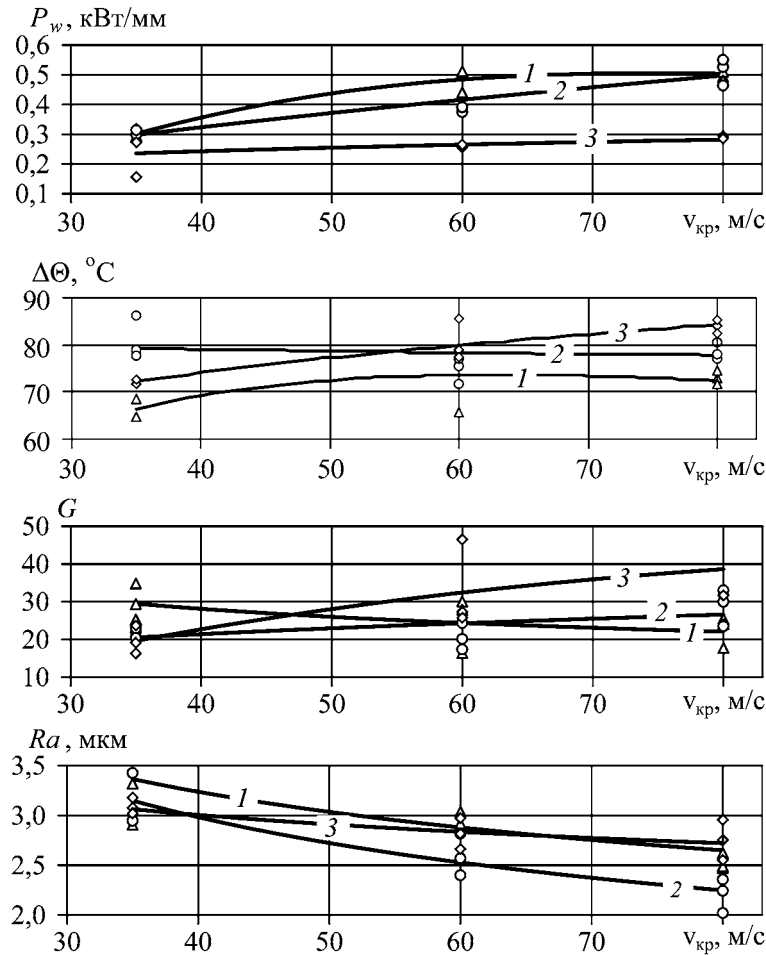


Рис. 8.20. Влияние скорости кругов Reik на характеристики процесса сухого шлифования при $q = 20$, $t = 5$ мкм/об.дет:

1 – 21A 46/60 K 10/34 V09; 2 – 21A 46/60 K 10/34 V09; 3 – 21A 46/80 K 9/9 V09

мощность P_w уменьшается до 2,29 раз. На форсированном режиме шлифования $v_{кр} = 80$ м/с, $q = 20$ и $t = 5$ мкм/об.дет различие в энергетических затратах также достаточно велико: 76...82 % (см. рис. 8.20).

Однако несмотря на небольшую мощность шлифования кругом 21A 46/80 K 9/9 V09 средняя температура обрабатываемой детали для кругов Reik при скорости 80 м/с сохраняется практически одинаковой: 64,5...67,3 °C (разница 4,3 %) при $q = 60$ и $t = 1$ мкм/об.дет, уве-

личиваясь до 83,5 °C (на 3,5...13,9 % больше, чем для 2 других исследованных кругов) при $q = 20$ и $t = 5$ мкм/об.дет. Сохраняется также примерно одинаковый характер закономерностей $G(v_{кр})$ и $Ra(v_{кр})$ для всех исследованных кругов, за исключением того, что при скорости шлифования 80 м/с у аномального круга износостойкость всегда выше, чем у других кругов, а при подаче на глубину $t = 5$ мкм/об.дет только у него наблюдается тенденция повышения износостойкости при увеличе-

нии скорости круга. Поэтому относительно небольшие энергетические затраты при шлифовании нельзя объяснить интенсивным изнашиванием круга, что бывает причиной уменьшения мощности обработки в режиме самозатачивания абразивного инструмента.

Причина аномальности, по-видимому, заключается в наличии мелкозернистой фракции абразивных зерен, так как при уменьшении размера режущих зерен мощность сухого шлифования уменьшается (см. табл. 8.4).

Корреляционный и регрессионный анализ экспериментальных данных результатов сухого шлифования кругами Reik (см. табл. 8.6) подтвердил ранее установленные закономерности шлифования кругами RW-St при исследовании влияния структуры и твердости абразивного инструмента (см. табл. 8.5). Наиболее сильное влияние на мощность P_w , температуру $\Delta\Theta$ и шероховатость Ra обрабатываемой детали оказывают параметры режима шлифования q и t , а на удельную производительность G – скорость круга $v_{кр}$.

Были также испытаны шлифовальные круги Reik с характеристикой 3CB3 46/60 J 10 V09R (табл. 8.1, п. 3) и 3CB3 100 J 7 12/40 V09R (п. 9), изготовленные с применением корунда микрокристаллической модификации SG. Первый круг представляет собой абразивную смесь из двух зернистостей и был испытан при скоростях шлифования 35 и 60 м/с. Второй круг из более мелкого зерна, но одинаковой твердости испытывался на скоростях 35, 60 и 80 м/с и также при $q = 20$ и 60 и $t = 1$ и 5 мкм/об.дет.

На самом мягком исследованном режиме $v_{кр} = 35$ м/с, $q = 60$, $t = 1$ мкм/об.дет мощность шлифования кругом зернистостью 100 была в 1,8 раз, а температура обработанной детали – почти в 2,3 раза меньше, чем при обработке кругом из смеси зерна 46 и 60. При последовательном форсировании режима шлифования

до $v_{кр} = 60$ м/с, $q = 20$ и $t = 5$ мкм/об.дет разница в значениях P_w и $\Delta\Theta$ при обработке обоими кругами уменьшается, а на предельном режиме круг 3CB3 46/60 J 10 V09R обеспечил на 9 % меньшую мощность и практически одинаковую температуру (меньше на 1,2 %) обработанной детали.

Если взять в качестве основного критерия температурный режим шлифования, то указанные круги с применением SG уступают другим кругам Reik и аналогичному шлифовальному кругу RW (табл. 8.2, п. 16) при одинаковых режимах обработки. Но при этом они обеспечили при сухом шлифовании наименьшую высоту микронеровностей на обработанной поверхности детали по сравнению с аналогом RW и другими кругами Reik.

Сравнительный анализ шлифовальных кругов различных производителей. Как уже отмечалось выше, в экспериментальных исследованиях по сухому шлифованию были испытаны шлифовальные круги различных производителей, которые отличались по материалу абразивных зерен и их размерам, твердости, номеру структуры (пористости) и были изготовлены на различных керамических связках с использованием различных порообразователей и наполнителей (см. табл. 8.1). Испытания проводились в широком диапазоне режимов обработки, и соответственно были зафиксированы различные результаты в зависимости от характеристики инструмента и условий шлифования.

На рис. 8.21 и 8.22 в графической форме показаны экспериментальные зависимости исследуемых выходных характеристик сухого шлифования кругами различных производителей от скорости круга при граничных значениях q и t . В качестве представителей были выбраны условно лучшие шлифовальные круги от каждой из трех исследованных групп Reik, RW и RW-St: 21A 46/80 K 9/9 V09 (табл. 8.1, п. 8), 85A 46 L 15 VB MF 901 WS-Z (SG)

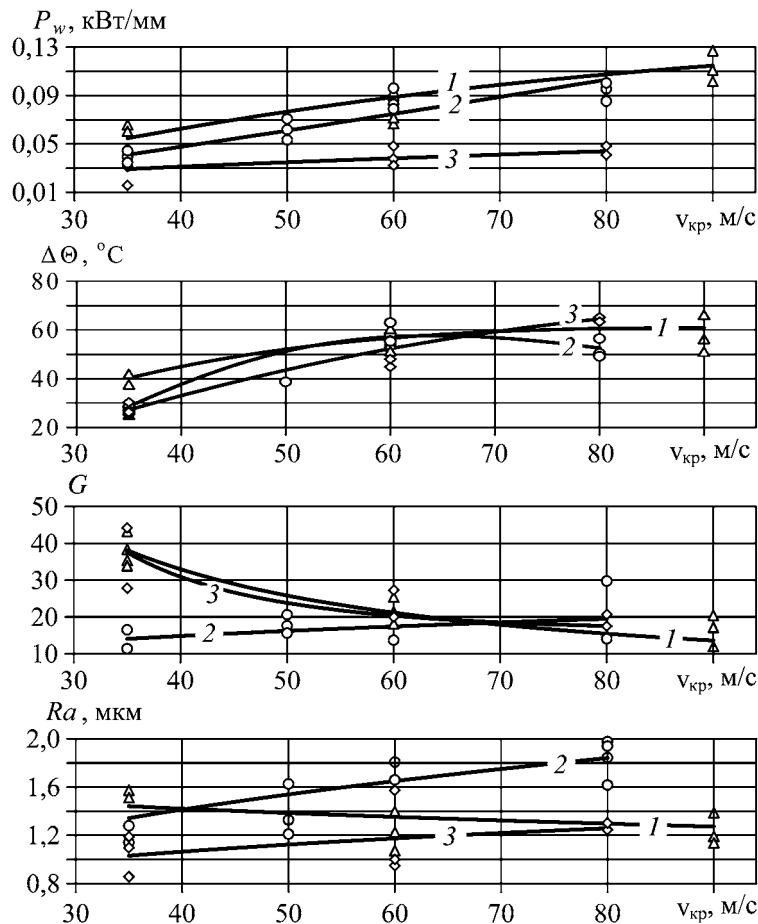


Рис. 8.21. Сравнительный анализ влияния скорости кругов различных производителей на характеристики процесса сухого шлифования при $q = 60$, $t = 1$ мкм/об.дет:
 1 – круг RW-St 49A 90 I 14 V; 2 – круг RW 85A 46 L 15 V (SG); 3 – круг Reik 21A 46/80 K 9/9 V

(табл. 8.1, п. 16) и 49A 90 I 14 V (табл. 8.1, п. 22). В качестве основного критерия выбора шлифовального круга была использована температура обрабатываемой детали.

Круги, представленные на рис. 8.21 и 8.22, обеспечивали минимально возможную температуру детали $\Delta\Theta$ в процессе сухого шлифования, а также по возможности и наибольшие значения удельной производительности G и наименьшие значения параметра шероховатости обработанной поверхности Ra .

Являясь типовыми представителями от каждой из исследованных групп шлифовальных кругов различных производителей, представленный инструмент проявляет общие закономерности процесса, характерные для группы. Экспериментально установлено, что при сухом шлифовании температура обрабатываемой детали возрастает с увеличением скорости круга и степени интенсивности режима обработки, но до определенного порога, после которого нагрев детали либо стабилизируется, либо начинает уменьшаться.

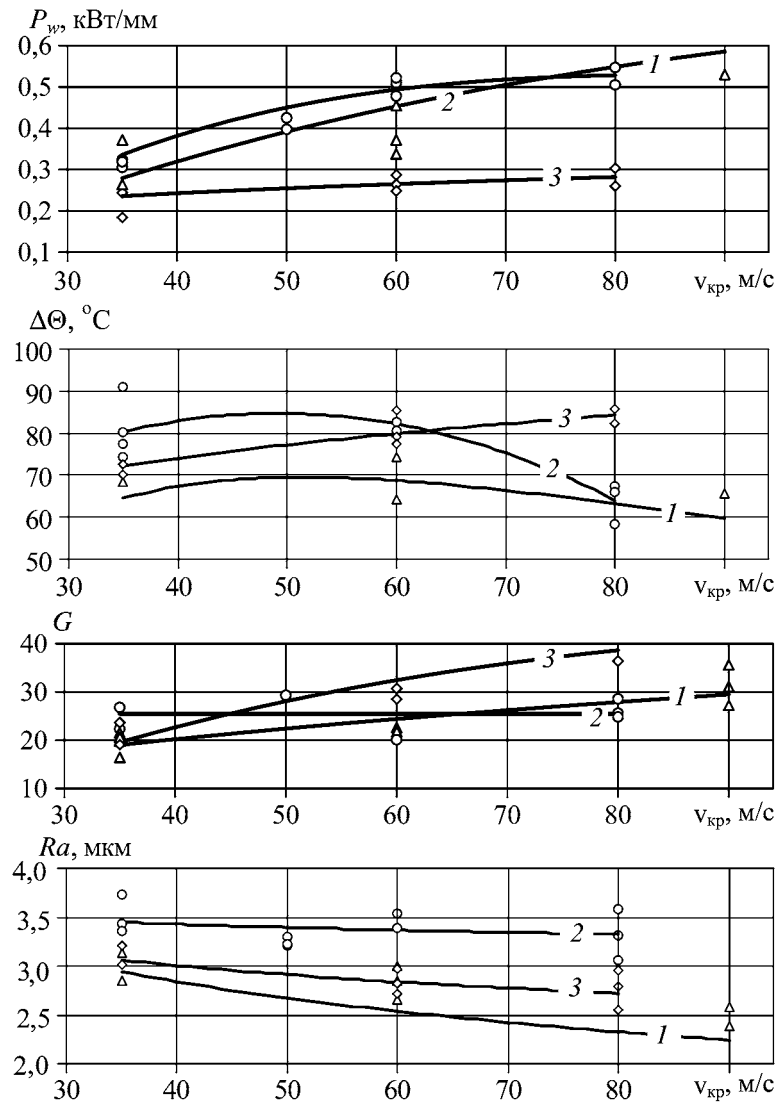


Рис. 8.22. Сравнительный анализ влияния скорости кругов различных производителей на характеристики процесса сухого шлифования при $q = 20$, $t = 5$ мкм/об.дет:
 1 – круг RW-St 49A 90 I 14 V; 2 – круг RW 85A 46 L 15 V (SG);
 3 – круг Reik 21A 46/80 K 9/9 V

Условия сухого шлифования по-разному оказывают влияние на работоспособность или износостойкость шлифовального круга, величина которого определяется через удельную производительность G . На мяг-

ком режиме шлифования при $q = 60$ и $t = 1$ мкм/об.дет условия работы абразивных зерен можно рассматривать как относительно неблагоприятные. Для этих условий расчетная толщина среза не соот-

ветствует значению, при котором обеспечиваются оптимальные требования для внедрения округленной режущей кромки зерна в обрабатываемый материал. С увеличением скорости круга при сохранении постоянными значений q и t сохраняется постоянная толщина среза, а температура в зоне резания возрастает, что усугубляет характер взаимодействия абразивных зерен шлифовального круга с обрабатываемой поверхностью детали. С одной стороны, все меньше зерен принимают участие в процессе резания и все больше их количество – в упругопластической деформации обрабатываемого материала. С другой стороны, увеличение скорости взаимного относительного перемещения круга и детали интенсифицирует работу трения контактных поверхностей, приводит к механическому истиранию абразивных зерен, проявлению негативных физико-химических явлений в контакте и преждевременному их разрушению. Этим можно объяснить снижение значений G с увеличением скорости круга на мягком режиме сухого шлифования.

Дополнительным подтверждением описанного механизма взаимодействия абразивных зерен с обрабатываемой поверхностью является зафиксированное повышение значений Ra при увеличении скорости круга. Вследствие интенсивного хрупкого разрушения абразивных зерен круга, в том числе для микрокристаллической модификации корунда SG, в контакт с деталью постоянно вступают новые острые режущие кромки.

При шлифовании на более форсированном режиме, когда толщина среза в 15 раз больше, абразивный инструмент работает в более благоприятных условиях, что обеспечивает повышение удельной производительности и соответственно износостойкости круга при увеличении скорости шлифования. В этой связи закономерно также и снижение высоты микронеровностей на обрабатываемой поверхности детали при повышении скорости шлифования.

На рис. 8.23 и 8.24 представлены результаты сухого шлифования другой группой высокопористых абразивных кругов, изготовленных на Carborundum Electrite на основе корундовых микросфер. Эти круги имеют один материал абразива – 99BA с одной зернистостью 90, со структурами 14 и 19, твердостью M и N, измеренной методом Маккензи. Несмотря на одинаковую или близкую твердость, круги CE-St (табл. 8.1, пп. 25–27) изготовлены по различным экспериментальным рецептам, что и предопределило различные результаты шлифования.

На режиме шлифования $q = 60$ и $t = 1$ мкм/об.дет при скорости круга от 35 до 96 м/с только для круга с характеристикой 99BA 90 N 14 V наблюдается тенденция стабилизации и уменьшения температуры обработанной детали.

На режиме $q = 20$ и $t = 5$ мкм/об.дет круг 99BA 90 M 19 V обеспечивает заметное снижение температуры детали во всем исследованном скоростном диапазоне $v_{кр}$ от 35 до 96 м/с.

Отмечается также тенденция к уменьшению удельной производительности шлифования на тех режимах обработки, где измерялся износ инструмента. На форсированном режиме шлифования для всех кругов CE-St имело место устойчивое снижение высоты микронеровностей на обработанной поверхности с увеличением скорости круга.

Если сравнить результаты шлифования высокопористыми кругами CE-St с другими кругами, представленными, например, на рис. 8.21 и 8.22, то можно выделить круг с характеристикой 99BA 90 N 14 V. По значениям температуры детали, удельной производительности и шероховатости обработанной поверхности он практически идентичен лучшим кругам RW, RW-St и Reik.

В результате сравнительного анализа представленных шлифовальных кругов по всем выходным параметрам процесса сухого шлифования можно отметить круг RW-St с характеристикой 49A 90 I 14 V.

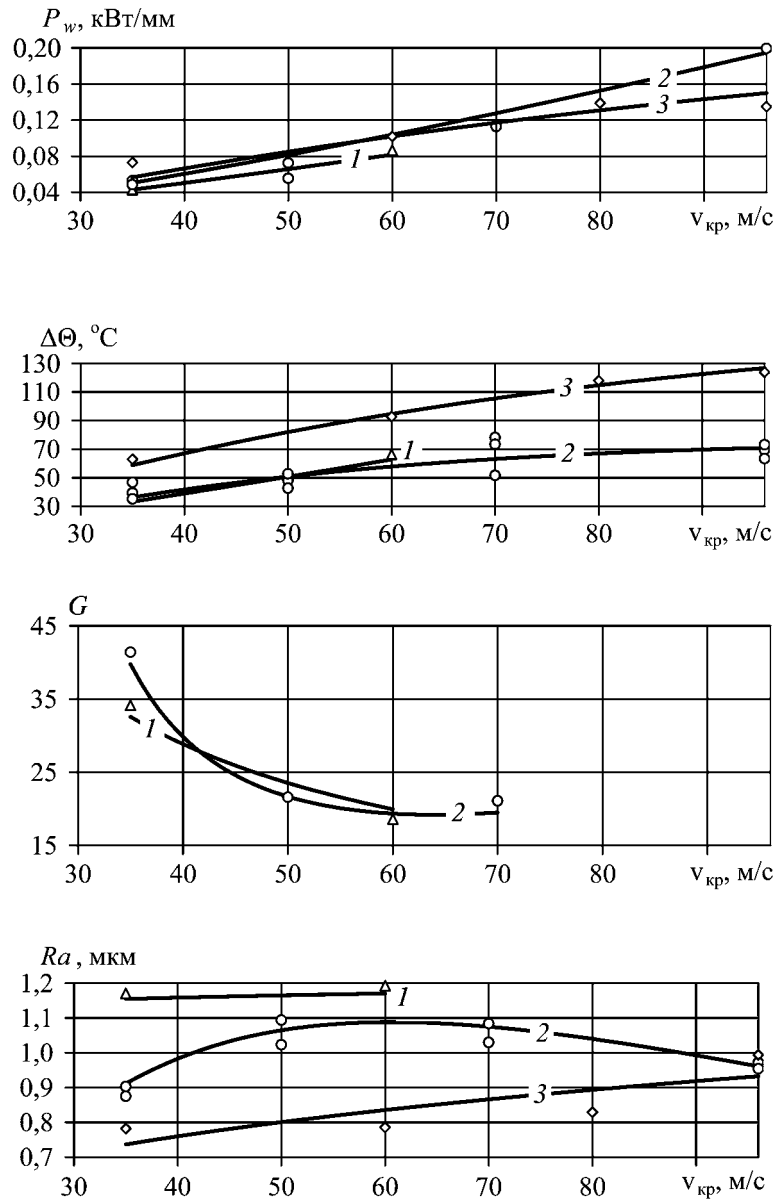


Рис. 8.23. Сравнительный анализ влияния скорости кругов CE-St на характеристики процесса сухого шлифования при $q = 60$, $t = 1$ мкм/об.дет:
1 – 99BA 90 M 14 V; 2 – 99BA 90 N 14 V; 3 – 99BA 90 M 19 V

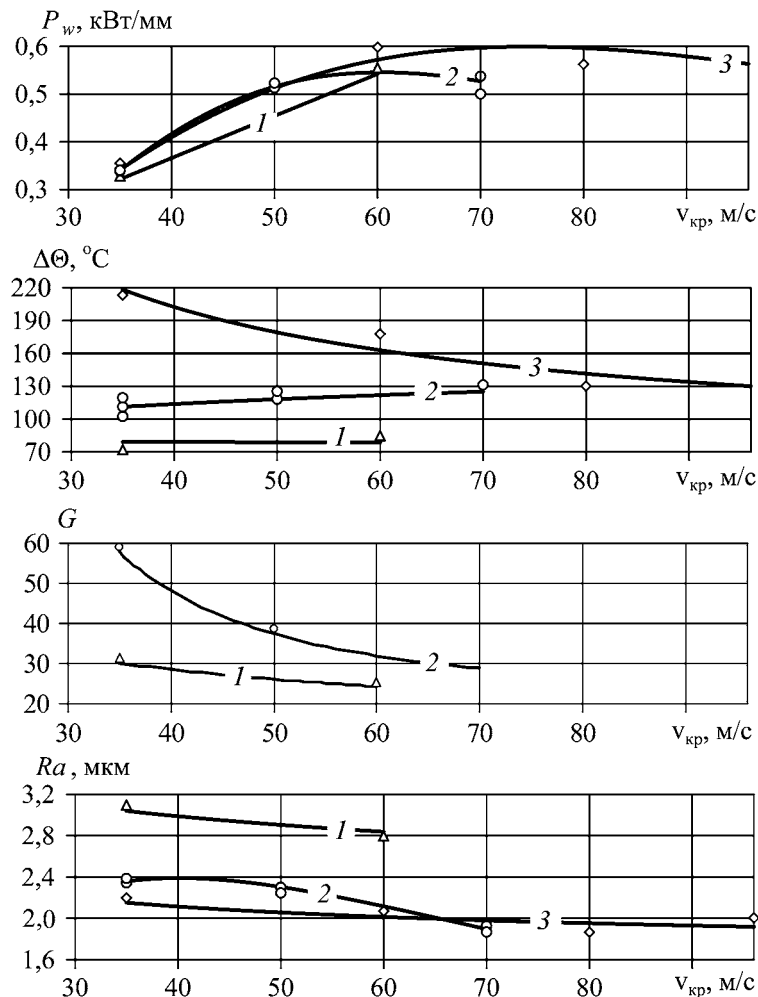


Рис. 8.24. Сравнительный анализ влияния скорости кругов CE-St на характеристики процесса сухого шлифования при $q = 20$, $t = 5$ мкм/об.дет:
1 – 99BA 90 M 14 V; 2 – 99BA 90 N 14 V; 3 – 99BA 90 M 19 V

Этот шлифовальный круг обеспечивает достаточно эффективное шлифование без применения смазочно-охлаждающих сред на скорости от 35 до 90 м/с (его предельная рабочая скорость – 102 м/с), дает дополнительное повышение производительности на 12,5 % за счет увеличения скорости круга с 80 до 90 м/с; на форсирован-

ном режиме обработки с удельной производительностью круга $G \approx 30$ и параметром шероховатости обработанной поверхности $Ra \approx 2,5$ мкм процесс протекает при незначительном нагреве детали – до 65,7 °C.

В целом же, после обобщения экспериментальных данных по сухому шлифо-

8.7. Рекомендации по применению шлифовального круга в зависимости от скорости шлифования

Скорость круга $v_{кр}$, м/с	Плотность γ , г/см ³	Твердость, $\frac{Grado}{индекс}$
60...80	1,8...1,9	$\frac{40...50}{BM2...M1}$
80...100	1,7...1,8	$\frac{40...50}{BM2...M1}$
100...120	1,6...1,7	$\frac{30...37}{M2...CM1}$

ванию абразивными кругами различных характеристик можно дать рекомендации по их назначению в зависимости от скоростного режима шлифования.

Рекомендуется применять для высокопроизводительного шлифования без использования смазочно-охлаждающих средств высокопористые абразивные круги на керамических связках, у которых плотность и твердость должны соответствовать определенному скоростному режиму обработки в соответствии с табл. 8.7.

Размер абразивных зерен в шлифовальном круге определяется требованиями по производительности процесса и шероховатости обработанной поверхности детали.

8.6. ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА СУХОГО ШЛИФОВАНИЯ НА ВЫХОДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЦЕССА И ИХ СТАБИЛЬНОСТЬ

При анализе работоспособности шлифовальных кругов различных характеристик были установлены закономерности процесса сухого шлифования при изменении эксплуатационных свойств инструмента, скорости круга, отношения q и глубины обработки.

В данном разделе рассмотрены общие закономерности процесса сухого

шлифования по изменению его основных выходных характеристик в зависимости от параметров режима обработки.

Общие закономерности процесса сухого шлифования. Закономерности шлифования без применения смазочно-охлаждающих средств определяются величиной и характером изменения выходных характеристик процесса: мощности, силы резания, удельной энергоемкости, износостойкости инструмента, температуры детали и шероховатости ее обработанной поверхности и т.д. – в зависимости от изменения параметров режима обработки и характеристики шлифовального круга.

Экспериментально установлено, что характеристика шлифовального круга оказывает решающее влияние на процесс сухого шлифования и, прежде всего, на интенсивность теплообразования и значения других исследованных характеристик P_w , G и Ra . Но при этом характер изменения выходных характеристик от изменения параметров режима шлифования, как правило, сохраняется одинаковым.

На рис. 8.25 и 8.26 показано изменение основных выходных характеристик процесса сухого шлифования высокопористыми кругами различных характеристик в зависимости от скорости круга $v_{кр}$, отношения q и глубины обработки t .

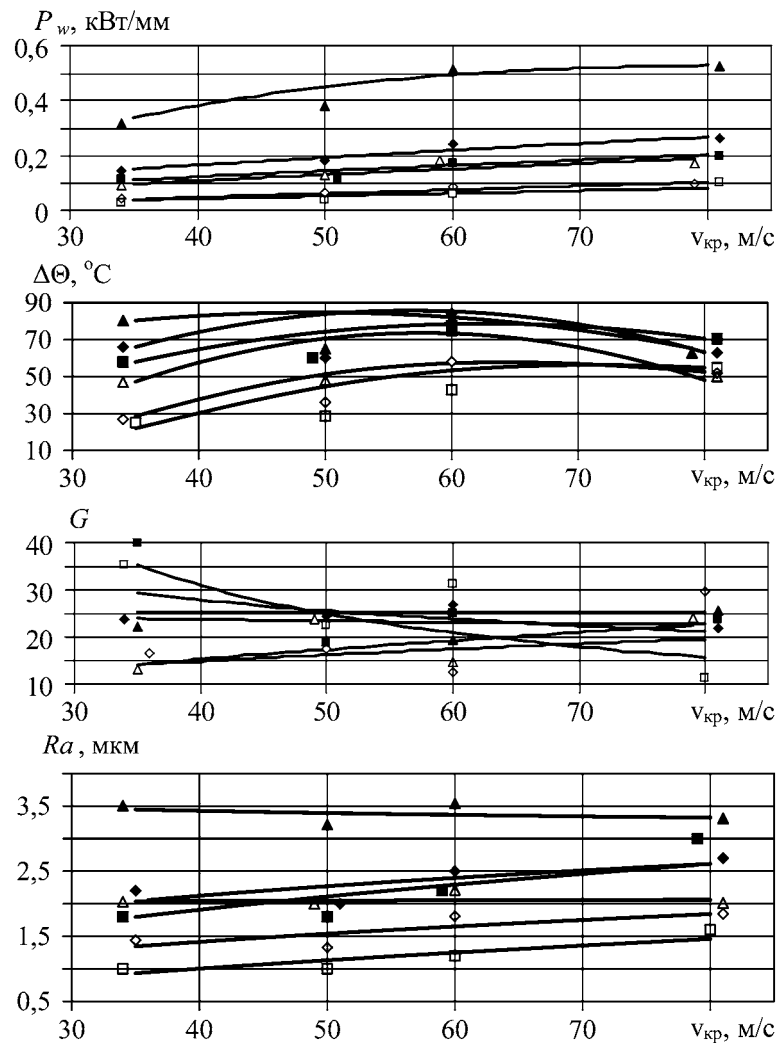


Рис. 8.25. Влияние скорости круга 85A 46 L15 VB MF 901 WS-Z (SG) на характеристики процесса сухого шлифования при различных значениях q и t :
 Δ – $q = 20$, $t = 1$ мкм/об.дет; $\diamond$ – $q = 60$, $t = 1$ мкм/об.дет; $\square$ – $q = 100$, $t = 1$ мкм/об.дет;
 $\blacktriangle$ – $q = 20$, $t = 5$ мкм/об.дет; $\blacklozenge$ – $q = 60$, $t = 5$ мкм/об.дет; $\blacksquare$ – $q = 100$, $t = 5$ мкм/об.дет

Шлифовальным кругом RW с характеристикой 85A 46 L 15 VB (см. табл. 8.1, п. 16) был исследован диапазон по скорости шлифования от 35 до 80 м/с, по величине q от 100 до 20 с глубиной обработки 1 и 5 мкм/об.дет. При шлифовании кругом SE-St с характеристикой 99BA 90 M 19 V (см. табл. 8.1, п. 27) исследованный диа-

пазон по скорости круга с 35 м/с увеличился до 96 м/с, а по q составил 60 и 20 с глубиной обработки 1 и 5 мкм/об.дет. Удельная производительность G во втором случае не представлена.

Исследуемые шлифовальные круги существенно отличаются своими характеристиками: по материалу абразива (мик-

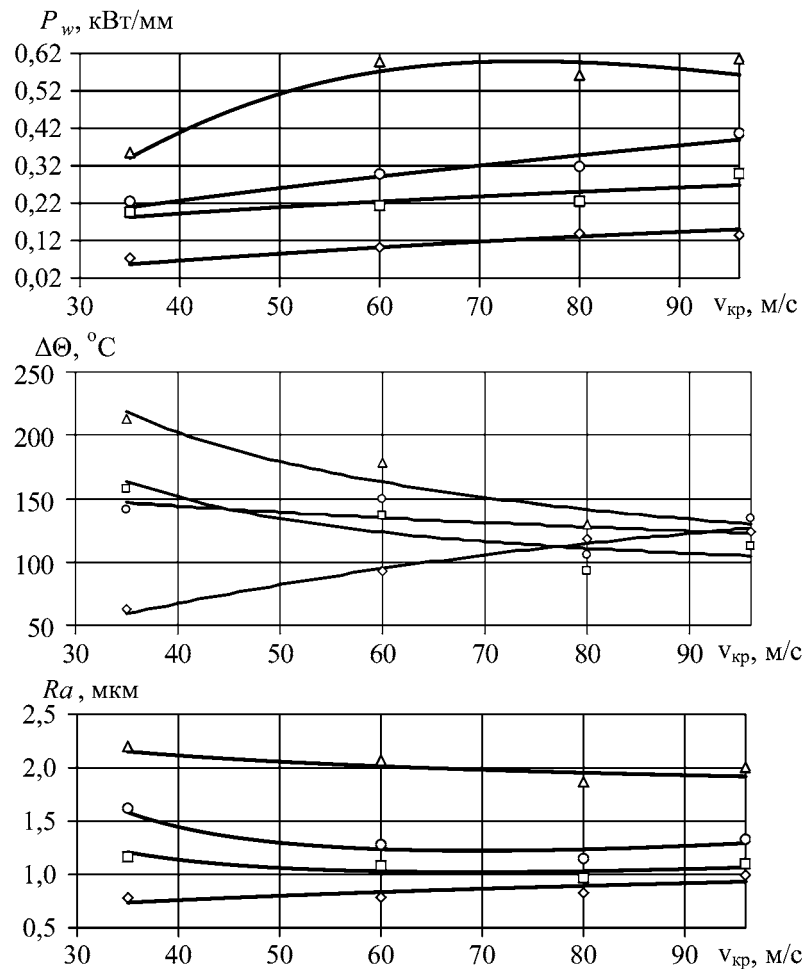


Рис. 8.26. Влияние скорости круга 99ВА 90 М 19 V на характеристики процесса сухого шлифования при различных значениях q и t :

$\diamond - q = 60, t = 1$ мкм/об.дет; $\square - q = 20, t = 1$ мкм/об.дет; $\circ - q = 60, t = 5$ мкм/об.дет;
 $\Delta - q = 20, t = 5$ мкм/об.дет

рокристаллический корунд SG и электрокорунд белый), по размеру абразивных зерен (46 и 90), по твердости (L и M), по структуре (15 и 19), составу и свойствам применяемой керамической связки. Указанное различие в эксплуатационных свойствах инструмента является основной причиной наблюдаемых экспериментально различных мощности шлифования, температуры детали и шероховатости ее

обработанной поверхности для одинаковых условий обработки.

Несмотря на заметную разницу при скорости круга 35 м/с значения исследованных выходных характеристик процесса распределены в полном соответствии с нагрузкой на режущие зерна инструмента, величина которой пропорциональна толщине среза и длине контакта шлифовального круга с обрабатываемой деталью.

В этой связи величины P_w , $\Delta\Theta$ и Ra последовательно возрастают при изменении соотношений параметров режима шлифования от $q = 100$, $t = 1$ мкм/об.дет до $q = 20$, $t = 5$ мкм/об.дет.

Независимо от свойств шлифовального круга, форсирование режима обработки приводит к увеличению мощности шлифования P_w и параметра шероховатости обработанной поверхности детали Ra при возрастании скорости круга до 80...96 м/с. При этом наблюдаются общие закономерности: для самого производительного режима шлифования $q = 20$, $t = 5$ мкм/об.дет мощность P_w имеет тенденцию к стабилизации своих значений при увеличении скорости круга, а величина Ra в отличие от других режимов обработки устойчиво снижается.

Изменение износостойкости шлифовального круга (см. рис. 8.25) по значению G в зависимости от соотношений q и t и увеличения скорости шлифования носит достаточно сложный характер. Это обусловлено, как уже отмечалось, работоспособностью зерен на рабочей поверхности при различных условиях их внедрения в обрабатываемый материал при одновременном увеличении скорости резания. С другой стороны, применяемая методика измерения износа шлифовального круга при его профилировании на металлической пластине дает погрешность, которая может исказить результаты эксперимента.

Анализ представленных экспериментальных данных подтверждает сильное влияние характеристики шлифовального круга на тепловой режим шлифования без охлаждения. Существенное различие в характеристиках двух кругов приводит к принципиальному изменению характера нагрева обрабатываемой детали. При шлифовании кругом RW с увеличением его скорости температура детали стабилизируется, а при увеличении нагрузки на режущие зерна, т.е. при уменьшении q и возрастании t , она имеет тенденцию к снижению (см. рис. 8.25). При глубине

обработки $t = 5$ мкм/об.дет и $q = 20$...100 температура поверхности обрабатываемой детали при шлифовании со скоростью 80 м/с становится аналогичной или меньше, чем при обработке на скорости 35 м/с. В этом случае, несмотря на повышение производительности процесса в 2,3 раза и интенсивность нагрева, обусловленную высокой скоростью круга, обеспечивается благоприятный термодинамический режим сухой обработки.

При шлифовании высокопористым кругом CE-St на мягком режиме $q = 60$, $t = 1$ мкм/об.дет с увеличением скорости круга от 35 до 96 м/с температура детали также увеличивается. Но при форсированных режимах шлифования температура обработанной детали снижается во всем исследованном диапазоне скоростей обработки.

Общим для двух представленных кругов является стабилизация температурного режима нагрева обрабатываемой детали: с увеличением скорости шлифования температурный диапазон нагрева детали сужается. Независимо от значений q и t температура детали при скорости круга 80...96 м/с с учетом ее статистического рассеяния становится практически близкой: для круга RW она составляет 48...75 °C, а для круга CE-St – 113...151 °C. Возможно, что при дальнейшем увеличении скорости круга это различие в температурах также будет уменьшаться.

В данной работе процесс шлифования исследуется при изменении скорости круга, сохраняя при этом постоянными значения q и t . В этой связи представляет интерес характер влияния скорости сухого шлифования на его динамику. На рис. 8.27 представлены результаты статистического обобщения экспериментальных данных одновременно по трем динамическим характеристикам: мощности P_w , тангенциальной составляющей силы резания P_z и удельной энергоемкости процесса U при увеличении скорости круга 99BA 90 M1 9 V.

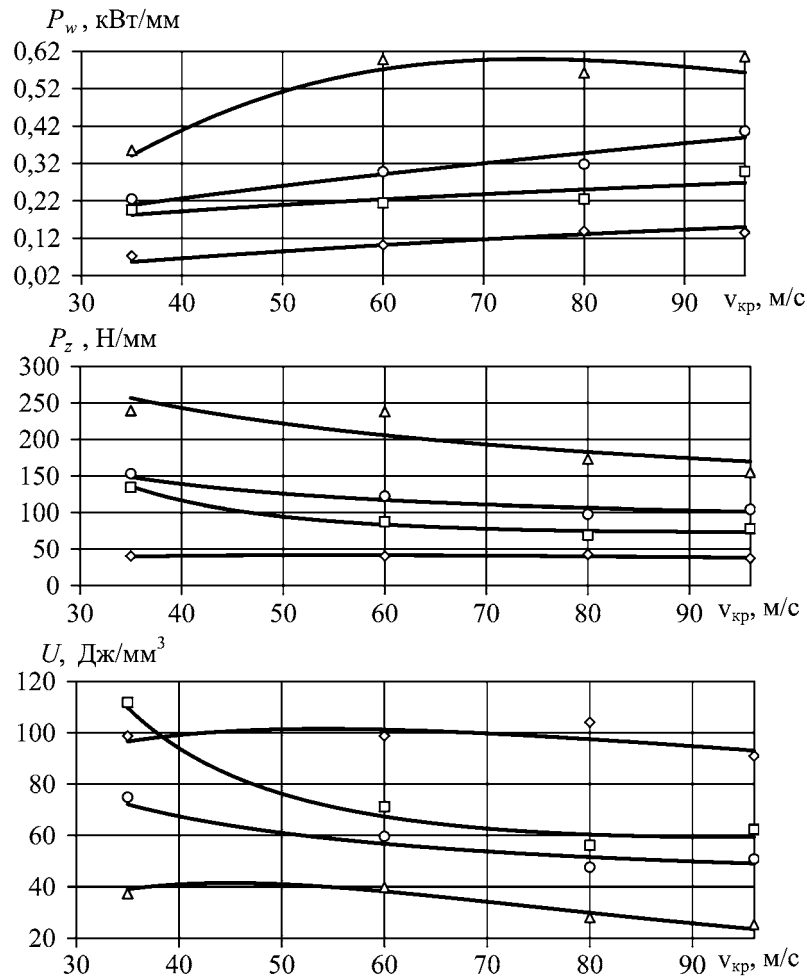


Рис. 8.27. Влияние скорости круга 99ВА 90 М 19 V на характеристики процесса сухого шлифования при различных значениях q и t :

$\diamond$ — $q = 60, t = 1$ мкм/об.дет; $\square$ — $q = 20, t = 1$ мкм/об.дет; $\circ$ — $q = 60, t = 5$ мкм/об.дет;
 Δ — $q = 20, t = 5$ мкм/об.дет

В соответствии с расчетными формулами (8.14), (8.16) и (8.17) указанные динамические характеристики взаимосвязаны между собой, но отражают различные стороны процесса съема материала. С увеличением скорости шлифования мощность процесса также возрастает, так как ее значение пропорционально скорости круга и тангенциальной составляющей силы резания. Однако сама составляющая

P_z пропорциональна при прочих равных условиях толщине срезаемой стружки, которая, в свою очередь, при постоянных значениях q и t сохраняется также постоянной.

В реальных условиях высокоскоростного сухого шлифования значение тангенциальной составляющей силы резания P_z остается постоянным во всем диапазоне скоростей от 35 до 96 м/с только при

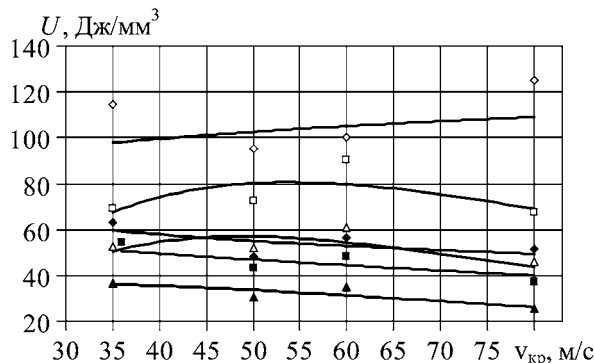


Рис. 8.28. Влияние скорости круга 85A 46 L 15 VB MF 901 WS-Z (SG) на удельную энергоёмкость сухого шлифования при различных значениях q и t :
 Δ – $q = 20, t = 1$ мкм/об.дет; $\square$ – $q = 60, t = 1$ мкм/об.дет; $\diamond$ – $q = 100, t = 1$ мкм/об.дет;
 $\blacktriangle$ – $q = 20, t = 5$ мкм/об.дет; $\blacksquare$ – $q = 60, t = 5$ мкм/об.дет; $\blacklozenge$ – $q = 100, t = 5$ мкм/об.дет

$q = 60$ и $t = 1$ мкм/об.дет. В других случаях при более форсированных режимах обработки ее значение с увеличением скорости резания уменьшается. Аналогичным образом изменяется и значение удельной энергоёмкости процесса U от скорости круга.

Для других шлифовальных кругов, отличных по своим характеристикам от рассматриваемого круга CE-St, характер изменения удельной энергоёмкости процесса от скорости шлифования также

имеет аналогичный характер (рис. 8.28, 8.29). При шлифовании кругом 85A 46 L 15 VB (табл. 8.1, п. 16) и 49A 90 I 14 V (табл. 8.1, п. 22) на режимах $q = 60 \dots 100, t = 1$ мкм/об.дет удельная энергоёмкость процесса U либо возрастает, либо остается практически неизменной при увеличении скорости обработки. С повышением производительности съема материала ее величина так же, как и в предыдущем примере, снижается.

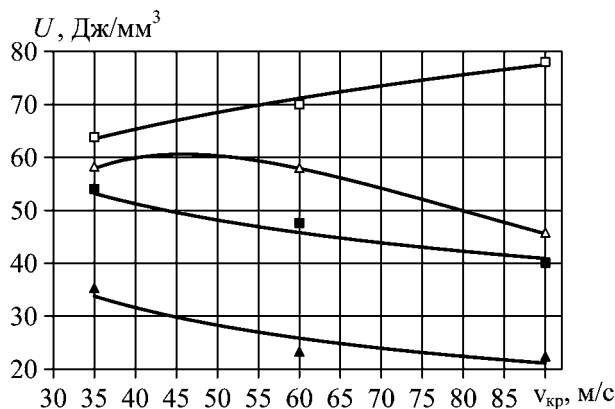


Рис. 8.29. Влияние скорости круга 49A 90 I 14 V на удельную энергоёмкость сухого шлифования при различных значениях q и t :
 Δ – $q = 20, t = 1$ мкм/об.дет; $\square$ – $q = 60, t = 1$ мкм/об.дет; $\blacktriangle$ – $q = 20, t = 5$ мкм/об.дет;
 $\blacksquare$ – $q = 60, t = 5$ мкм/об.дет

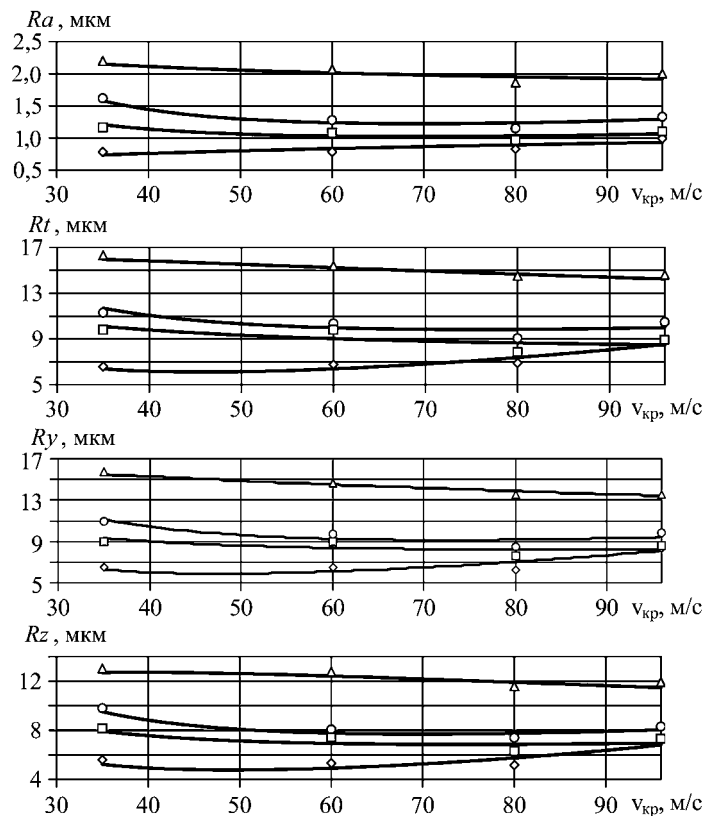


Рис. 8.30. Влияние скорости круга 99ВА 90 М 19 V на характеристики шероховатости обработанной поверхности детали при различных значениях q и t :

$\diamond$ – $q = 60, t = 1$ мкм/об.дет; $\square$ – $q = 20, t = 1$ мкм/об.дет; $\circ$ – $q = 60, t = 5$ мкм/об.дет;
 Δ – $q = 20, t = 5$ мкм/об.дет

Уменьшение тангенциальной составляющей силы резания и удельной энергоемкости процесса при постоянной толщине срезаемой стружки свидетельствует о том, что с увеличением скорости шлифования снижается сопротивление обрабатываемого материала резанию. Фактическая нагрузка на режущие абразивные зерна при высокоскоростном шлифовании уменьшается вследствие разупрочнения материала детали из-за интенсивного нагрева его удаляемых микрообъемов [15, 16, 17, 31]. Одновременно с термическим фактором при повышении скорости обработки и соответственно скорости деформации начинает все сильнее проявляться

физический эффект снижения сопротивления резанию, обусловленный переходом от пластичного разрушения с большим объемом предшествующей пластической деформации к квазихрупкому разрушению, при котором затраты на деформацию существенно уменьшаются.

На рис. 8.30 показано изменение 4 исследованных параметров шероховатости обработанной поверхности детали Ra , Rt , Ry и Rz , которые одновременно оценивались с помощью профилометра после шлифования кругом 99ВА 90 М 19 V на различных режимах обработки. Изменение всех характеристик шероховатости

поверхности от условий шлифования имеет одинаковый характер, что связано с тем, что указанные характеристики, по существу, отражают различные оценки только высоты микронеровностей на обработанной поверхности детали.

Повышение скорости круга при постоянной производительности шлифования. Исследования процесса шлифования без охлаждения выполнялись при условии, когда повышение скорости круга осуществлялось при постоянных значениях параметров q и t . Соответственно производительность обработки возрастала пропорционально скорости шлифования (8.13), и характер изменения выходных характеристик процесса связан, таким образом, не только с увеличением скорости вращения круга, но и с увеличением скорости съема материала.

Был поставлен специальный эксперимент, во время которого при изменении скорости круга от 24 до 96 м/с расчетная скорость съема материала оставалась постоянной и равной $3 \text{ мм}^3/(\text{мм} \cdot \text{с})$. Постоянство значения Q_w обеспечивалось при постоянном значении $q = 60$ соответствующим уменьшением глубины обработки t от 7,24 до 1,87 мкм/об.дет при увеличении скорости шлифования от 24 до 96 м/с. Обработка выполнялась шлифованием высокопористым кругом CE-St с характеристикой 99BA 90 M 19 V.

Статистически обработанные данные эксперимента представлены на рис. 8.31. При увеличении скорости круга от 80 до 96 м/с или в 1,2 раза было отмечено незначительное уменьшение мощности процесса на 8 % и температуры детали на 9,5 %. Однако сглаживание экспериментальных данных методом наименьших квадратов нелинейной логарифмической моделью с квадратичным членом $\ln^2 v_{\text{кр}}$ показало, что указанное изменение P_w и $\Delta\Theta$ является статистически незначительным. Представленные графически на рис. 8.31 математические модели связи $P_w(v_{\text{кр}})$ и $\Delta\Theta(v_{\text{кр}})$ в виде парабол адекватно ото-

бражают опытные данные (значения КМК, например, для этих моделей составляют соответственно 0,588 и 0,883).

При постоянной производительности шлифования с увеличением скорости круга возрастает мощность процесса, но ее возрастание на 22,5 % непропорционально увеличению скорости круга в 4 раза. Это объясняется тем, что при увеличении скорости шлифования в указанном диапазоне одновременно уменьшается тангенциальная составляющая силы резания почти в 3,3 раза. Такое снижение величины P_z можно было бы связать с уменьшением толщины среза. Однако для условий эксперимента расчетная толщина среза уменьшается только в 2 раза и, следовательно, наблюдаемое снижение P_z объясняется влиянием дополнительного эффекта разупрочнения удаляемого материала при высоких скоростях шлифования.

Аналогично по величине и характеру зависимости мощности процесса и силы резания с увеличением скорости круга возрастает температура обрабатываемой детали, которая имеет тенденцию к стабилизации своих значений.

Положительный эффект был установлен при анализе шероховатости обработанной поверхности детали: с увеличением скорости круга значение Ra уменьшается, и ее снижение в данном эксперименте составило с 1,24 до 0,85 мкм, или на 48 %, что связано с уменьшением глубины обработки.

В целом же результаты проведенного исследования по влиянию скорости круга на выходные характеристики процесса шлифования при постоянной производительности по съему материала дают основание считать, что повышение скорости круга при сохранении постоянной производительности шлифования целесообразно только для уменьшения шероховатости обработанной поверхности детали. Но при этом увеличивается ее нагрев и энергетические затраты на процесс съема материала и соответственно возрастает вероятность появления термических повреждений поверхностного слоя обрабатываемой детали.

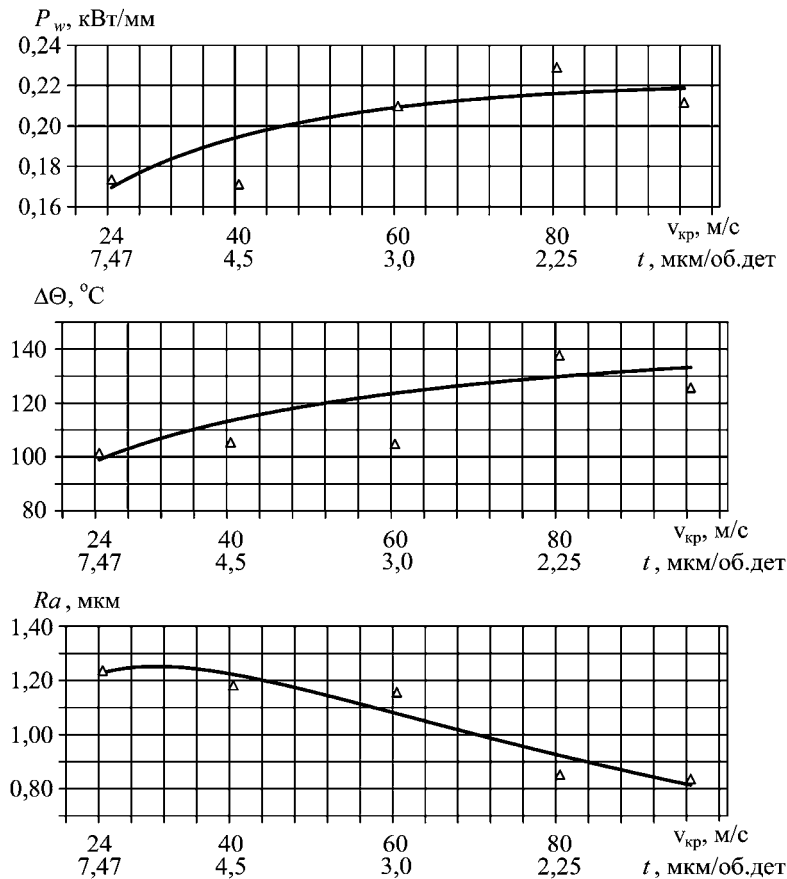


Рис. 8.31. Влияние различных комбинаций скорости круга 99ВА 90 М 19 V и глубины шлифования на характеристики сухого шлифования при постоянных производительности обработки $Q_w = 3 \text{ мм}^3/(\text{мм} \cdot \text{с})$ и скоростном отношении $q = 60$

Стабильность процесса сухого шлифования. Процесс шлифования является результатом массового микрорезания абразивными зернами при их перемещении относительно обрабатываемой поверхности и имеет в этой связи ярко выраженную стохастическую природу. Вероятностный характер процесса обусловлен разнообразием форм, размеров и режущих свойств абразивных зерен и их случайным распределением на рабочей поверхности шлифовального круга, а также колебаниями твердости в его объеме и соответственно прочности удержания зерен связкой при резании.

Отмеченные свойства составляющих элементов шлифовального круга определяют и стохастическую природу съема материала вследствие формирования срезов различной формы и размеров, их наложения друг на друга, непрерывно изменяющегося количества режущих и упрочняющих зерен и их соотношения, изменения режущих свойств зерен во времени и т.д. Это создает неоднородный температурно-силовой режим в микрообъемах зоны шлифования, изменяющейся во времени и в зоне обработки.

При шлифовании без применения смазочно-охлаждающих средств в экстре-

мальных условиях высокоскоростного взаимодействия абразивных зерен и обрабатываемого материала указанные явления обостряются, что становится дополнительным фактором дестабилизации процесса и рассеяния его выходных характеристик – мощности шлифования, силы резания, износа инструмента, нагрева детали и качества ее обработки. Кроме того, тепловое расширение обрабатываемой заготовки при отсутствии охлаждения приводит к увеличению фактической глубины резания и соответственно к возрастанию нагрузки на шлифовальный круг.

В этой связи при исследовании характера протекания сухого шлифования в зависимости от свойств шлифовального круга и режима обработки по средним значениям выходных характеристик процесса P_w , $\Delta\Theta$, G и Ra анализировалось также и их рассеяние по величине среднеквадратичным отклонениям σ_{P_w} , $\sigma_{\Delta\Theta}$, σ_G и σ_{Ra} .

Характер изменения стабильности исследованных характеристик сухого шлифования от его скорости и значений q и t показан на рис. 8.32 и 8.33. Для шлифовального круга RW-St с характеристикой 49A 90 I 14 V на представленных рисунках приведены одновременно экспериментальные данные и математические модели связи для средних значений и среднеквадратичных отклонений.

В целом увеличение скорости круга от 35 до 90 м/с обеспечивает более стабильный процесс шлифования как для мягких режимов обработки (рис. 8.32), так и для более форсированного шлифования (рис. 8.33). В этой связи наблюдаемое увеличение среднеквадратичных отклонений мощности шлифования при увеличении скорости круга и изменении значений q и t , по-видимому, можно объяснить динамической нестабильностью электропривода шпинделя шлифовального станка при высоких скоростях вращения.

Рассеяние температуры детали $\Delta\Theta$ и износа шлифовального круга G с повы-

шением скорости круга уменьшается независимо от того, увеличивается или уменьшается его среднее значение. Также во всех случаях уменьшается и среднеквадратичное отклонение характеристики шероховатости обработанной поверхности детали Ra вместе с уменьшением ее средней величины при увеличении скорости круга.

На стабильность процесса сухого шлифования влияют не только параметры режима обработки, но и характеристика шлифовального круга. В табл. 8.8 представлены результаты статистического обобщения результатов шлифования высокопористыми кругами RW-St в зависимости от их плотности γ и твердости H (по *Grado*), и параметров режима обработки $v_{кр}$, q и t .

Из корреляционного анализа следует, что по значениям коэффициентов парной корреляции влияние характеристики инструмента на стабильность процесса шлифования оказывается статистически более значительным, чем влияние параметров режима обработки.

Разработанные математические модели для среднеквадратичных отклонений выходных характеристик сухого шлифования дают возможность прогнозировать и управлять стабильностью процесса, выбором оптимальных характеристик инструмента и параметров режима обработки. Например, для уменьшения рассеяния температуры нагрева детали целесообразно уменьшать плотность круга (т.е. назначать инструмент с высокими номерами структуры) и снижать его твердость, но с повышением скорости шлифования необходимо повышать и твердость шлифовального круга. Для получения обработанной поверхности детали с минимальным рассеянием Ra целесообразно также использовать круги с минимальной плотностью, но с повышенной твердостью, которая должна уменьшаться при увеличении скорости шлифования.

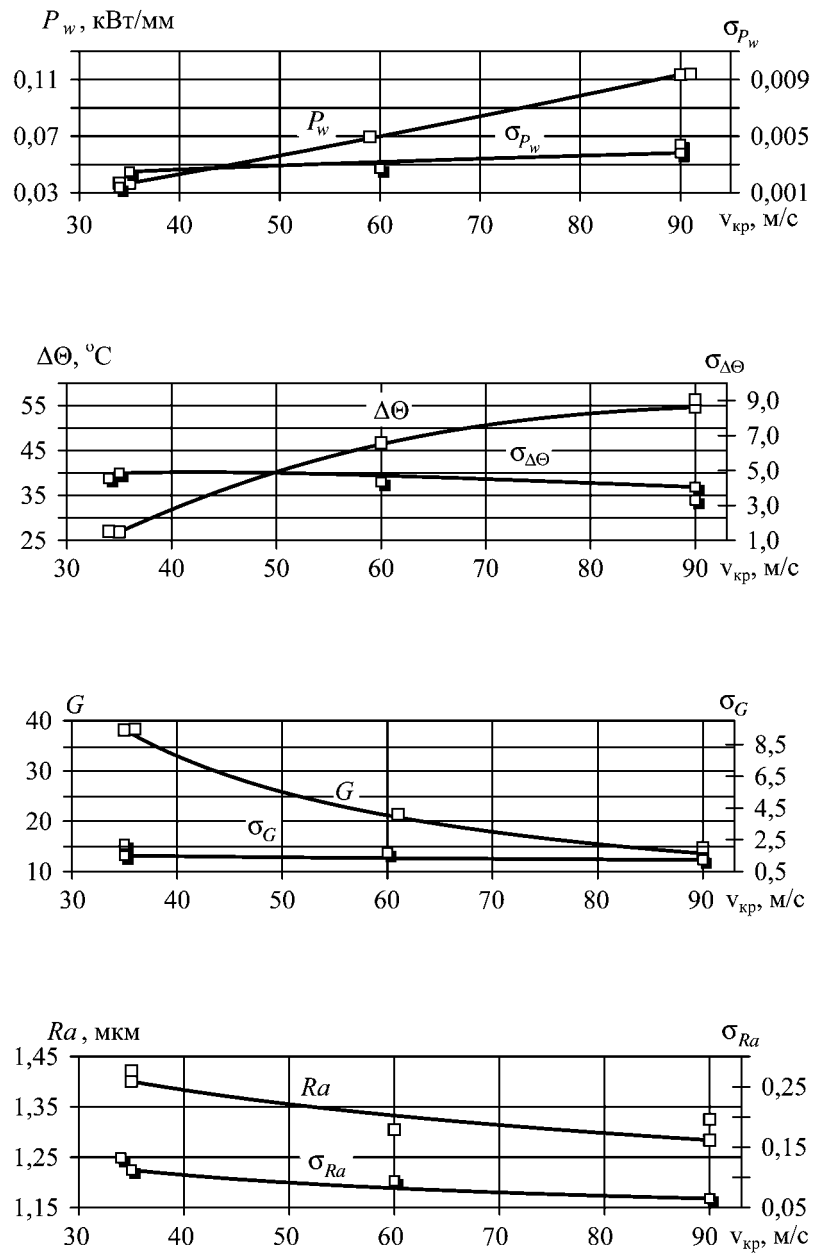


Рис. 8.32. Влияние скорости круга 49А 90 I 14 V на характеристики процесса сухого шлифования и их стабильность при $q = 60$, $t = 1$ мкм/об.дет

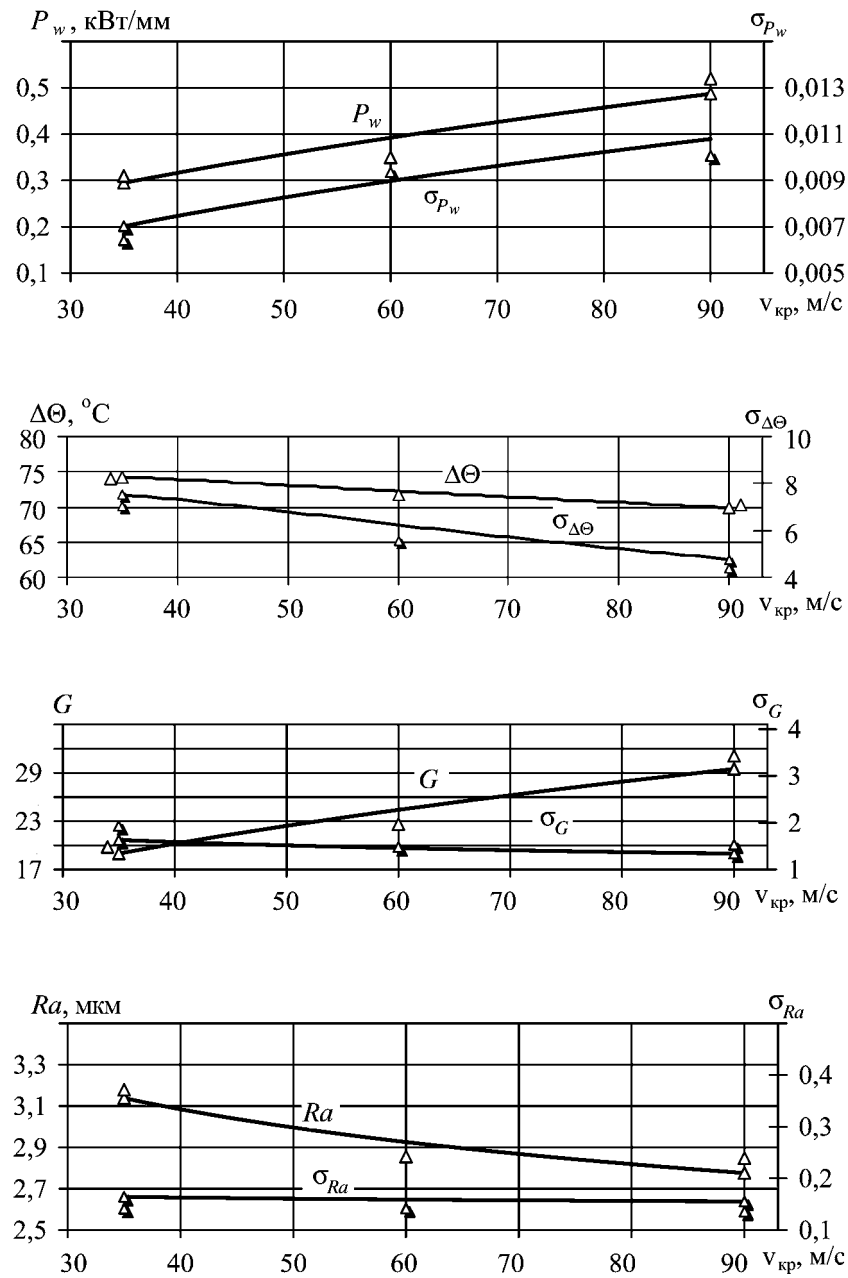


Рис. 8.33. Влияние скорости круга 49А 90 I 14 V на характеристики процесса сухого шлифования и их стабильность при $q = 20$, $t = 5$ мкм/об.дет

8.8. Обобщенные математические модели стабильности выходных параметров
сухого шлифования для кругов RW-St

Математические модели связи	Коэффициенты парной корреляции					Оценка адекватности		
	γ	H	$v_{кр}$	q	t	КМК	ОД	F-отн.
$\ln \sigma_P = 26,555 \ln \gamma + 7,012 \ln H + 0,454 \ln v_{кр} -$ $- 0,211 \ln q + 0,503 \ln t - 48,549$	0,361	-0,150	0,074	-0,078	0,397	0,709	0,547	8,102
$\ln \sigma_{\Delta\Phi} = 24,340 + 7,850 \ln \gamma - 7,835 \ln H - 5,872 \ln v_{кр} - 0,995 \ln q +$ $+ 0,239 \ln t - 0,338 \ln^2 v_{кр} + 2,026 \ln H \ln v_{кр} + 0,266 \ln v_{кр} \ln q$	0,522	-0,456	0,001	0,069	0,266	0,615	0,740	2,812
$\ln \sigma_G = 8,958 \ln \gamma - 7,012 \ln H - 0,059 \ln v_{кр} + 0,148 \ln q +$ $+ 0,282 \ln t - 5,209$	0,608	-0,498	-0,021	0,076	0,215	0,546	0,806	2,129
$\ln \sigma_{Ra} = 29,713 \ln \gamma + 29,240 \ln H + 20,606 \ln v_{кр} + 1,126 \ln q -$ $- 0,147 \ln t - 5,329 \ln H \ln v_{кр} - 0,475 \ln v_{кр} \ln q - 128,753$	0,183	0,149	-0,259	-0,349	-0,103	0,728	0,588	3,859

8.7. ТЕРМОДИНАМИКА ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ШЛИФОВАНИЯ БЕЗ ПРИМЕНЕНИЯ СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СРЕД

Как показывает практика и подтверждают проведенные экспериментальные исследования, тепловой фактор процесса шлифования является его важнейшим регламентирующим ограничением по производительности, экономичности и качеству обработки.

Основными параметрами теплового процесса являются интенсивность теплового потока, скорость и время действия теплового источника, которые, в свою очередь, определяют скорости нагрева и охлаждения. Именно эти процессы, как показано в работе [21], вместе с температурой нагрева ответственны за структурно-фазовые превращения и термические повреждения в поверхностном слое обрабатываемой детали. Специфическим образом проявляются тепловые процессы, особенно при высоких скоростях шлифования, на условиях работы каждого абразивного зерна на рабочей поверхности инструмента: вместе с увеличением скорости нагрева и охлаждения, увеличиваются скорости и число циклов нагружения режущих кромок, максимальные контактные температуры, уменьшается длительность теплового и силового воздействия на режущие зерна.

По результатам экспериментальных исследований с использованием теоретических представлений о теплофизике шлифования, изложенных в работах [13, 21, 57, 115, 125], можно процесс шлифования без внешнего принудительного охлаждения представить в виде следующей термодинамической модели. В рамках этой модели шлифование рассматривается как макропроцесс формирования теплового потока и его перераспределения в технологической системе шлифовальный круг–обрабатываемая деталь–удаляемая стружка – окружающая среда.

Термодинамика процесса шлифования определяется множеством различных факторов, основными из которых являются интенсивность теплового потока, вводимого в поверхностный слой через площадку контакта шлифовального круга с обрабатываемой деталью, теплофизические свойства круга и детали, условия теплообмена с окружающей средой и т.д.

Источником тепла при шлифовании является высокоскоростное взаимодействие абразивных зерен инструмента с обрабатываемым материалом, удаляемый объем которого пластически деформируется и разрушается на отдельные стружки, а поверхностный слой детали подвергается пластической деформации. Эти процессы дополнительно сопровождаются трением абразивных зерен, находящихся в контакте круга с деталью, с обрабатываемым материалом, интенсивность которого в условиях сухого шлифования больше, чем при обработке с применением смазочно-охлаждающих средств: например, коэффициент сухого трения скольжения корунда по стали на 25 % больше, чем при трении со смазкой.

Каждое отдельное абразивное зерно при своем взаимодействии с деталью создает мгновенный тепловой импульс, температура которого может достигать температуры плавления обрабатываемого материала. Интенсивность отдельных тепловых импульсов зависит от размеров абразивных зерен, глубины их вдавливания и скорости перемещения. Суммарное наложение тепловых импульсов – их суперпозиция на площадке контакта, интенсивность и количество которых зависят от характеристики шлифовального круга, свойств обрабатываемого материала и режима обработки, приводит к усредненной температуре шлифуемой поверхности, которая может достигать 1000 °С и более [93]. Эта максимальная контактная температура нагрева являлась следствием характера и интенсивности взаимодействия в зоне контакта шлифовального круга с обрабатываемой деталью, практически

не зависит от наличия теплообмена на границе с окружающей средой. Ее величина, по мнению автора работы [21], не может являться достаточно объективным критерием оценки структурных превращений в поверхностном слое обрабатываемой детали. Прогнозировать их появление невозможно без учета скоростей нагрева и охлаждения, связанных с условиями теплообмена в технологической системе шлифования.

Контактная температура определяется интенсивностью теплового потока, который формируется в зоне резания на площадке контакта S , пропорциональной ширине круга и длине его контакта с обрабатываемой деталью (см. формулу (7.36)).

При постоянных в данном исследовании соотношениях диаметров круга и детали интенсивность теплового потока будет пропорциональна мощности процесса P_w , отнесенной к 1 мм ширины круга, и обратно пропорциональна величине $\sqrt{t}$. Во всех случаях проведения экспериментов как мощность процесса, так и ее величина, приведенная к глубине обработки $\sqrt{t}$ в качестве критерия интенсивности теплообразования, увеличивалась при повышении скорости и глубины шлифования и уменьшении скоростного отношения q . Однако контактная температура в зоне резания определяется, кроме интенсивности теплового потока, также скоростью перемещения теплового источника и временем нагрева.

Тепловой источник при шлифовании формируется в объемной зоне резания, где происходят одновременно процессы упругопластической деформации, диспергирования и трения, энергия которых преобразуется в тепло. Этот источник перемещается вдоль обрабатываемой поверхности со скоростью вращения детали v_d и удаляется из зоны резания в виде стружки через время L_k/v_d , в течение которого происходит нагрев микрообъемов обрабатываемого материала. В момент контактиро-

вания этих микрообъемов с рабочей поверхностью круга образующийся тепловой поток устремляется в контактирующие тела – инструмент и обрабатываемую деталь. В шлифовальный круг из-за его малой теплопроводности переходит небольшая доля тепла, а большая его часть идет на нагрев детали, в основном ее менее нагретых объемов, т.е. в направлении, обратном ее вращению. В последующие моменты времени происходит теплопередача в окружающую среду.

По рассматриваемой модели тепловой поток распространяется в обрабатываемой детали перед шлифовальным кругом, нагревая весь ее объем, в том числе поверхностный слой, который в последующем удаляется. Скорость нагрева зависит от разницы температур теплового источника и нагреваемого объема, но ее предельная величина не может быть больше скорости распространения фотонов или скорости звука в конкретной среде, т.е. обрабатываемом материале. А так как скорость распространения тепла суть величина конечная, а скорость движения теплового источника может увеличиваться, то при соотношении их скоростей может создаться ситуация, при которой нагрев будет локализован вблизи действия теплового источника.

В общем же случае можно утверждать, что при увеличении скорости вращения детали как скорости теплового источника снижается интенсивность и глубина нагрева обрабатываемого материала. С другой стороны, увеличение скорости вращения детали является фактором ее охлаждения, интенсифицируя теплопередачу от более нагретого тела в более холодную окружающую среду. И, наконец, увеличение скорости вращения детали уменьшает время действия теплового источника, т.е. время нагрева и, как следствие, снижает максимальную контактную температуру при шлифовании.

Через некоторое время шлифования тепловой баланс процесса стабилизируется: скорости нагрева и охлаждения обра-

батываемой детали выравниваются и экспериментально температура ее поверхности фиксируется как установившаяся температура детали.

В исследованиях постоянный объем материала, равный 100 мм^3 на 1 мм ширины круга, удалялся в зависимости от режима шлифования за время от $4,2 \text{ с}$ до $4,8 \text{ мин}$, а приращение температуры поверхности детали за время эксперимента при этом было зарегистрировано пирометром в диапазоне от 25 до $215 \text{ }^\circ\text{C}$. Можно, по-видимому, утверждать, что в исследованном временном интервале кругами различных характеристик установившийся температурный режим шлифования не был достигнут. Это подтверждается тем, что высокие температуры фиксировались, как правило, в экспериментах с небольшой продолжительностью по времени, но с большой скоростью съема материала. При этом сохранялась тенденция к дальнейшему увеличению температуры детали.

В предыдущих разделах работы было подробно рассмотрено влияние различных характеристик шлифовальных кругов при изменении в достаточно широком диапазоне скорости круга, скоростного отношения q и глубины обработки t на приращение температуры детали как выходного параметра сухого шлифования. Теперь необходимо установить, какие определяющие параметры процесса оказывают прямое и наиболее сильное влияние на температуру детали, с помощью которых можно управлять термодинамикой шлифования без охлаждения.

Таковыми параметрами, как показал предварительный анализ, являются сила резания, скорость вращения детали и время нагрева. Сила резания, а точнее ее тангенциальная составляющая P_z , определяет сопротивление резанию обрабатываемого материала для конкретных условий шлифования и в этой связи ее величина прямо влияет по (7.36) на интенсивность теплового потока. Скорость вращения детали

v_d , как показано выше, оказывает комплексное влияние на термодинамику процесса шлифования: ее увеличение, например, приводит к снижению контактной температуры, глубины прогрева поверхностного слоя детали и к повышению скоростей охлаждения.

Время нагрева обрабатываемой детали, равное времени τ , необходимого для удаления в одном опыте 100 мм^3 материала на 1 мм ширины круга, связано с интенсивностью съема, и оно тем меньше, чем больше интенсивность нагрева. Его величина по (8.18) напрямую зависит от скорости детали v_d и глубины обработки t и таким образом τ является комплексным показателем их совместного действия на тепловой режим шлифования.

Ранее был показан (см. рис. 8.27) и описан характер изменения тангенциальной составляющей силы резания P_z от скорости круга 99BA 90 M 19 V при различных соотношениях q и t . При этом имела место определенная корреляция между изменением P_z и приращением температуры детали (см. рис. 8.26) при увеличении скорости шлифования.

На рис. 8.34 представлены результаты измерения температуры и составляющей P_z силы резания и характер их зависимости от скорости шлифования высокопористым кругом другой характеристики 49A 90 I 14 V. Характер изменения P_z при увеличении скорости этого круга оказался одинаковым с предыдущим примером шлифования (см. рис. 8.27), аналогия сохранилась и при изменении исследованных соотношений q и t . Однако корреляции в изменении $P_z(v_{кр})$ и $\Delta\Theta(v_{кр})$ в этом примере шлифования уже не наблюдается. Монотонное уменьшение силы резания в зависимостях $P_z(v_{кр})$ контрастирует с экстремальным характером изменения температуры детали при увеличении скорости шлифовального круга.

Если связать изменение температуры детали с одновременным изменением си-

лы резания через ее тангенциальную составляющую P_z и скорость детали v_d , то характер связи температуры с этими двумя параметрами становится более определенным и наглядным. С этой целью экспериментальные данные по $\Delta\Theta$ были привязаны к экспериментальным значениям P_z и скорости детали, при которой проводился опыт. Значение v_d определялось через скорость круга $v_{кр}$ и отношение q в соответствии с табл. 8.3. Результаты такого обобщения для шлифовальных кругов 85A 46 L 15 V и 49A 90 I 14 V, которые существенно разнятся по своим характеристикам, приведены на рис. 8.35.

Для различных характеристик исследованных абразивных кругов характер изменения температуры детали от ее скорости вращения и силы резания оказывается одинаковым. С увеличением составляющей P_z при одновременном изменении скорости детали v_d температура ее нагрева возрастает, но скорость приращения температуры зависит от значения v_d . При скорости детали от 21 до 60 м/мин приращение $\Delta\Theta$ с увеличением P_z идет существенно быстрее (по характеру наклона соответствующих прямых для различных v_d), чем при более высоких скоростях вращения обрабатываемой детали. На максимальных скоростях v_d от 150 до 270 м/мин, которые были исследованы, интенсивность нарастания температуры при увеличении силы резания заметно снижается.

В табл. 8.9 приведены результаты статистической обработки и математического моделирования температуры детали в зависимости от силы резания и скорости детали для различных скоростей шлифования. Корреляционный анализ показывает, что сила резания оказывает более сильное статистическое влияние на температуру, чем скорость детали. Такое соотношение сохраняется как для обоих шлифовальных кругов, так и для различных скоростей круга. Обращает внимание при этом новая закономерность: с увели-

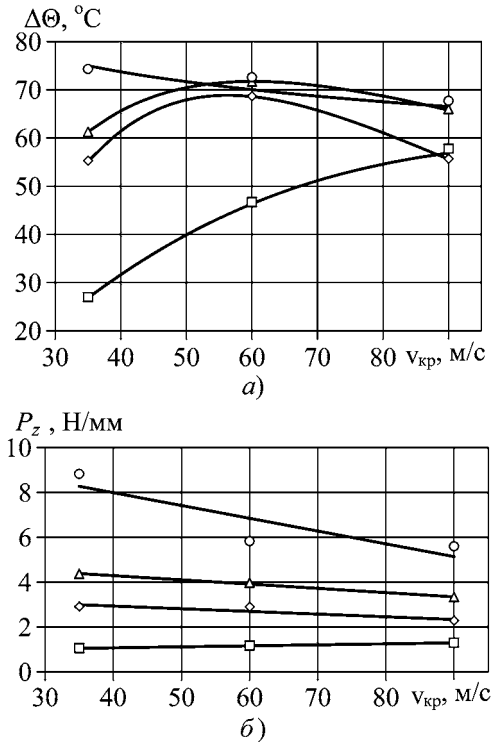


Рис. 8.34. Влияние скорости круга 49A 90 I 14 V на температуру детали (а) и силу резания (б) при сухом шлифовании при различных значениях q и t :
 $\square$ – $q = 60$, $t = 1$ мкм/об.дет; $\diamond$ – $q = 20$, $t = 1$ мкм/об.дет; Δ – $q = 60$, $t = 5$ мкм/об.дет; $\circ$ – $q = 20$, $t = 5$ мкм/об.дет

чением скорости шлифования коэффициенты парной корреляции для силы резания и скорости детали с ее температурой нагрева уменьшаются. Это свидетельствует о том, что в представленных моделях не учтены другие статистически значимые факторы процесса, например, время нагрева и фактор теплообмена с окружающей средой, роль которых при высоких скоростях сухого шлифования возрастает.

Подтверждением такого рассуждения являются данные табл. 8.10, где представлены модели с учетом влияния временного фактора процесса. Из табл. 8.10 видно, что степень влияния (по коэффициенту парной корреляции) времени

8.9. Математические модели связи температуры детали с силой резания со скоростью детали при сухом шлифовании

V _{кр} , м/с	Математические модели связи	Коэффициенты парной корреляции		Оценка адекватности модели		
		P _z	v _d	КМК	ОД	F-отн.
	Шлифовальный круг RW 85A 46 L15 VB MF 901 WS-Z (SG)					
35	ln ΔΘ = 3,469 + 0,617 ln P _z – 0,068 ln v _d	0,970	0,467	0,974	0,063	37,408
50	ln ΔΘ = 4,134 + 0,435 ln P _z – 0,162 ln v _d	0,876	0,337	0,925	0,180	11,851
60	ln ΔΘ = 4,121 + 0,338 ln P _z – 0,057 ln v _d	0,868	0,490	0,876	0,290	6,620
80	ln ΔΘ = 4,615 + 0,231 ln P _z – 0,162 ln v _d	0,619	–0,279	0,965	0,085	27,379
	Шлифовальный круг RW-St 49A 90 I 14 V					
35	ln ΔΘ = 3,157 + 0,460 ln P _z + 0,055 ln v _d	0,965	0,594	0,968	0,096	14,706
60	ln ΔΘ = 3,797 + 0,280 ln P _z + 0,011 ln v _d	0,938	0,535	0,939	0,178	7,432
90	ln ΔΘ = 4,448 + 0,161 ln P _z – 0,098 ln v _d	0,776	–0,137	0,991	0,027	54,920

8.10. Математические модели связи температуры детали с силой резания, скоростью детали и временем сухого шлифования кругом RW 85A 46 L 15 V

$v_{кр}$, м/с	Математические модели связи	Коэффициенты парной корреляции			Оценка адекватности модели		
		P_z	v_d	τ	КМК	ОД	F-отн.
35	$\ln \Delta \Theta = 3,469 + 0,617 \ln P_z - 0,068 \ln v_d$	0,970	0,467	-0,962	0,999	0,0001	11814,6
80	$\ln \Delta \Theta = 4,615 + 0,231 \ln P_z - 0,162 \ln v_d$	0,619	-0,279	-0,538	0,977	0,075	21,097

шлифования на температуру детали аналогична с влиянием скорости ее вращения.

В соответствии с принятой методологией исследования при форсировании режима шлифования время удаления заданного объема материала существенно снижается: при $v_{кр} = 35$ м/с, $q = 60$, $t = 1$ мкм/об.дет $\tau = 172,4$ с, а при $v_{кр} = 96$ м/с, $q = 20$, $t = 5$ мкм/об.дет $\tau = 4,2$ с; в этой связи, несмотря на увеличение мощности шлифования кругом 99BA 90 M 19 V для этих граничных условий обработки от 0,055 до 0,606 кВт/мм, общее количество тепла, которое образуется за это время и распределяется среди элементов технологической системы резания, уменьшается.

Глубина обработки t , как показали исследования, оказывает также существенное влияние на интенсивность нагрева обрабатываемой детали. Величина t напрямую влияет на толщину срезаемой стружки, следовательно, на силу резания. С другой стороны, при увеличении глубины обработки возрастает длина контакта круга с деталью, а это создает предпосылки к уменьшению плотности теплового потока и температуры. Одновременно увеличение длины контакта круга с деталью обуславливает увеличение времени действия теплового источника, что, напротив, приводит к повышению температуры детали. Несмотря на то что часто-

та встречи одного и того же участка обрабатываемой поверхности с кругом равна частоте вращения детали, удельный вес времени циклического нагрева детали за время эксперимента не зависит от ее скорости вращения, а только от длины контакта L_k . Для условий нашего эксперимента доля времени нагрева одного и того же участка поверхности детали будет пропорциональна величине $\sqrt{t}$.

В целом же с увеличением глубины обработки при прочих равных условиях температура обрабатываемой детали возрастает, что иллюстрируется, например, рис. 8.25 и 8.26. При этом, как это видно из рис. 8.27 и 8.34, б, влияние глубины резания на температуру детали проявляется, в основном, через силу резания.

Таким образом, наблюдаемое уменьшение температуры обрабатываемой детали при повышении скорости шлифования без охлаждения обусловлено одновременным снижением силы резания и временем нагрева и увеличением скорости вращения детали.

Изменение параметров режима шлифования и характеристики инструмента приводит к изменению всех его термодинамических характеристик: скоростей нагрева и охлаждения, мощности теплового потока, формирующегося в зоне резания, теплового баланса и др.

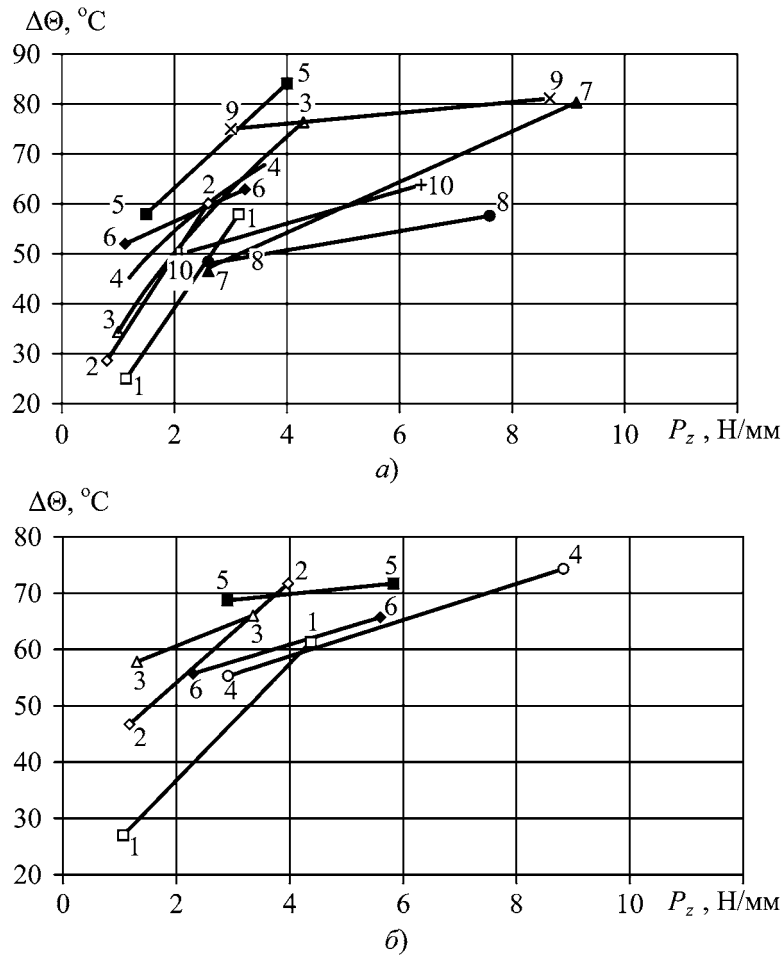


Рис. 8.35. Влияние скорости детали и силы резания на температуру детали при сухом шлифовании кругами 85А 46 L 15 V (SG) (а) и 49А 90 I 14 V (б):
 а – 1-1 – 21 м/мин; 2-2 – 30 м/мин; 3-3 – 36 м/мин; 4-4 – 50 м/мин; 5-5 – 60 м/мин;
 6-6 – 80 м/мин; 7-7 – 105 м/мин; 8-8 – 150 м/мин; 9-9 – 180 м/мин; 10-10 – 240 м/мин;
 б – 1-1 – 35 м/мин; 2-2 – 60 м/мин; 3-3 – 90 м/мин; 4-4 – 105 м/мин; 5-5 – 180 м/мин;
 6-6 – 270 м/мин

В работе по экспериментальным данным измерения мощности процесса P_w и температуре детали $\Delta\Theta$ в зависимости от условий шлифования были рассчитаны следующие термодинамические характеристики:

- Мощность теплового потока, который формируется в зоне резания и перераспределяется между деталью, кругом,

удаляемой стружкой и окружающей средой:

$$N_w = P_w \tau, \text{ кДж.} \quad (8.20)$$

Величина определяет общие затраты энергии для конкретных условий врезного шлифования для съема 100 мм³ материала, отнесенного к 1 мм ширины обработки.

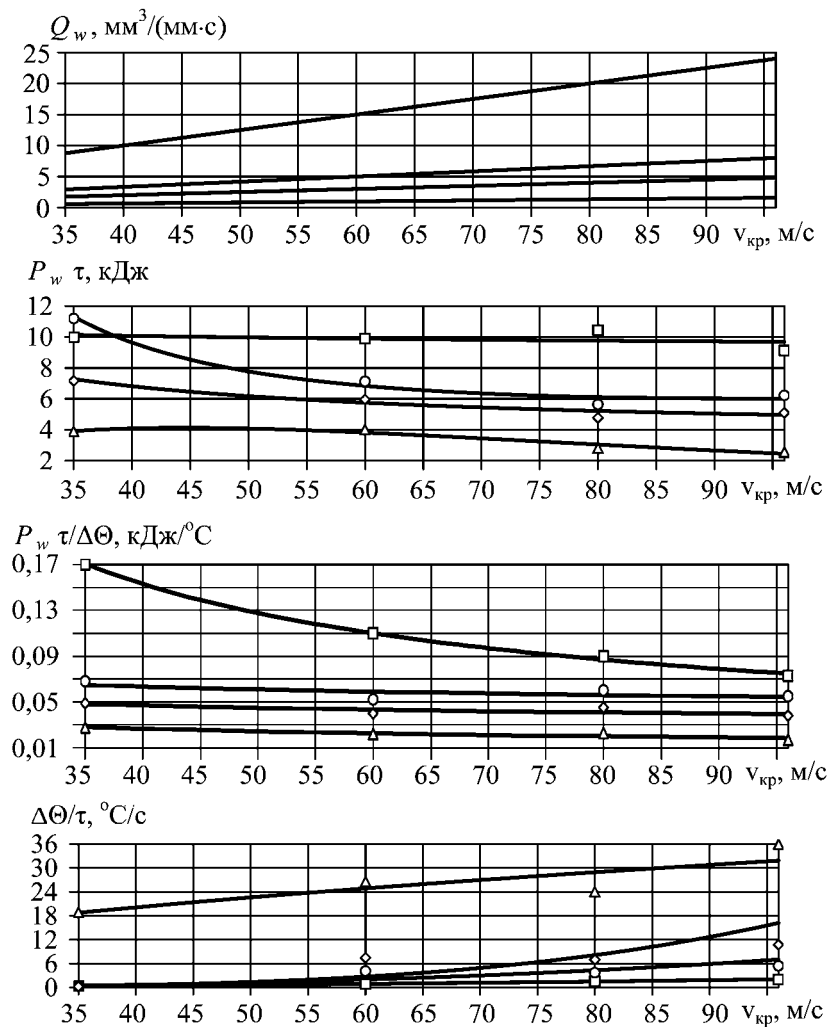


Рис. 8.36. Влияние режимов сухого шлифования кругом 99ВА 90 М 19 V на термодинамические характеристики процесса:

□ – $q = 60$, $t = 1$ мкм/об.дет; ○ – $q = 20$, $t = 1$ мкм/об.дет; ◇ – $q = 60$, $t = 5$ мкм/об.дет;
 Δ – $q = 20$, $t = 5$ мкм/об.дет

• Энергия шлифования, необходимая для нагрева на 1°C обрабатываемой поверхности детали в предположении, что вся образующаяся энергия идет на ее нагрев:

$$N_{\Theta} = \frac{P_w \tau}{\Delta \Theta}, \text{ кДж/}^\circ\text{C}. \quad (8.21)$$

• Скорость нагрева обрабатываемой поверхности детали для конкретных условий эксперимента:

$$V_{\Theta} = \frac{\Delta \Theta}{\tau}, ^\circ\text{C/с}. \quad (8.22)$$

На рис. 8.36 и 8.37 показан характер изменения расчетных термодинамических

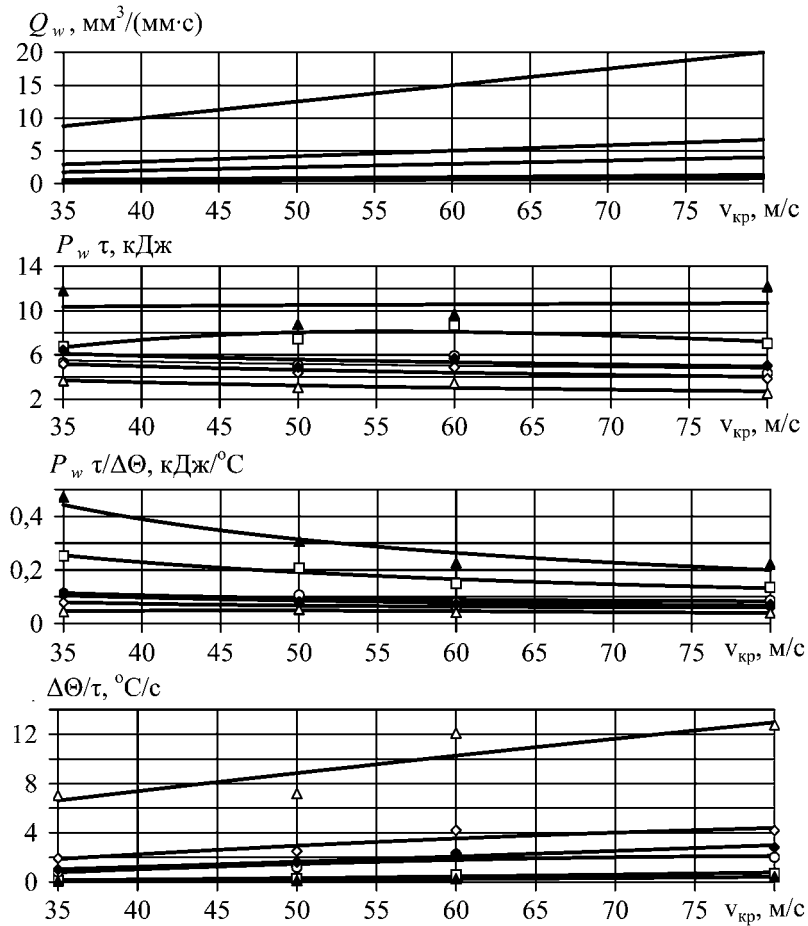


Рис. 8.37. Влияние режимов сухого шлифования кругом 85А 46 L15 VB MF 901 WS-Z на термодинамические характеристики процесса:

○ – $q = 20$, $t = 1$ мкм/об.дет; □ – $q = 60$, $t = 1$ мкм/об.дет; ▲ – $q = 100$, $t = 1$ мкм/об.дет;
 Δ – $q = 20$, $t = 5$ мкм/об.дет; ◇ – $q = 60$, $t = 5$ мкм/об.дет; ◆ – $q = 100$, $t = 5$ мкм/об.дет

характеристик процесса сухого шлифования кругами 85А 46 L 15 VB (табл. 8.1, п. 16) и 99ВА 90 М 19 V (табл. 8.1, п. 27) в зависимости от исследованных условий шлифования по скорости круга $v_{кр}$, отношению q и глубине обработки t . Для наглядности приведены данные по производительности шлифования Q_w для аналогичных условий обработки.

Как уже отмечалось, общие затраты энергии или мощность теплового потока уменьшаются при форсировании режима

обработки как при постоянной скорости круга, так и при ее увеличении. При более высоких скоростях шлифования мощность теплового потока увеличивается медленней при повышении производительности обработки, чем при более низких скоростях круга. Например, при форсировании режима обработки кругом 99ВА 90 М 19 V при его скорости 35 м/с с $q = 60$, $t = 1$ мкм/об.дет до $q = 20$, $t = 5$ мкм/об.дет мощность теплового потока N_w уменьшается в 2,5 раза, а при скоро-

сти круга 96 м/с это уменьшение составило 3,6 раза.

Если затрачиваемую энергию процесса шлифования условно привести к нагреву обрабатываемой детали на 1 °С, то ее величина имеет тенденцию к уменьшению при соответствующем возрастании производительности обработки. В граничных условиях шлифования в диапазоне скорости съема металла от 0,58 до 24 мм³/(мм·с) ее величина при сухой обработке шлифованием кругом 99ВА 90 М 19 V уменьшается в 10 раз. Энергия процесса шлифования, преобразуемая в тепло, перераспределяется между всеми элементами технологической системы резания и, как показывают теоретические оценки [54, 57, 93], при увеличении скорости круга все меньшее ее количество переходит в обрабатываемую деталь, а все больше выносится из зоны резания.

Приведенная в работе расчетная оценка энергии шлифования не дает прямого ответа на вопрос, сколько теплоты при сухой обработке идет на нагрев детали. Но характер ее изменения от режима шлифования однозначно свидетельствует, что мощность теплового потока с увеличением скорости круга уменьшается и, безусловно, уменьшается доля тепла, которая нагревает обрабатываемую деталь. А столь существенное уменьшение энергии нагрева на 1 °С подтверждает заключение о том, что при высокоскоростном шлифовании происходит неравномерный прогрев поверхностного слоя обрабатываемой детали, температурное поле от высокой температуры на поверхности быстро снижается на очень малой глубине, создавая большой температурный градиент. Если в этих условиях резко понизить температуру поверхности детали при выходе ее из зоны резания, например, принудительным охлаждением СОТС, то возникает риск термических повреждений обработанной поверхности (микротрещины) или появления больших остаточных макронапряжений.

При сухом шлифовании теплообмен происходит с более низкими скоростями охлаждения, что становится дополнительным преимуществом для качественной обработки высокоточных деталей.

Увеличение скорости шлифования повышает скорость нагрева v_{θ} обрабатываемой детали, но в отличие от затрачиваемой мощности величина скорости нагрева возрастает быстрее при форсировании режима обработки при постоянной скорости круга. При шлифовании кругом 99ВА 90 М 19 V при увеличении его скорости от 35 до 96 м/с и соответствующем возрастании скорости съема материала в 2,76 раз скорость нагрева детали увеличилась с 0,34 до 1,98 °/с, или в 5,8 раз. В то же время при постоянной скорости круга, равной 35 м/с, скорость нагрева детали увеличилась с 0,34 до 18,86 °/с, или в 55,5 раз при одновременном возрастании производительности процесса с 0,58 до 8,75 мм³/(мм·с). При скорости шлифовального круга, равной 96 м/с, форсирование режима обработки приводит к уменьшению темпа увеличения скорости нагрева поверхности детали до 3 раз.

В заключение можно отметить, что увеличение скорости шлифования без охлаждения при одновременном повышении скорости детали и глубины резания приводит к уменьшению работы, затрачиваемой на удаление постоянного объема обрабатываемого материала, а также энергии, расходуемой на нагрев детали на 1 °С, и способствует повышению скоростей нагрева детали на два порядка.

Положительным фактором повышения скорости шлифования от 35 до 96 м/с при соответствующем увеличении производительности процесса от 0,58 до 24 мм³/(мм·с), или в 41 раз, является снижение энергетических затрат на съем материала и, следовательно, интенсивности теплообразования в зоне резания почти в 4 раза.

Достаточно большое влияние на охлаждение обрабатываемой детали, по-

видимому, оказывает также турбулентный воздушный поток от вращающегося шлифовального круга, мощность которого зависит от степени развитости рельефа рабочей поверхности круга и скорости его вращения. Этот охлаждающий эффект связан и с вращением детали, которая находится в непосредственном контакте с инструментом. Более высокая частота вращения детали способствует ее более интенсивному охлаждению, к которому добавляется эффект охлаждения воздушным потоком от вращающегося шлифовального круга. Для высокопористого инструмента с развитым рельефом и наличием пор на рабочей поверхности указанный охлаждающий эффект будет, очевидно, более значительный, чем для кругов с плотной структурой.

Термодинамика сухой правки. При сухом шлифовании правка шлифовального круга должна осуществляться также без подачи СОТС.

Уже подчеркивалось, что правка круга необходима не только для придания рабочей поверхности шлифовального круга заданной геометрической формы. От условий процесса правки зависят расход абразива и его режущие свойства.

В литературе практически отсутствуют сведения о поведении правящих алмазных инструментов при правке шлифовальных кругов без охлаждения. Предварительный анализ возможного поведения алмаза в процессе сухой правки давал пессимистический прогноз по двум обстоятельствам. Во-первых, непрерывный нагрев даже в течение короткого времени правки может привести к потере работоспособности алмаза, в том числе из-за его графитизации. Во-вторых, нагрев алмаза приведет к его расширению и, как следствие, к формированию конусности рабочей поверхности шлифовального круга. Эти обстоятельства дополнительно усугубляются тем, что алмаз находится в металлической оправе, нагрев которой может привести к разупрочнению крепления алмаза и еще большему искажению формы круга.

Сравнительный анализ алмазов и правящих инструментов в условиях сухой правки выполнялся фирмой Stron Diamantwerkzeuge GmbH (Германия) при скорости шлифовального круга 50 м/с, имеющего характеристику 85A 46 L 15 VB MF901 WS-F. Диаметр круга 500 мм, длина правки 80 мм. Оценивались температура и скорость нагрева правочного инструмента и конусность круга после правки в различных условиях.

Методика измерения температуры правочных карандашей описана в разд. 8.4, а конусность шлифовального круга после правки оценивалась по глубине шлифа на тонкой металлической пластинке в крайних точках относительно предварительно шлифованной базы как разность этих значений в мкм.

От состава алмаза типа МКВ (см. раз. 7.5), как показали эксперименты, при одном и том же характере закрепления в металлическом корпусе слабо зависит его темп нагрева в процессе сухой правки (коэффициент перекрытия 3, величина правки 20 мкм). Скорость нагрева алмаза изменялась незначительно: 5...6 °C/с, а увеличение конусности рабочей поверхности заправленного круга более заметно: от 17 до 28 мкм.

Если сравнить различные конструктивные исполнения правящего инструмента: алмазно-металлические карандаши с одним или несколькими кристаллами и алмазный резец, то при одинаковых условиях правки их скорость нагрева изменялась от 2 до 18 °C/с при величине правки 50 мкм. В этих же условиях правки, например алмазным резцом, конусность круга выросла с 0 до 49 мкм.

Сильно влияет на скорость нагрева алмазного правящего инструмента коэффициент перекрытия U_d : ее величина изменяется в диапазоне 11...55 °C/с при $U_d = 2$, уменьшаясь до значений 2...28 °C/с при $U_d = 6$.

В целом все измеренные характеристики сухой правки во всем диапазоне исследованных типов алмазов и конст-

ружий правящих инструментов и режимов правки, включая результаты сухого шлифования, имели очень большой разброс. В некоторых случаях нельзя было установить механизм или закономерность их влияния, например, на конусность рабочей поверхности заправляемого круга или шероховатость обработанной поверхности детали кругом после правки. Не обнаружено также однозначной связи между скоростью нагрева алмаза, его расширением и соответствующим изменением конусности круга.

В большинстве случаев минимальные значения по скорости нагрева конусности показали алмазные многокристалльные карандаши при величине правки 10 мкм и коэффициенте перекрытия, равном 4...6. Этот тип правящего инструмента использовался во всех экспериментах по сухому шлифованию.

В дальнейшем при сухой правке всех исследованных шлифовальных кругов различных характеристик фиксировался интенсивный, но стабильный уровень акустической эмиссии в зоне обработки, которая регистрировалась специальным датчиком. Это дает основание сделать вывод об отсутствии катастрофического износа правящего инструмента, а следовательно, о принципиальной возможности процесса сухой правки шлифовальных кругов.

В завершение раздела можно подчеркнуть, что был изучен наиболее радикальный вариант из известных методов, направленных на повышение экологической безопасности процесса шлифования, – вариант шлифования без применения смазочно-охлаждающих средств.

В результате проведенных исследований установлено, что высокопроизводительное шлифование без охлаждения не только возможно, но и эффективно: при увеличении скорости шлифования от 35 до 96 м/с при одновременном повышении его производительности от 0,58 до 24 мм³/(мм·с), или в 41 раз, энергетиче-

ские затраты на съем материала сокращаются почти в 4 раза. Уровень достигнутых при этом температур обрабатываемой детали при использовании оптимальной характеристики высокопористого абразивного круга не превышает или ниже значений, которые обеспечиваются при его скорости, равной 35 м/с.

Была исследована работоспособность более 30 различных характеристик шлифовальных кругов, в основном высокопористых или с высокими номерами структур от 12 до 20, у которых предельная рабочая скорость варьировалась от 60 до 105 м/с. При разработке и изготовлении шлифовальных кругов использовались различные модификации корунда как абразивного материала, с размером зерна от 120 до 500 мкм, в том числе из абразивных смесей различных по составу абразивов и их зернистостей. Применялись различные по составу и свойствам керамические и бакелитовые связки.

Хорошие результаты при высокоскоростном шлифовании без охлаждения показали высокопористые круги, изготовленные по экологически безопасной и оригинальной технологии, разработанной автором. Основным преимуществом новой технологии является возможность изготовления абразивного инструмента на керамических связках, у которого одновременно сочетается высокая пористость (до структур 20...22), высокая твердость (до C1...CT2) и высокая разрывная прочность, что существенно расширяет его технологические возможности.

Экспериментально установлено, что характеристика шлифовального круга оказывает решающее влияние на интенсивность теплообразования при сухом шлифовании, а также на его мощность, износостойкость инструмента и шероховатость обработанной поверхности детали. Выявлена важная закономерность сухого шлифования: при увеличении скорости круга начинает уменьшаться температура обработанной детали, ее снижение

становится тем больше, чем больше производительность процесса. Максимальная температура при сухом шлифовании зависит от сочетания твердости и плотности шлифовального круга и его скорости: чем тверже шлифовальный круг и больше его плотность (меньше номер структуры), тем при меньшей скорости шлифования достигается максимальная температура обрабатываемой детали и начинается ее падение при дальнейшем увеличении скорости круга. Наиболее благоприятные термодинамические условия при сухом шлифовании обеспечиваются мягкими шлифовальными кругами с высокими номерами структуры при скорости шлифования более 60 м/с.

Более твердые с высокими номерами структуры шлифовальные круги обладают повышенной износостойкостью при сухом шлифовании и обеспечивают минимальную шероховатость обработанной поверхности, особенно при увеличении скорости круга.

Увеличение скорости сухого шлифования в исследованном диапазоне от 35 до 96 м/с обеспечивает более стабильный характер протекания процесса, так как при этом значения среднеквадратичных отклонений его выходных характеристик уменьшаются.

Изменение параметров режима сухого шлифования и свойств абразивного инструмента приводит к изменению всех термодинамических характеристик процесса: скоростей нагрева и охлаждения,

мощности теплового потока, формирующегося в зоне резания, теплового баланса и др. Установлено, что наблюдаемое уменьшение температуры обрабатываемой детали при увеличении скорости шлифования без охлаждения обусловлено одновременным снижением силы резания, временем нагрева и увеличением скорости вращения детали.

Как показали расчеты и результаты экспериментов, увеличение скорости шлифования без охлаждения при одновременном повышении скорости детали и глубины резания приводит к уменьшению работы, затрачиваемой на удаление постоянного объема обрабатываемого материала, а также энергии, расходуемой на нагрев детали на 1 °С, и способствует повышению скоростей нагрева детали на два порядка.

Экспериментально также установлено, что повышение скорости круга при сохранении постоянной производительности сухого шлифования целесообразно только для уменьшения шероховатости обработанной поверхности детали. Но при этом увеличивается ее нагрев и энергетические затраты на процесс съема материала.

Для условий высокопроизводительного шлифования без охлаждения, когда одновременно повышаются все параметры режима обработки, разработаны рекомендации по назначению характеристики шлифовального круга в зависимости от скоростного интервала его работы.

Глава 9

ПРОФИЛЬНОЕ ГЛУБИННОЕ ШЛИФОВАНИЕ ХВОСТОВИКОВ ТУРБИННЫХ ЛОПАТОК

В настоящее время для обработки хвостовиков лопаток авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) и высокоресурсных газоперекачивающих установок (ГПУ) широко используется прогрессивный метод профильного глубинного шлифования высокопористыми абразивными кругами. Создание и промышленное освоение метода глубинного шлифования для обработки подобных деталей было обусловлено следующим:

- использованием для их производства жаропрочных литейных сплавов на никелевой основе, чрезвычайно тяжело обрабатываемых лезвийным инструментом;
- наличием конфигураций, требующих высокой точности изготовления (елочный профиль хвостовика) и качества поверхностного слоя;
- необходимостью безусловного формирования в поверхностном слое остаточных напряжений сжатия для повышения прочности и долговечности лопаток;
- требованием снижения трудозатрат.

Сохраняя все преимущества традиционного маятникового шлифования, метод глубинного шлифования в несколько раз превосходит по скорости съема металла известные методы лезвийной обработки. Он позволяет соединить в одном технологическом процессе этапы формообразования сложнопрофильных поверхностей деталей с одновременным формированием высококачественного поверхностного слоя. Высокая производительность обработки, а также достигаемые результаты по точности копируемого профиля и

качеству поверхностного слоя позволяют считать процесс глубинного шлифования наиболее перспективным методом механообработки.

Одним из основных преимуществ глубинного шлифования является то, что толщина слоя металла, удаляемого за один проход шлифовального круга, может составлять до 10 и более миллиметров при скорости перемещения детали от 40 до 500 мм/мин в зависимости от типа обрабатываемой детали, марки материала, глубины шлифования и требований, предъявляемых к качеству поверхностного слоя.

На сегодняшний день достаточно хорошо изучен процесс глубинного шлифования высокопористыми кругами со скоростью шлифования в диапазоне 20... 35 м/с. Разработаны теоретические модели представления процесса, математические методы назначения оптимальных характеристик абразивного инструмента, параметров режима шлифования и правки абразивного круга [17, 53, 71, 88].

Для практической реализации процесса глубинного шлифования были созданы специальные профишлифовальные станки с числовым программным управлением повышенной точности и с мощным приводом главного движения (до 50 кВт), оснащенные многофункциональной системой подачи смазочно-охлаждающей жидкости. Разработаны высокопористые шлифовальные круги с высокой режущей способностью, а также прецизионные алмазные правящие ролики. На базе новых технологических средств была создана единая интегральная технология глубинного шлифования, применяемая к широкой гамме конструкционных мате-

риалов практически без ограничения их прочности и твердости.*

Внедрение в промышленное производство глубинного шлифования взамен фрезерования и протягивания при обработке хвостовиков турбинных лопаток позволило:

- увеличить скорость съема металла до $10...20 \text{ мм}^3/(\text{мм}\cdot\text{с})$;
- повысить точность обработки на 30 %;
- снизить шероховатость поверхности до 2 раз ($Ra = 0,8...1,25 \text{ мкм}$);
- повысить сопротивление усталости и долговечность деталей на 12...15 %.

Примечательно то, что процесс глубинного шлифования хвостовиков турбинных лопаток получил широкое распространение не только в России, но и во всем мире.

При этом, несмотря на различия в марках обрабатываемых сплавов, технологических схемах, режимах шлифования и правки, применяемого оборудования и т.д. характеристики высокопористых шлифовальных кругов практически идентичны во всех случаях обработки.

Процесс глубинного шлифования хвостовиков лопаток достаточно хорошо изучен и подробно описан в литературе [17, 53, 71, 87, 88]. В данной главе приведены в основном результаты применения высокопористых шлифовальных кругов, изготовленных по новой технологии [23, 81].

9.1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СХЕМЫ ГЛУБИННОГО ШЛИФОВАНИЯ ХВОСТОВИКОВ ТУРБИННЫХ ЛОПАТОК

Применяемые схемы, режимы обработки, характеристики инструмента и ус-

ловия его правки адаптированы к обрабатываемым материалам — жаропрочным сплавам на никелевой основе.

Материалы для лопаток турбин современных двигателей обладают высокой сопротивляемостью разрушению при термической и малоцикловой усталости. Опасность разрушения усугубляется поверхностными реакциями, связанными с газовой коррозией, разупрочнением границ зерен.

Наиболее проблемными для шлифования среди никелевых сплавов являются литейные. Их структура состоит из легированного твердого раствора на никелевой основе, упрочняющей интерметаллидной γ' -фазы сложного состава $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$ и карбидов. Количество избыточных фаз у литейных сплавов типа ЖС6У, ВЖЛ12У, ЖС32-ВИ и т.д. больше, чем у деформируемых никелевых сплавов типа ХН77ТЮР, ХН73МБТЮ, ХН62БМКТЮ и т.д., применяемых для дисков турбин. Повышенная жаропрочность литейных сплавов сочетается с их низкой пластичностью.

Практика применения глубинного шлифования показывает, что с точки зрения производительности и затрат энергии на съем материала профильную обработку поверхностей деталей ГТД наиболее рационально проводить за 3–4 прохода. При этом величина общего припуска, зависящая от способа получения заготовки, разбивается на три части. На долю первого прохода приходится в среднем 90...95 % от общей величины удаляемого припуска, на второй проход — порядка 3...7 % и на окончательный проход — около 1...3 %.

Австрийская фирма Tyrolit, выпускающая высокопористые шлифовальные круги для глубинного шлифования, рекомендует вести обработку елочного профиля замка лопаток ГТД своим инструментом за 3 прохода. При этом скорость шлифования может составлять 20...30 м/с, глубина резания 3,0...0,03 мм, скорость подачи стола с заготовкой 80...500 мм/мин.

* За создание и внедрение новой интегральной технологии механической обработки высоконагруженных деталей газотурбинных двигателей автору вместе с другими участниками работы присуждена премия Совета Министров СССР.

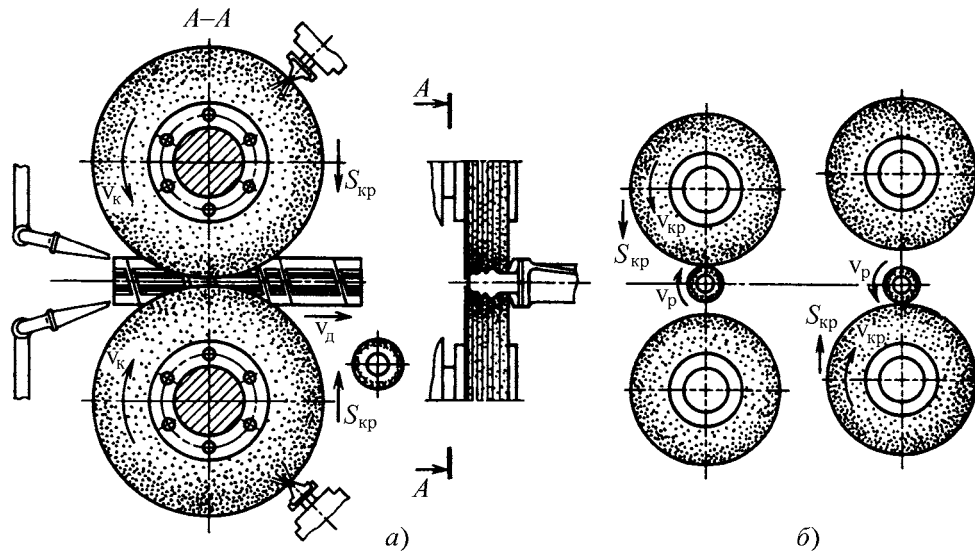


Рис. 9.1. Схема двустороннего глубинного шлифования елочного профиля хвостовика турбинной лопатки на станке SS013L:
 а – схема шлифования; б – схема правки шлифовальных кругов алмазным роликом

Такая технологическая схема реализована, например, на специальных двухшпиндельных станках-полуавтоматах с ЧПУ мод. SS013L фирмы Elb-Schliff (рис. 9.1). Одновременное двустороннее формирование гребенок елочного профиля замка выполняется за одну установку в 3 прохода чернового и чистового шлифования с регламентированным режимом правки шлифовального круга в конце цикла обработки. Дифференцированно по переходам используются следующие режимы обработки: скорость круга – 25...30 м/с, скорость перемещения детали – 120...200 мм/мин, глубина резания – 2,5...0,05 мм. В результате скорость съема металла достигает 300...400 мм³/мин, что до 10 раз выше, чем скорость съема при фрезеровании. Правка шлифовальных кругов выполняется профильными алмазными роликами перед каждым проходом. Точность формообразования отвечает 6-му качеству, поверхность елочного профиля формируется с регулярным микрорельефом $Ra = 0,63...1,25$ мкм.

На одношпиндельном станке с ЧПУ модели ЛШ-220 производства Липецкого станкостроительного завода реализованы схемы глубинного шлифования поверхности елочного профиля замка, основания, торцов хвостовика лопатки (рис. 9.2). Обработка производится за 3–4 прохода при скорости шлифования 25 м/с с непрерывной правкой круга. Глубина резания по переходам в зависимости от снимаемого припуска составляет от 9,5...10 мм на первом и до 0,07 мм на окончательном проходе, а скорость подачи заготовки при этом изменяется от 40 до 200 мм/мин.

Такие условия шлифования обеспечивают формирование в поверхностном слое хвостовика лопаток сжимающих остаточных напряжений, что выгодно отличает процесс глубинного шлифования от других методов обработки. Зарождение усталостных трещин при эксплуатации происходит обычно в зоне максимальных остаточных напряжений растяжения.

Применяется также схема шлифования елочного профиля замка лопаток ГТД,

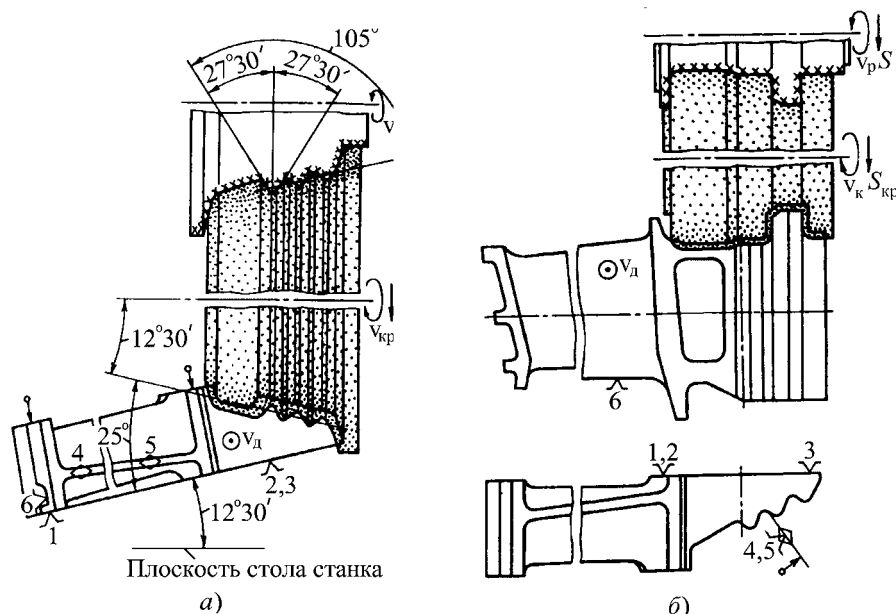


Рис. 9.2. Технологические схемы глубинного шлифования поверхностей хвостовика лопаток ГТД на станке ЛШ-220:

а – поверхности елочного профиля и основания хвостовика; *б* – торца

которая предусматривает снятие припуска за 14 и более проходов. При этом обработка ведется со значительно меньшими глубинами 2,2...0,002 мм, но при более высоких скоростях перемещения заготовки 500...1000 мм/мин, что приближает данную схему глубинного шлифования, особенно на последних чистовых проходах, к схеме маятникового шлифования.

По мнению некоторых специалистов, комбинированная глубинно-маятниковая схема шлифования позволяет формировать такие свойства поверхностного слоя замка, которые обеспечивают более высокий ресурс эксплуатации лопатки.

9.2. ТРЕБОВАНИЯ К ВЫСОКОПОРИСТЫМ КРУГАМ ДЛЯ ГЛУБИННОГО ШЛИФОВАНИЯ ХВОСТОВИКОВ ТУРБИНЫХ ЛОПАТОК

Эффективность процесса глубинного шлифования в значительной степени определяется эксплуатационными возмож-

ностями режущего инструмента, в качестве которого применяются высокопористые абразивные круги на керамической связке.

По мнению В.А. Хрулькова, который один из первых обстоятельно исследовал процесс шлифования жаропрочных сплавов на никелевой основе, специфика их обработки предполагает особые требования к характеристике абразивного инструмента.

- В процессе шлифования происходит истирание абразивных зерен круга интерметаллидными и карбидными включениями жаропрочного сплава, что не наблюдается при обработке других материалов, например, сталей.

- Сочетание высокой прочности и низкой пластичности, которые незначительно изменяются при нагреве до температур шлифования, являются причиной больших нагрузок на режущие абразивные зерна, что ограничивает форсирование режимов обработки.

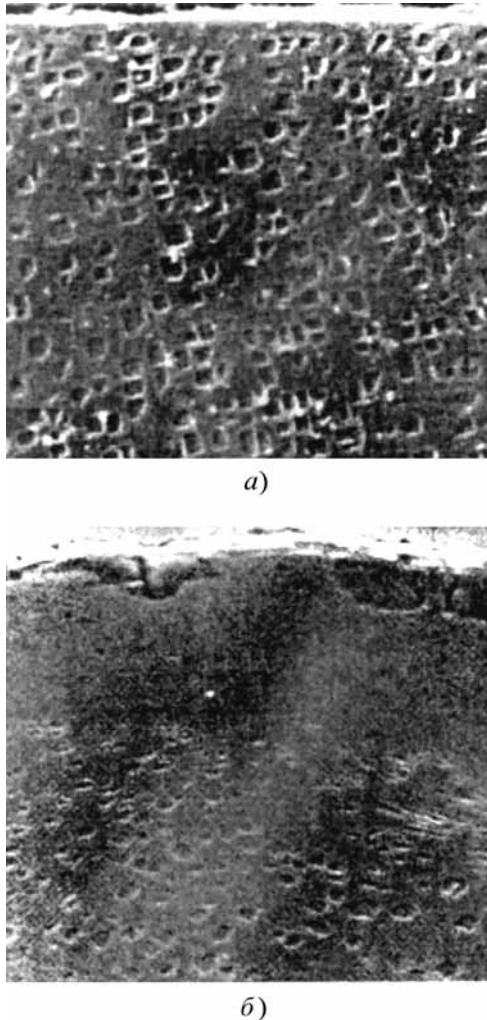


Рис. 9.3. Субструктура неповрежденного (а) и измененного от теплового воздействия (б) поверхностного слоя никелевого сплава Inconel 738 LC после шлифования [128]

- Незначительно окисляющиеся свежесрезанные ювенильные поверхности металла в местах контакта при совместном действии высоких температур и давлений формируют прочные адгезионные связи с абразивным материалом с последующим налипанием стружки на абразивные зерна.

- Низкая теплопроводность никелевых сплавов способствует локализации

теплового воздействия непосредственно в зоне контакта абразивных зерен и обрабатываемого материала, что приводит к увеличению контактной температуры и усилению их взаимной химической активности.

Химическая активность способствует развитию не только адгезии, но взаимной диффузии. В.С. Мухин взаимный массоперенос легирующих элементов экспериментально наблюдал при обработке жаропрочных сплавов лезвийным инструментом, а В.А. Носенко – при их шлифовании. По количеству, например, перенесенного кремния и алюминия в обрабатываемую поверхность в процессе шлифования никелевые сплавы уступают только титановым сплавам.

Взаимный массоперенос изменяет химический состав абразива и обработанной поверхности детали, непредсказуемо влияя на ее эксплуатационные свойства.

Т.Н. Лоладзе и Г.В. Бокучава показали, что диффузия приводит к формированию площадок износа на режущих кромках, при этом она, как правило, сопровождается адгезией с последующим развитием механизма адгезионно-усталостного изнашивания абразивного инструмента.

Активное проявление диффузионных процессов при резании жаропрочных сплавов на никелевой основе, на первый взгляд, не представляется возможным. "Жаропрочность" как свойство формируется специальным легированием, технологией плавки и термообработкой и, по определению, направлено на торможение диффузии. Физический смысл этого явления обусловлен наличием частиц избыточной фазы, получаемых при дисперсионном твердении сплава и занимающих достаточно большой объем в его структуре. За счет когерентной связи между матричным никелем и второй фазой, которая изоморфна матрице с различием в периодах решеток всего на ~0,5 %, обеспечивается высокое сопротивление ползучести сплава при его эксплуатации. При наличии когерентной связи граница раздела

между никелем и γ' -фазой в диффузионном отношении менее проницаема, чем при некогерентной.

Возможно, что при шлифовании в тонком приповерхностном слое в зоне контакта зерна с металлом высокий уровень действующих температур и напряжений оказывается достаточным, чтобы инициировать взаимный диффузионный массоперенос, изменяя субструктуру границы раздела никеля и второй фазы.

На рис. 9.3, приведенном в работе [128], показан пример описанной трансформации субструктуры никелевого сплава марки Inconel 738 LC при шлифовании.

На рис. 9.3, *а* показано характерное распределение интерметаллидной γ' -фазы; субструктура поверхностного слоя сплава после обработки не претерпела заметных изменений. На рис. 9.3, *б* в слое глубиной до 10 мкм от поверхности произошло растворение γ' -фазы. При глубинном шлифовании негативное проявление описанных явлений, которые снижают работоспособность шлифовального круга, усиливается.

Исходя из отмеченного характера работы инструмента при обработке жаропрочных никелевых сплавов, к характеристике высокопористого круга для глубинного шлифования турбинных лопаток ГТД предъявляются особые требования.

Абразивный материал должен обеспечивать возможность умеренного и равномерного самозатачивания и иметь минимальную химическую активность к обрабатываемому материалу. Наиболее рациональным абразивным материалом для шлифования жаропрочных сплавов является электрокорунд.

Для основы жаропрочных сплавов – никеля – наиболее износостойким из традиционных абразивных материалов является корунд. При микроцарапании никеля износостойкость корунда в 2,5 раза выше, чем у карбида кремния. При шлифовании эффект использования кругов на основе электрокорунда еще больше: при обработке сплава ЖСС6Ф коэффициент шлифования электрокорундовым инструмен-

том без охлаждения в 16 раз больше, чем кругами из карбида кремния [52].

Среди модификаций корунда наиболее износостойким является монокорунд, далее следует электрокорунд белый, хромтитанистый и нормальный.

Практика показала, что из традиционных абразивных материалов более эффективно использование электрокорунда белого, который по совокупности физико-механических и эксплуатационных свойств наиболее полно соответствует требованиям шлифования жаропрочных никелевых сплавов.

Перспективно для этих целей применение инструмента из кубического нитрида бора (см. главу 12).

Связка должна обеспечивать необходимую прочность круга, теплостойкость, жесткость, химическую инертность и водостойкость. Условия профильного шлифования с учетом высоких требований по точности обработки предопределяют применение керамической связки. В настоящее время на отечественных абразивных заводах наибольшее распространение для производства инструмента из электрокорунда получила керамическая связка марки К5, которая содержит бор, повышающий ее адгезию к оксиду алюминия. Связки других марок, в том числе и достаточно производительные (К1, К8, К15 и др.), по разным причинам в отечественном производстве не используются.

Зернистость должна обеспечивать требуемые параметры микрогеометрии в условиях бездефектного шлифования. Строение высокопористого абразивного инструмента позволяет использовать более мелкое зерно без ущерба для качества обработки. Одновременно это повышает точность формируемого профиля и благоприятно влияет на микрогеометрию поверхностного слоя. Поэтому наиболее оптимальной считаются зернистости 12П и 25П. Увеличение зернистости приводит к снижению теплонапряженности процесса, но одновременно при этом повышается шероховатость обработанной поверхности

и снижается кромкостойкость шлифовального круга.

Твердость абразивного инструмента является основной характеристикой эксплуатационных свойств, которая зависит от рецептурного состава и, прежде всего, от объемного содержания связки. Колебания твердости абразивных инструментов, обусловленные отклонениями от технологии изготовления, приводят к значительному ухудшению как качества самого инструмента, так и качества обработки деталей при шлифовании, а также к снижению удельной производительности, неравномерному износу круга, вибрациям станка.

Наиболее рациональной степенью твердости в условиях глубинного шлифования считается ВМ2. Однако для высокопористого инструмента на практике принято определять не только степень его твердости, но и звуковой индекс (ЗИ). Обычно для глубинного шлифования хвостовиков лопаток ГТД рекомендуют применять круги с ЗИ в диапазоне 29...37, чаще 31...33.

Номер структуры шлифовального круга для условий глубинного шлифования предпочтителен в диапазоне 10...16.

Особенности процесса глубинного шлифования предопределяют обязательное наличие в высокопористом круге открытых пор для размещения стружки и частиц охлаждающей жидкости, которые формируются за счет выгорающих наполнителей. Пористость таких кругов составляет 48...70 % при размере пор 200...3000 мкм, в то время как пористость обычного инструмента не превышает 45 %.

Изготовление подобного инструмента возможно только с использованием дополнительных компонентов в виде порообразующих наполнителей, которые должны удовлетворять ряду требований по технологичности и экологичности применения:

- равномерно смешиваться с компонентами формовочной массы;

- улучшать физико-механические свойства формовочной массы (прочность сырца, сыпучесть);

- исключать токсичные отходы при выгорании;

- не создавать внутренних напряжений в инструменте в процессе обжига;

- обеспечивать требуемую прочность готового инструмента.

Порообразующие наполнители. Оптимальный размер наполнителей, используемых для производства высокопористых кругов для глубинного шлифования жаропрочных сплавов, составляет 160...400 мкм. Использование более крупных фракций нецелесообразно, поскольку приводит к уменьшению количества искусственных пор в объеме инструмента и повышает неравномерность их распределения, а также может являться причиной разрушения инструмента под действием больших нагрузок глубинного шлифования.

Класс точности. Для процесса глубинного шлифования, имеющего высокие динамические характеристики и требования к качеству обработки, точность изготовления высокопористых кругов оказывает большое значение. Рекомендуемый класс точности шлифовальных кругов для операций глубинного шлифования – АА. Для кругов этого класса точности устанавливаются более жесткие технические требования, чем для кругов наиболее распространенных классов А и Б по допустимым отклонениям геометрической формы и размеров, а также классу неуравновешенности масс. Как правило, величина неуравновешенности масс высокопористых кругов для глубинного шлифования хвостовиков лопаток ГТД устанавливается по 1-му классу неуравновешенности масс.

Среди вышеперечисленных параметров при изготовлении кругов для ответственных операций глубинного шлифования хвостовиков турбинных лопаток, особое значение придается таким показателям,

как твердость, ее стабильность в объеме круга и в партии инструмента, а также неуравновешенность масс.

На начальном этапе внедрения глубинного шлифования хвостовиков лопаток газотурбинных двигателей на моторостроительных заводах широко использовались высокопористые круги австрийской фирмы Tyrolit, которые были изготовлены на основе выгорающего порообразователя – нафталина и в большей мере отвечали вышеперечисленным требованиям к шлифовальным кругам. В некоторой степени эти требования были реализованы и отечественными разработчиками шлифовального инструмента, изготавливаемого со вспучивающимся порообразователем – перлитом. В настоящее время в кругах для профильного глубинного шлифования используется другой тип порообразователя – молотые фруктовые косточки.

Технология изготовления высокопористых кругов на основе выгорающих при обжиге фруктовых косточек отличается повышенной трудоемкостью и нестабильностью эксплуатационных свойств инструмента. Особая сложность обеспечения качества возникает при изготовлении крупногабаритных высокопористых кругов с высотой более 100 мм и номерами структуры 13...16. При изготовлении кругов с такими размерами процент брака может составлять до 50 % партии инструмента.

В связи с технологическими особенностями процесса глубинного шлифования хвостовиков турбинных лопаток в зависимости от принятой схемы обработки, обрабатываемого материала и условий его получения, станка, условий правки и т.д. на характеристику абразивного инструмента накладываются жесткие ограничения по классу точности исполнения, неуравновешенности масс и особенно твердости. Для отечественной практики такое ограничение касается ужесточения возможной твердости по ЗИ от диапазона в 2...3 единицы до фиксированного значения. Изготовление высокопористых

кругов с такими требованиями связано с большими трудностями.

Сделать производство высокопористых кругов более технологичным, а сам инструмент более качественным с точки зрения обеспечения стабильности эксплуатационных свойств позволяет использование в качестве порообразующего наполнителя невыгорающих микросфер.

9.3. ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ГЛУБИННОГО ШЛИФОВАНИЯ ХВОСТОВИКОВ ЛОПАТОК ГТД

Для исследований эксплуатационных свойств высокопористого инструмента было изготовлено несколько партий кругов с наружным диаметром 500 мм и с высотой от 25 до 130 мм. Круги изготавливались из электрокорунда белого марки 25А или его зарубежного аналога 99ВА и 99А (по обозначению фирмы Carborundum Electrite a.s.), зернистостью 12, 25 и 25/20 (100, 60 и 60/70), твердостью от ВМ1 до М1 (G...Н), номерами структуры 10...16 с использованием различных комбинаций невыгорающих и выгорающих наполнителей. Всего было изготовлено и исследовано около 680 шлифовальных кругов.

Исследования высокопористых кругов были направлены на выявление взаимосвязей и характера распределения в партии инструмента одного состава таких основных показателей характеристики, как твердость и неуравновешенность масс.

Контроль твердости кругов выполнялся двумя методами: методом неразрушающего акустического контроля частоты собственных колебаний с помощью прибора "Звук 202-02" и на пескоструйном приборе модели 910-У4 путем измерения глубины лунки, образуемой струей кварцевого песка на поверхности абразивного инструмента. Значение дисбаланса шлифовальных кругов определялось на специальных балансировочных установках. За величину дисбаланса была принята масса груза, который необходимо прило-

**9.1. Результаты тестирования высокопористых шлифовальных кругов
для глубинного шлифования хвостовиков лопаток ГТД**

Параметр	Значение для размера		
	500×25×203	500×32×203	500×40×203

Круги с характеристикой 99ВА 100 G 12 V (1-я партия)

Число кругов, шт	2	21	18
Частота собственных колебаний, кГц	1,62	1,54...1,71	1,60...1,70
Звуковой индекс	35	33...35	33...35
Распределение по ЗИ, %:			
ЗИ 33	—	4,8	16,7
ЗИ 35	100	95,2	83,3
Среднее значение ЗИ	35	35	35
Неуравновешенность масс, г	15	7...32	3...34
Распределение по классам неуравновешенности, %:			
1 (до 16 г)	—	23,8	16,7
2 (до 25 г)	—	33,4	44,4
3 (до 40 г)	—	42,8	38,9
Среднее значение, г	15	22	24

Круги с характеристикой 99ВА 100 G 12 V (2-я партия)

Число кругов, шт	50	65	50
Частота собственных колебаний, кГц	1,49...1,62	1,44...1,62	1,53...1,67
Звуковой индекс	31...35	31...35	33...35
Распределение по ЗИ, %:			
ЗИ 31	5,9	53,3	—
ЗИ 33	88,2	40,0	42,9
ЗИ 35	5,9	6,7	57,1
Среднее значение ЗИ	33	33	34
Неуравновешенность масс, г	до 20	до 25	до 25

Круги с характеристикой 25А 12П ВМ2 12 К

Число кругов, шт	18	186	192
Звуковой индекс	29...31	29...31	29...31
Среднее значение ЗИ	30	30	30
Неуравновешенность масс, г	до 20	до 25	до 25

жить к точке на расстоянии радиуса наружной поверхности круга для его уравнивания. Результаты тестирования нескольких партий шлифовальных кругов представлены в табл. 9.1.

Измерение твердости высокопористого круга, в объеме которого имеется достаточное количество невыгорающего сферического наполнителя, акустическим методом представляет определенные трудности, так как частота собственных колебаний такого инструмента во многом зависит от состава и содержания наполнителей (см. п. 5.3). Существенным недостатком акустического контроля является отсутствие информации о нестабильности (неоднородности) физико-механических свойств в объеме круга, в частности о нестабильности твердости, которая является важным показателем качества. В отличие от этого, измерение твердости пескоструйным методом позволяет получить картину распределения твердости по объему круга.

Важным показателем качества изготовления шлифовального круга является стабильность твердости в его объеме. Известно, что стабильность твердости абразивного круга влияет на качество обработки и удельную производительность шлифования. С увеличением нестабильности твердости в круге увеличивается вероятность появления прижогов и микротрещин на обработанной поверхности из-за колебаний радиальной составляющей сил резания и температуры в зоне шлифования. Стабильность твердости также влияет на равномерность износа шлифовального круга как в процессе его работы, так и в процессе алмазной правки. Вследствие неравномерного износа круга увеличивается шероховатость и волнистость обработанной поверхности заготовки.

Стабильность твердости в партии инструмента – это рассеяние показателей твердости по глубине лунки h_d или звукового индекса ЗИ в партии инструмента. Оценка стабильности твердости произво-

дится по среднеквадратичному отклонению (СКО).

В ходе обобщения статистических данных, полученных при тестировании шлифовальных кругов, установлено, что по ГОСТ 18118–79 (в ред. 1981 г.) все круги имели твердость ВМ1...ВМ2, а значения звукового индекса ЗИ по ГОСТ 25961–83 (в ред. 1990 г.) изменялось от 29 до 35. По неуравновешенности массы круги соответствовали 1–3-му классу и имели дисбаланс от 3 до 40 г.

При изготовлении высокопористых абразивных кругов одного рецептурного состава, вследствие действия ряда случайных факторов, твердость по звуковому индексу и глубине лунки, а также дисбаланс имеют достаточно широкий диапазон рассеяния значений. Как показывает практика производства абразивного инструмента, твердость и дисбаланс кругов связаны между собой, однако эта связь определена только для кругов с различной характеристикой по твердости.

Тестирование первой партии высокопористых шлифовальных кругов типоразмеров 1 500×25×203, 1 500×32×203 и 1 500×40×203 с характеристикой 99ВА 100 G 12 V (24А 12 ВМ2 12 К) показало, что у инструмента одного рецептурного состава наблюдается разброс твердости по звуковому индексу в пределах заданной степени ВМ2 (ЗИ 33...35), но большая часть шлифовальных кругов имеет твердость ЗИ 35. По дисбалансу круги в партии соответствовали 1–3-му классу неуравновешенности массы.

Для высокопористых кругов одного рецептурного состава и типоразмера проведено исследование взаимосвязи звукового индекса и дисбаланса в пределах одной степени твердости. Корреляционным анализом установлено, что в пределах одной степени твердости значения звукового индекса и дисбаланс являются статистически независимыми характеристиками шлифовального круга (коэффициент парной корреляции 0,094). Это дает возможность оптимизировать или назначать

9.2. Показатели твердости высокопористых кругов

Звуковой индекс	Частота собственных колебаний, кГц		Глубина лунки, мм	
	Диапазон	Среднее	Диапазон	Среднее
31	1,44...1,49	1,46	5,7...5,8	5,75
33	1,5...1,54	1,52	5,5...5,7	5,6
35	1,55...1,62	1,58	5,3...5,4	5,35

эти параметры независимо друг от друга в соответствии с требованиями процесса шлифования.

В табл. 9.2 представлены результаты сопоставления твердости высокопористых кругов с характеристикой 99BA 100 G 12 V по частоте собственных колебаний и глубине лунки при выборочном контроле.

В результате статистической обработки данных была получена математическая модель, отражающая взаимосвязь звукового индекса и глубины лунки в пределах одной степени твердости BM2:

$$\ln \text{ЗИ} = 2,273 - 1,070 \ln h_{\text{л}}. \quad (9.1)$$

По коэффициенту корреляции, который в данном случае был равен 0,714, можно сказать, что внутри одной степени твердости между глубиной лунки и звуковым индексом существует некоторая ли-

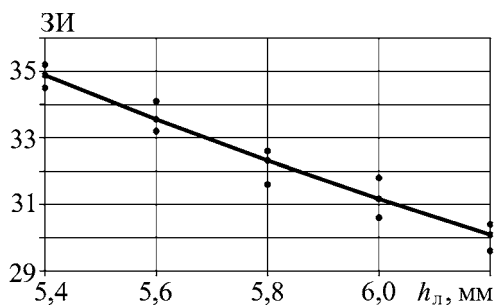


Рис. 9.4. Взаимосвязь звукового индекса и глубины лунки для партии высокопористых кругов с твердостью BM2

нейная зависимость. Другими словами, каждому значению глубины лунки в партии высокопористых кругов одного состава соответствует определенное значение звукового индекса.

На рис. 9.4 представлено графическое отображение математической модели (9.1) и показаны значения, полученные в ходе эксперимента.

Для выявления закономерностей распределения твердости по звуковому индексу и дисбаланса в партии высокопористого инструмента одного рецептурного состава результаты тестирования партии кругов были приведены к единому статистическому ряду, представляющему собой генеральную совокупность данных.

В ходе обработки статистических данных были построены гистограммы распределения твердости по звуковому индексу и дисбаланса в партии высокопористых кругов (рис. 9.5). Судя по характеру полученных зависимостей, эти распределения приближаются к нормальному закону.

Расчетная проверка сходимости теоретического и эмпирического закона распределений в обоих случаях подтвердила выдвинутую гипотезу.

Установленные закономерности показывают, что при изготовлении партии высокопористых кругов одного состава основная часть инструмента имеет сред-

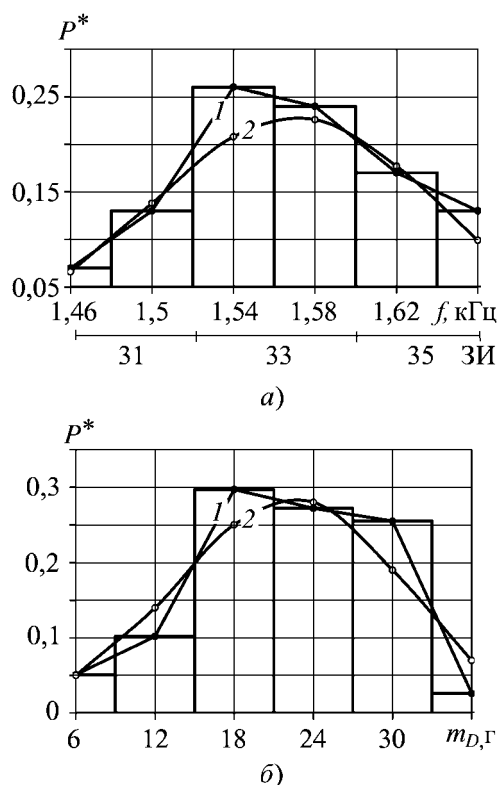


Рис. 9.5. Распределение звукового индекса (а) и дисбаланса (б) в партии высокопористых кругов:

1 – теоретическое; 2 – эмпирическое

нее значение звукового индекса, соответствующее прогнозируемой степени твердости, в данном случае это ЗИ 33. Остальные круги имеют либо меньшее, либо большее значение. Причем получение инструмента с тем или иным значением ЗИ имеет равную вероятность.

9.4. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГЛУБИННОГО ШЛИФОВАНИЯ

Целью исследований, которые проводились в заводских условиях, было сопоставление технических возможностей современного производства абразивного инструмента с выполнением повышенных требований к изготовлению ответственных деталей глубинным шлифованием.

Необходимо было найти компромисс между технологичностью и экономичностью производства высокопористых шлифовальных кругов и возможностью высокопроизводительной и высокоточной обработки деталей из жаропрочных никелевых сплавов.

В ходе проведенных экспериментальных исследований выполнен анализ влияния твердости (по звуковому индексу), неуравновешенности масс кругов, режимов шлифования и правки на динамическую напряженность и стабильность процесса профильного глубинного шлифования деталей из жаропрочных никелевых сплавов. В качестве универсального параметра, отражающего динамическую напряженность процесса, была принята токовая нагрузка на приводе главного движения станка. Кроме того, токовая нагрузка являлась определяющей характеристикой при сопоставлении результатов по производительности и качеству обработки при съеме больших припусков металла. Технологией обработки хвостовика лопаток обычно регламентируется допустимая токовая нагрузка и амплитуда колебаний, превышение которых, как правило, может привести к появлению шлифовочных дефектов (прижогов, микротрещин, и др.) на обработанной поверхности детали.

Взаимосвязанное влияние твердости и неуравновешенности масс кругов. Экспериментальные исследования проводились в два этапа. На первом этапе исследовали возможность использования шлифовальных кругов с более широким диапазоном твердости и дисбаланса, чем это регламентировано технологией изготовления хвостовиков турбинных лопаток. На втором этапе исследования были направлены на выявление зависимости токовой нагрузки от взаимного влияния характеристик высокопористых кругов и условий глубинного шлифования.

Исследования проводили в технологических условиях обработки хвостовиков турбинных лопаток газотурбинных двига-

телей на профилешлифовальном станке мод. SS013L фирмы Elb-Schliff и станке мод. ЛШ-220. В качестве обрабатываемых заготовок были выбраны образцы лопаток из наиболее распространенных марок жаропрочных сплавов ЖС6У, ЖС32-ВИ.

Токовую нагрузку на приводе главного движения измеряли при помощи встроенного амперметра на профилешлифовальном станке мод. SS013L или милливольтметра на станке мод. ЛШ-220. При испытаниях производили не только измерение токовой нагрузки, но и проводили мониторинг качества обработанной поверхности.

Правили круги прецизионными алмазными правящими роликами двумя методами – непрерывным врезанием на станке модели ЛШ-220 и периодически на станке модели SS013L.

Исследованный диапазон режимов глубинного шлифования составил: скорость круга 20...27 м/с; глубина шлифования 0,03...9,5 мм; скорость подачи стола 40...500 мм/мин.

В качестве охлаждения применяли СОТС на основе 1,5–2%-ного раствора эмульсола "Аминил-Б" или "Аквол-2".

Обработку поверхностей хвостовика проводили высокопористыми кругами, изготовленными по традиционной технологии на основе молотых фруктовых косточек с характеристикой 25А 12П ВМ2 12 К5 КФ40, и по новой технологии на основе невыгорающих наполнителей с характеристикой 99ВА 100 G 12 V (25А 12 ВМ2 12 К) трех типов: 1 500×25×203, 1 500×32×203, 1 500×40×203, которые имели ЗИ в диапазоне 29...35 и неуравновешенность масс 3...34 г.

Достаточно широкий диапазон исследованных характеристик инструмента по звуковому индексу и дисбалансу, а также параметрам режима обработки позволил выявить их влияние на выходные параметры процесса глубинного шлифования и определить требования к качеству

изготовления шлифовальных кругов.

Исследование влияния твердости и дисбаланса высокопористых кругов на токовую нагрузку проводили при профилном глубинном шлифовании хвостовиков лопаток из жаропрочного литейного сплава ЖС6У.

Для выявления зависимости динамической напряженности процесса глубинного шлифования от эксплуатационных свойств высокопористых кругов была произведена статистическая обработка полученных экспериментальных данных по токовой нагрузке для кругов с различным ЗИ и дисбалансом, изготовленных с использованием композиций из невыгорающих и выгорающих порообразующих наполнителей в виде микросфер.

Выполненный корреляционный анализ по выявлению степени влияния твердости и дисбаланса на токовую нагрузку при глубинном шлифовании показал, что значимое влияние на этот показатель оказывает твердость круга, в меньшей степени – неуравновешенность масс.

Статистической обработкой опытных данных получены математические модели зависимости токовой нагрузки от ЗИ и дисбаланса высокопористых шлифовальных кругов двух исследованных характеристик:

для круга с характеристикой
25А 12П ВМ2 12 К5 КФ40:

$$\ln I = 2,925 \ln \text{ЗИ} + 0,264 \ln m_D - 7,854, \quad (9.2)$$

для круга с характеристикой
99ВА 100 G 12 V:

$$\ln I = 2,803 \ln \text{ЗИ} + 0,189 \ln m_D - 7,614. \quad (9.3)$$

На рис. 9.6 представлен график зависимости токовой нагрузки при глубинном шлифовании сплава ЖС6У от твердости высокопористых шлифовальных кругов, изготовленных с различным рецептурным составом и комбинацией порообразующих наполнителей.

9.3. Показатели адекватности разработанных математических моделей

Модель	Коэффициенты корреляции с		КМК	F-отношение	Остаточная дисперсия
	ЗИ	m_D			
(9.2)	0,756	0,660	0,873	4,321	0,425
(9.3)	0,721	0,507	0,858	5,013	0,402

Зависимость получена по результатам обработки деталей из сплава ЖС6У на станке модели ЛШ-220 кругами с размерами 500×32×203, с дисбалансом по первому классу неуравновешенности масс на режиме шлифования: скорость круга 25 м/с, глубина обработки 9,5 мм, скорость подачи стола 40 мм/мин. Правку круга осуществляли профильным алмазным роликом с непрерывной подачей на врезание, равной 0,5 мкм/об. На графике (рис. 9.6) штриховой линией показано прогнозируемое изменение токовой нагрузки, которое было экстраполировано по моделям (9.2) и (9.3).

Обращает внимание факт, что круг с характеристикой 25А 12П ВМ2 12 К5 КФ40 с твердостью ЗИ 33 начинает работать в зоне критической токовой нагрузки (25 мВ), в которой существует большой риск появления шлифовочных дефектов. В связи с этим, применение высокопористых кругов на основе фруктовых косточек

с более высокой твердостью, чем ЗИ 33, на операции шлифования сплава ЖС6У с большой глубиной обработки недопустимо.

Объяснить это можно тем, что традиционная технология изготовления шлифовальных кругов, в том числе и высокопористых на основе выгорающих поробразователей, предусматривает повышение твердости за счет увеличения содержания керамической связки. При высокотемпературном обжиге выгорание фруктовых косточек и образование открытых пор происходит значительно раньше, чем процесс плавления связки. В дальнейшем расплавленная связка заполняет образовавшиеся поры и, чем больше ее содержание, тем меньше становится фактическая пористость шлифовального круга, что приводит к ухудшению режущих свойств инструмента, увеличению сил трения и, следовательно, к повышению динамической напряженности процесса.



Рис. 9.6. Токовая нагрузка при глубинном шлифовании сплава ЖС6У высокопористыми кругами с характеристикой: 1 – 25А 12П ВМ2 12 К5 КФ40; 2 – 99ВА 100 G 12 V

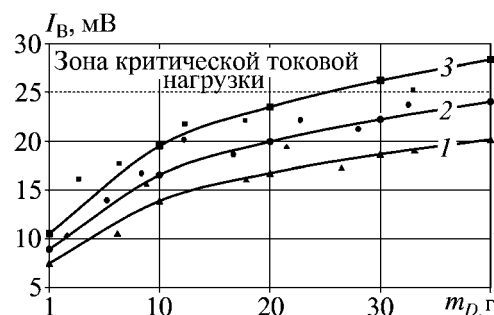


Рис. 9.7. Зависимость токовой нагрузки от дисбаланса высокопористых шлифовальных кругов с твердостью: 1 – ЗИ31; 2 – ЗИ33; 3 – ЗИ35

По новой технологии изготовления высокопористого инструмента предусматривается изменение твердости посредством комбинации по количеству и составу различных невыгорающих наполнителей, укрепляющих мостики связки. С повышением твердости сохраняется заданная пористость шлифовального круга. Поэтому у высокопористого круга с характеристикой 25А 12П ВМ2 12 К диапазон возможного изменения твердости по ЗИ существенно больше, что позволяет использовать на ответственных операциях глубинного шлифования инструмент с твердостью до ЗИ 35. Более высокая твердость обеспечивает и более высокую износостойкость инструмента и, соответственно, уменьшение его расхода.

При обработке деталей из сплава ЖС6У кругами 1 500×40×203 было изучено влияние дисбаланса кругов на токовую нагрузку. Обработка велась на скорости 20 м/с в два прохода: на 1-м проходе скорость подачи стола составляла 100 мм/мин, а глубина шлифования 2,7 мм, на 2-м проходе эти параметры соответственно были равны 500 мм/мин и 0,03 мм.

На рис. 9.7 показан график зависимости токовой нагрузки от дисбаланса при шлифовании высокопористыми кругами различной твердости. Зависимость получена для обработки с глубиной шлифования 2,7 мм и скоростью подачи стола 100 мм/мин. Из рис. 9.7 видно, что с увеличением твердости круга и дисбаланса происходит рост динамической напряженности процесса. При обработке высокопористыми кругами с твердостью от ЗИ 31 до ЗИ 35 и дисбалансом до 40 г токовая нагрузка находится ниже либо в пределах зоны, допустимой технологией.

Наименьшую токовую нагрузку обеспечивают шлифовальные круги с твердостью ЗИ 31 и дисбалансом по 1–3-му классу неуравновешенности масс, а также круги с твердостью ЗИ 33 и ЗИ 35, изготовленные по 1–2-му классу. Применение шлифовального круга с твердостью ЗИ 35

и дисбалансом, соответствующим 3-му классу неуравновешенности, может привести к выходу токовой нагрузки за пределы, допустимые технологией.

Влияние на токовую нагрузку параметров режимов глубинного шлифования и правки изучалось при обработке жаропрочного сплава марки ЖС6У высокопористыми шлифовальными кругами одной характеристики – 99ВА 100 G 12 V.

Статистической обработкой экспериментальных данных получены математические модели зависимости токовой нагрузки от исследуемых параметров, из которых были выбраны две наиболее показательные для случая обработки хвостовика лопатки кругами с размерами 500×32×203 мм, твердостью ЗИ 35 и дисбалансом 27 г (2 класс неуравновешенности масс):

$$\ln I_b = 2,282 + 0,177 \ln t + 0,183 \ln v_{ct} - 0,240 \ln S_p, \quad (9.4)$$

$$\ln I_b = 0,407 \ln Q_m - 0,327 \ln S_p - 0,780. \quad (9.5)$$

При этом глубина резания за проход изменялась от 0,07 до 9,5 мм, скорость подачи стола от 40 до 200 мм/мин, а радиальная подача правки круга от 0,2 до 0,5 мкм/об.

Корреляционным анализом установлено, что на токовую нагрузку параметры режима глубинного шлифования и правки оказывают практически одинаково сильное влияние, которое отражено коэффициентами парной корреляции – для глубины шлифования 0,982, скорости подачи стола 0,953 и радиальной подачи ролика 0,937. Такая картина объясняется тем, что при изменении глубины резания и скорости подачи в достаточно широком диапазоне происходят качественные изменения процесса стружкообразования, связанные с изменением длины дуги контакта абразивного круга с заготовкой и количеством одновременно режущих зерен, что, безус-

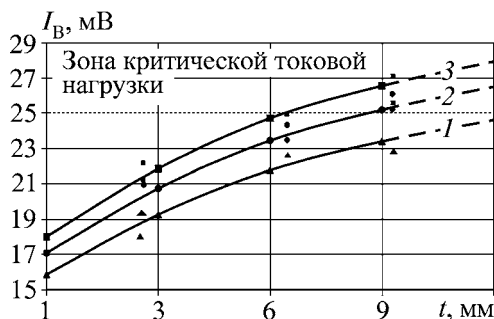


Рис. 9.8. Зависимость токовой нагрузки от глубины резания при глубинном шлифовании со скоростью подачи стола: 1 – 40 мм/мин; 2 – 60 мм/мин; 3 – 80 мм/мин

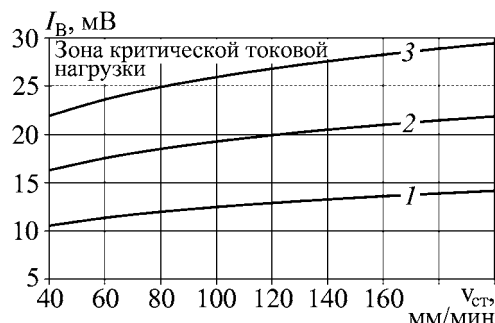


Рис. 9.9. Зависимость токовой нагрузки от скорости подачи стола при шлифовании с глубиной резания: 1 – 0,1 мм; 2 – 1 мм; 3 – 10 мм

ловно, приводит к изменению силы резания и соответственно мощности шлифования, фиксируемой как токовая нагрузка на шпинделе. При варьировании величины правки происходит в различной степени регенерация режущих свойств шлифовального круга, что также оказывает влияние на динамическую напряженность процесса глубинного шлифования.

По модели (9.4) можно оценить степень дифференцированного влияния глубины резания t , скорости подачи стола $v_{ст}$ и радиальной подачи правки S_p , а по модели (9.5) – обобщенное влияние t и $v_{ст}$ через скорость съема материала Q_m с соответствующим изменением S_p .

Для стабильной и бездефектной работы шлифовального круга существует оптимальная комбинация параметров режима шлифования и правки. Так, например, из графиков на рис. 9.8 и 9.9 видно, что при шлифовании с глубиной резания более 10 мм за проход, скорость подачи стола не должна превышать 40...50 мм/мин, а величина непрерывной правки круга при соответствующем для этого режима шлифования минутном съеме $Q_m \approx 8500 \text{ мм}^3/\text{мин}$ не менее 0,4 мкм/об (рис. 9.10). При этом токовая нагрузка находится в допустимых пределах, обеспечивает стабильность

процесса и требуемое качество обработанной поверхности.

На представленных графиках показаны линеаризованные зависимости, полученные расчетом по моделям (9.4) и (9.5), что позволило экстраполировать возможные результаты шлифования на более широкий диапазон параметров режима обработки.

На втором этапе исследований был выполнен анализ совместного влияния параметров характеристики высокопористых кругов и условий глубинного шлифования на токовую нагрузку.

Данные, полученные при обработке деталей из сплавов ЖС6У и ЖС32-ВИ на профилешлифовальном станке модели SS013L, позволили получить обобщенную математическую модель, отражающую зависимость токовой нагрузки от режимов глубинного шлифования и правки, твердости шлифовального круга, дисбаланса, а также предела прочности обрабатываемого сплава:

$$\ln I_B = 0,197 v_{ст} + 0,252 \ln t + 0,085 \ln B - 0,236 \ln v_{кр} - 0,036 \ln S_p + 2,866 \ln \text{ЗИ} + 0,352 \ln \sigma_B + 0,143 \ln m_D - 8,834. \quad (9.6)$$

Корреляционным анализом установлено, что среди параметров режима глы-

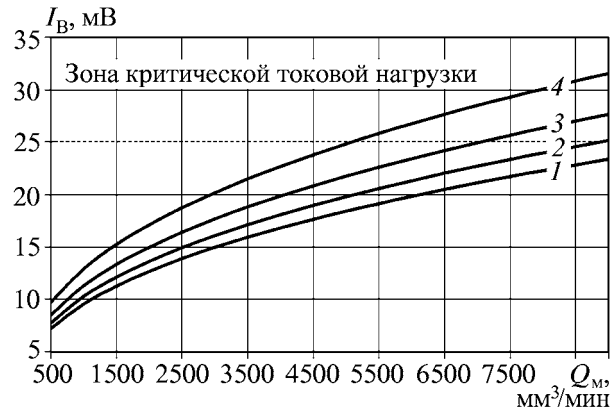


Рис. 9.10. Зависимость токовой нагрузки от минутного съема при глубинном шлифовании для различных значений радиальной подачи правки:
1 – 0,5 мкм/об; 2 – 0,4 мкм/об; 3 – 0,3 мкм/об; 4 – 0,2 мкм/об

бинного шлифования наибольшее влияние на токовую нагрузку оказывает глубина обработки t (коэффициент корреляции 0,686), в меньшей степени – скорость подачи стола $v_{ст}$ (–0,464), скорость круга $v_{кр}$ (0,076) и ширина шлифования B (0,031). Достаточно сильное влияние оказывает твердость шлифовального круга $ЗИ$ (0,298) и радиальной подачи правящего ролика S_p (0,389), в меньшей степени дисбаланс круга m_D (0,128) и предел прочности обрабатываемого сплава σ_b (0,094).

На рис. 9.11 показан график зависимости токовой нагрузки от скорости подачи стола при глубинном



Рис. 9.11. Зависимость токовой нагрузки от скорости подачи стола при глубинном шлифовании сплавов:
1 – ЖС-32; 2 – ЖС-6У

дачи стола при обработке высокопористыми кругами с характеристикой 99ВА 100 G 12 V (твердость по звуковому индексу 31...35, дисбалансом 18...29 г) сплавов ЖС6У и ЖС32-ВИ с глубиной шлифования 2,7 мм при скорости круга 25 м/с.

Модель (9.6) может быть полезна для предварительного прогноза об уровне динамической напряженности процесса глубинного шлифования хвостовиков турбинных лопаток на этапе его проектирования.

Из полученной модели следует (см. рис. 9.11), что при глубинном шлифовании сплавов ЖС6У и ЖС32-ВИ с одинаковой производительностью наибольшая токовая нагрузка достигается при обработке сплава ЖС6У высокопористыми кругами с твердостью по звуковому индексу 35 и при скорости подачи стола 140 мм/мин. Значение нагрузки в этом случае приближается к максимально допустимой.

Экспериментальными исследованиями установлено, что высокопористые шлифовальные круги, изготовленные на основе невыгорающих порообразователей, при глубинном шлифовании жаропрочных сплавов обеспечивают меньшую динамическую напряженность процесса

9.4. Условия глубинного шлифования елочного профиля хвостовиков турбинных лопаток

Номер прохода	$S_{кр}$, мм	$v_{кр}$, м/с	$v_{ст}$, мм/мин	Величина правки, мм
1	2,2	20	500	0,15
2	1,6	20	500	—
3	1,0	20	500	0,15
4	0,6	20	500	—
5	0,4	20	500	0,15
6	0,25	20	500	—
7	0,15	20	500	0,05
8	0,1	20	500	0,05
9	0,06	20	500	0,05
10	0,03	20	600	0,05
11	0,015	20	600	0,05
12	0,007	20	800	0,05
13	0,002	20	800	—
14	0	25	1000	—

(по токовой нагрузке) и имеют резерв для повышения производительности обработки в сравнении с высокопористыми кругами, изготовленными по традиционной технологии с использованием фруктовых косточек.

Установлено, что твердость по звуковому индексу высокопористого круга оказывает существенное влияние на токовую нагрузку. Причем у высокопористых кругов с невыгорающими порообразователями это влияние менее значимо, чем у кругов с открытой пористостью, изготовленных с добавлением молотых фруктовых косточек.

Дисбаланс круга оказывает меньшее, чем его твердость, влияние на токовую нагрузку. Однако в сочетании с твердостью это влияние усиливается. Установлено, что использование высокопористых кругов с дисбалансом до 40 г в пределах твердости по ЗИ 31...33 обеспечивают токовую нагрузку, не превышающую допустимую технологией. Применение

шлифовального круга с твердостью по ЗИ 35 и дисбалансом свыше 25 г может привести к выходу токовой нагрузки за границы допустимой.

Сравнительный анализ высокопористых кругов различных производителей. На ОАО "Пермский моторный завод" под руководством В.Ф. Макарова проведено исследование процесса профильного глубинного шлифования елочного профиля хвостовиков турбинных лопаток ГТД высокопористыми кругами, изготовленными по технологии, разработанной автором, и инструмента пяти фирм-производителей [12].

В табл. 9.4 приведены условия глубинного шлифования елочного профиля хвостовиков турбинных лопаток ГТД из сплава ЧС-70 на станке SS013L.

В ходе сравнительных исследований в одинаковых условиях производилось измерение износа кругов и оценка их режущей способности, а также токовой нагрузки на приводе главного движения

9.5. Износ шлифовальных кругов

Производитель	Типоразмер; характеристика	Поверхность замка со стороны	Радиальный износ круга после проходов, мм		
			2-го	4-го	6-го
Tyrolit	1 500×25×203; 89A 100 IH 10 AV2	Корыта пера	0,08	0,04	0
		Спинки пера	0,04	0,02	0
МГТУ "Станкин"	1 500×25×203; 99BA 100 G 12 V	Корыта пера Спинки пера	Износ не зафиксирован		
ОАЗ	1 500×25×203; 25A12T163ИЗ3К	Корыта пера	0,07	0,03	0
		Спинки пера	0,03	0	0
"Экси"	1 500×25×203; 24A 12H 3ИЗ1 12 К	Корыта пера	0,32	0,2	0,06
		Спинки пера	0,2	0,06	0
"Ильич"	1 500×25×203; 25A10П 3ИЗ3 10 К	Корыта пера	0,08	0,03	0
		Спинки пера	0,03	0	0
Atlantic	1 500×25×203; ЕК1 100В-Д11WVY	Корыта пера Спинки пера	Износ не зафиксирован		

станка. Износ кругов определяли при шлифовании после второго, четвертого и шестого проходов, измеряя разницу между требуемым и фактическим размером профиля. Результаты измерений износа приведены в табл. 9.5.

Измеренные значения токовой нагрузки при шлифовании различными высокопористыми кругами приведены в табл. 9.6.

После обработки елочного профиля хвостовика лопаток ГТД в одинаковых условиях параметр шероховатости поверхности зуба во всех случаях составил $Ra = 0,61...0,67$ мкм, а степень наклепа $33,7...53,4$ % с глубиной проникновения $10...30$ мкм. Причем наименьшее упрочнение по значению микротвердости имели поверхности, обработанные новым высокопористым кругом (530...555 НВ) со степенью наклепа $39,1...43,1$ % и глубиной проникновения 15 мкм. Несколько большая глубина наклепа отмечена после

обработки кругами Опытного абразивного завода (ОАЗ, г. Санкт-Петербург), фирмы Atlantic и ОАО "Завод "Ильич". После обработки кругом фирмы Atlantic микротвердость, глубина и степень наклепа имели наибольшие значения.

Сравнительный анализ показал, что наибольшие сжимающие напряжения до 600 МПа, залегающие в поверхностном слое на глубине $5...10$ мкм, наблюдаются после глубинного шлифования кругами фирм Atlantic и Tyrolit. Наименьшие – до $200...250$ МПа – после обработки кругами ОАЗ и ОАО "Завод "Ильич".

После обработки кругами, изготовленными с использованием невыгорающих порообразователей, сжимающие напряжения достигают $450...500$ МПа, глубина залегания $5...10$ мкм. Точка перехода сжимающих напряжений в растягивающие находится на глубине $35...40$ мкм от поверхности.

9.6. Токовая нагрузка при глубинном шлифовании елочного профиля замков лопаток турбин

Характеристика круга, изготовитель	Проход	Сторона замка*	Токовая нагрузка, А, при глубине резания, мм											
			0,6				0,04				0,005			
			Номер лопатки				Номер лопатки				Номер лопатки			
			1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
A99B 100G 12 V, МГТУ "Станкин"	1	в н	80	50	60	70	10	10	12	12	14	7,5	8	8
	2	в н	50	70	80	80	12	15	15	10	10	10	10	10
ЕК 100В Д11 WVV 357, Atlantic	1	в н	75	90	85	80	10	10	11,5	12,5	6	6	6	6,5
	2	в н	60	80	85	87	7,5	7,5	10	10	8	8	9	9
89А 1001Н 10А V, Tyrolit	1	в н	45	70	70	60	10	11	12,5	14	6	6	6,5	7
	2	в н	75	75	80	65	10	11	14	15	6	6	6	6
25А 12Т 3И33 16 К35, ОАЗ	1	в н	50	50	50	50	10	10	12	12	8	8	9	10
	2	в н	50	50	50	75	10	10	10	12	6	6	6	6
24А 12Н 3И 31 12 К13, "Экси"	1	в н	50	50	65	50	10	10	12	12	5,5	5,5	5,5	5,5
	2	в н	40	45	45	45	10	11	12,5	13	5	5	5	5

* в — верх; н — низ.

Исследование микроструктуры поверхностей замков лопаток показало, что изменений в микроструктуре у поверхности не обнаружено. Отмечено, что на лопатках, обработанных кругами ОАЗ и фирмы Tyrolit, наблюдаются "задиры" на поверхности.

Усталостные испытания обработанных лопаток по замковой части проводились на воздушно-пульсирующем стенде ВПС-35 при колебаниях по первой изгибной форме с симметричным циклом нагружений. Базовое число циклов составило $20 \cdot 10^6$.

Результатами испытаний на сопротивление усталости установлено, что хвостовики лопаток, обработанные высокопористыми кругами на основе невыгорающих порообразователей в виде микросфер обеспечили предел выносливости в 110 МПа, что заметно (по этой эксплуатационной характеристике) – до 22 % выше, чем инструментом, изготовленным по другим технологиям.

Высокопористые круги с невыгорающими порообразователями по совокупности полученных результатов являются наиболее оптимальным инструментом, отвечающим всем требованиям производства для операций глубинного шлифования хвостовиков лопаток [12].

9.5. ПРИМЕРЫ ГЛУБИННОГО ШЛИФОВАНИЯ ХВОСТОВИКОВ ТУРБИННЫХ ЛОПАТОК

Оценка эффективности применения высокопористых кругов, изготовленных по новой технологии, проводилась на операциях профильного глубинного шлифования поверхностей хвостовика лопаток газотурбинных двигателей и газоперекачивающих установок на различных предприятиях.

Обработка елочного профиля хвостовика лопаток является наиболее ответственной и сложной операцией глубинного шлифования (рис. 9.12). С одной

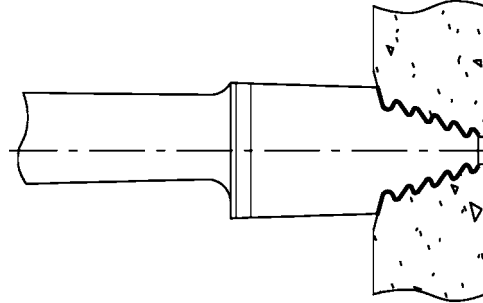


Рис. 9.12. Шлифование елочного профиля хвостовика турбинной лопатки

стороны, необходимо в условиях периодической правки круга обеспечить формирование профиля с требуемой точностью на всех одновременно обрабатываемых заготовках. С другой стороны, большая площадь контакта шлифовального круга с обрабатываемой поверхностью в сочетании с неоднородным характером нагружения в различных точках сечения создают особенно неблагоприятные условия работы круга, что увеличивает риск получения дефектов обработки. На этой операции предъявляются более жесткие требования к режущим свойствам высокопористых шлифовальных кругов, режиму шлифования и условиям правки инструмента, чем на других операциях обработки хвостовика лопатки.

Глубинное шлифование елочного профиля хвостовика осуществлялось кругами типоразмера 1 500×25×203 на станке модели SS013 фирмы Elb-Schliff. Обработывались лопатки ГТД из сплавов ЖС6У, ЖС26-ВИ, ЖС32-ВИ, ЧС-70. Шлифование проводилось с охлаждением СОТС – 1,5%-ный раствор "Аквол-2". Периодическая правка осуществлялась прецизионными алмазными роликами.

Токовую нагрузку на приводе верхнего (X) и нижнего (Y) шпинделей измеряли при помощи встроенных амперметров. После обработки лопаток проверяли точность размеров, производили визуальный контроль прижогов на поверхности профиля. В табл. 9.7 представлены харак-

9.7. Характеристики процесса глубинного шлифования елочного профиля хвостовика кругами 99BA 100 G 12 V (ЗИ 33)

Параметры режима	Номер прохода		
	1	2	3
Скорость круга, м/с	25	25	30
Скорость подачи стола, мм/мин	120	150	200
Глубина резания, мм	1,98	0,07	0,05
Скорость правящего ролика, м/с	20,6	20,6	Без правки
Величина правки, мм	0,15	0,15	
Токовая нагрузка, А (допустимая)	55...57 (80)	19...21 (30)	12 (19)

теристика процесса глубинного шлифования елочного профиля хвостовика лопаток ротора турбины низкого давления из сплава ЖС6У высокопористыми кругами с характеристикой 99BA 100 G 12 V с твердостью по звуковому индексу ЗИ 33.

В ходе обработки токовая нагрузка не превышала значений допустимых технологией. Контроль точности замка лопатки после обработки показал, что все размеры соответствуют требованию чертежа детали, их отклонения находятся в пределах допуска. Прижога на поверхности профиля замка не обнаружено. Люминесцентным контролем микротрещин и сколов на обработанных поверхностях лопаток не выявлено.

На указанной операции проводилось сравнение нового инструмента со шлифовальными кругами фирмы Tyrolit с характеристикой 89A 100 2G 11 A V237 P25.

В аналогичных условиях шлифования круги фирмы Tyrolit обеспечивали токовую нагрузку 60, 20 и 15 А соответственно на 1, 2 и 3-м проходах, что на 10...25 % выше, чем при обработке новыми кругами с твердостью ЗИ 33.

По результатам исследований были разработаны математические модели в

виде логарифмических полиномов, отражающие зависимость токовой нагрузки от режимов глубинного шлифования высокопористыми кругами фирмы Tyrolit и новым инструментом:

для высокопористых кругов фирмы Tyrolit

$$\ln I = 2,066 + 0,384 \ln t + 0,357 \ln v_{\text{ст}}, \quad (9.7)$$

для новых высокопористых кругов

$$\ln I = 2,758 + 0,331 \ln t + 0,216 \ln v_{\text{ст}}. \quad (9.8)$$

На рис. 9.13 показан график зависимости токовой нагрузки от скорости подачи стола при глубинном шлифовании елочного профиля хвостовика лопаток из сплава ЖС6У высокопористыми кругами фирмы Tyrolit и новым инструментом. Обращает внимание, что при шлифовании новыми кругами степень влияния на токовую нагрузку глубины и скорости подачи стола в исследованном диапазоне меньше, чем при обработке кругами фирмы Tyrolit. Это создает предпосылки для возможного форсирования режима глубинного шлифования при сохранении исходной токовой нагрузки.



Рис. 9.13. Зависимость токовой нагрузки от скорости подачи при глубинном шлифовании хвостовика лопаток ГТД высокопористыми кругами:
 1 – 89A 100 2G 11 A V237 P25;
 2 – 99BA 100 G 12 V

После глубинного шлифования двумя типами высокопористых кругов было проведено исследование остаточных напряжений в поверхностном слое елочного профиля замка рабочих лопаток. Остаточные напряжения определялись по методу Давиденкова на приборе "ПИОН-2М".

Результаты исследований остаточных напряжений в поверхностном слое замка со стороны спинки и корыта показали, что их значения на замке лопаток, обработанных кругами с характеристикой 99BA 100 G 12 V, более подходят к рекомендуемым технологией значениям ($\sigma_{сж} = 500...650$ МПа, $\sigma_{раст} = 100...150$ МПа), чем остаточные напряжения на лопатках, шлифованных кругами фирмы Tyrolit. На поверхности лопаток, обработанных кругами Tyrolit, максимальные напряжения сжатия на глубине 2 мкм находятся в пределах 186...503 МПа, максимальные напряжения растяжения – 46...171 МПа. Глубина залегания напряжений сжатия от 30 до 150 мкм. На лопатках, шлифованных новыми кругами, напряжения сжатия достигают максимальной величины 392...640 МПа, напряжения растяжения – 22...133 МПа (рис. 9.14).

Исследование остаточных напряжений в поверхностном слое зуба елочного профиля хвостовика лопатки ротора тур-

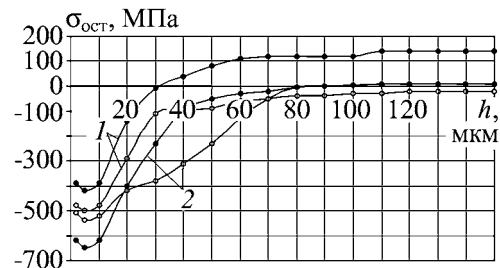


Рис. 9.14. Остаточные напряжения в поверхностном слое зуба елочного профиля после глубинного шлифования высокопористыми кругами:
 1 – 89A 100 2G 11 A V237 P25;
 2 – 99BA 100 G 12 V (● – со стороны спинки, ○ – со стороны корыта)

бины высокого давления из сплава ЖС6У проведено также после глубинного шлифования новыми высокопористыми кругами и аналогами, изготовленными на основе фруктовых косточек с характеристикой 25A 12П BM2 12 K5 KФ40 (твердость ЗИ 31). При этом обработка поверхности замка производилась за три прохода при скорости 25 м/с, глубине резания 2,3...0,07 мм и скорости подачи 120...200 мм/мин.

Как видно из рис. 9.15, значение остаточных напряжений сжатия в поверхностном слое замка, обработанного высокопористыми кругами 25A 12П BM2 12 K5 KФ40, ниже рекомендованных параметров и составляет 440 МПа. В дальнейшем на-

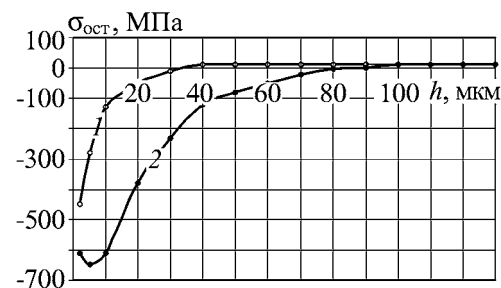


Рис. 9.15. Распределение остаточных напряжений в поверхностном слое зуба елочного профиля хвостовика турбинной лопатки после обработки высокопористыми кругами:
 1 – 25A 12П BM2 12 K5-KФ40;
 2 – 99BA 100 G 12 V

9.8. Параметры режимов глубинного шлифования, правки круга и токовая нагрузка при обработке елочного профиля хвостовика турбинной лопатки

Параметр		1-й проход			2-й проход			3-й проход		
Скорость круга, м/с		25			25			25		
Скорость подачи стола, мм/мин		120			150			200		
Глубина резания, мм		2,3			0,15			0,07		
Скорость правящего ролика, м/с		20,6			20,6			20,6		
Величина правки, мм		0,15			0,15			0,15		
Токовая нагрузка, А	X	60	60	63	18	21	24	15	18	18
	Y	60	63	69	21	24	24	15	18	18

блюдается их изменение и переход на глубину 32...34 мкм в растягивающие напряжения, величина которых составляет 22 МПа.

При глубинном шлифовании елочного профиля лопаток турбины высокого давления из сплава ЖС6У на режимах, указанных в табл. 9.8, проведен анализ динамики изменения токовой нагрузки на приводе верхнего (X) и нижнего (Y) шпинделей по проходам от первой к третьей лопатке, обрабатываемых за одну операцию. В таблице в качестве примера приведены данные по токовой нагрузке для высокопористого круга с характеристикой 99BA 100 G 12 V (твердость ЗИ 35).

Отмечено, что на всех проходах при обработке за одну операцию трех лопаток токовая нагрузка изменяется в сторону увеличения (до 15...30 %) от первой к третьей лопатке. Однако во всех случаях фактическая нагрузка оставалась ниже

допустимой, при которой возможно появление дефектов шлифовочного характера.

Контроль точности размеров после обработки показал, что все размеры соответствуют требованию чертежа детали, их отклонения находятся в пределах допуска. Прижоги на поверхности профиля замка не обнаружено. При люминесцентном контроле хвостовиков лопаток микротрещин и сколов на обработанных поверхностях не выявлено.

Аналогичные результаты по размерной стойкости инструмента и качеству обработанной поверхности при одновременном шлифовании трех лопаток кругами фирмы Tyrolit обеспечиваются только при скорости подачи стола на 1-м проходе – 70 мм/мин, на 2-м – 90 мм/мин, на 3-м проходе – 130 мм/мин, т.е. при производительности процесса на 60 % меньше, чем при использовании нового инструмента.

9.9. Режимы глубинного шлифования и правки круга при обработке елочного профиля хвостовика лопатки

Параметр	1-й проход	2-й проход
Скорость круга, м/с	25	
Скорость подачи стола, мм/мин	50	200
Глубина резания, мм	1,5	0,06
Скорость алмазного ролика, м/с	20,6	
Величина правки, мм	0,23	

9.10. Токовая нагрузка при глубинном шлифовании елочного профиля хвостовика лопатки

Проходы		Токовая нагрузка, А, для круга характеристики					
		89А 100 2G 11 А V237 P25			99ВА 100 G 12 V		
		Номер лопатки			Номер лопатки		
		1	2	3	1	2	3
1-й проход	X	24	24	27	21	24	24
	Y	21	24	27	21	21	24
2-й проход	X	9	9	9	9	9	9
	Y	8	9	8	8	8	9

Обработку елочного профиля хвостовиков лопаток из сплава ЖС26-ВИ производили на режимах, указанных в табл. 9.9. При этом проводили сравнение токовой нагрузки при обработке шлифовальными кругами фирмы Tyrolit и новым инструментом.

Как следует из результатов, представленных в табл. 9.10, при работе высокопористым кругом с характеристикой 99ВА 100 G 12 V характер изменения и значения токовой нагрузки аналогичны кругу 89А 1002G 11 А V237 P25 (фирмы Tyrolit), а в некоторых случаях меньше – до 12...15 %.

Следы прижогов на шлифованных поверхностях во всех случаях с помощью люминесцентного контроля выявлены не были.

Дополнительно на этой операции было проведено исследование возможности сокращения величины правки шлифовального круга, что позволило бы умень-

шить расход инструмента. Обычно при обработке кругами фирмы Tyrolit глубина врезания правящего ролика за цикл правки составляет 0,23 мм. При обработке новыми кругами это значение было уменьшено до 0,15 мм, что привело к росту токовой нагрузки (табл. 9.11).

Проведенные исследования показали, что уменьшение величины правки на 65 % приводит к незначительному увеличению токовой нагрузки (в некоторых случаях до 10...12 %), что, однако, не превышает значений, полученных при обработке кругами фирмы Tyrolit.

Контроль точности размеров после обработки показал, что все размеры соответствуют требованию чертежа детали, их отклонения находятся в пределах допуска. Прижогов на поверхности профиля замка не обнаружено. При люминесцентном контроле лопаток микротрещин и сколов на обработанных поверхностях не выявлено.

9.11. Токовая нагрузка при глубинном шлифовании елочного профиля кругами при измененной величине правки

Проходы		Токовая нагрузка, мВ, для лопатки		
		1	2	3
1-й проход	X	24	24	27
	Y	21	21	24
2-й проход	X	9	9	9
	Y	8	9	9

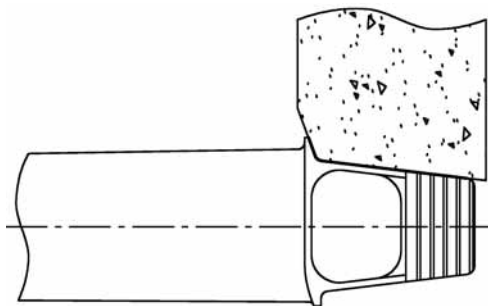


Рис. 9.16. Глубинное шлифование торца хвостовика турбинной лопатки

Глубинное шлифование торцов и основания хвостовика лопаток турбин ГТД производилось кругами типоразмеров 1 500×40×203 и 1 500×32×203 на одношпиндельном шлифовальном станке с ЧПУ модели ЛШ-220 (рис. 9.16, 9.17).

Обрабатываемый материал: жаропрочные сплавы ЖС6У и ЖС32-ВИ, ЦНК7-РС. Шлифование проводилось с охлаждением СОТС – 1,5...2 % раствор эмульсола "Аминил-Б" – подаваемым под давлением 0,5 МПа с расходом 180 л/мин.

В табл. 9.12 представлены условия глубинного шлифования основания хвостовика лопаток из сплава ЖС6У, а в табл. 9.13 приведены результаты измере-

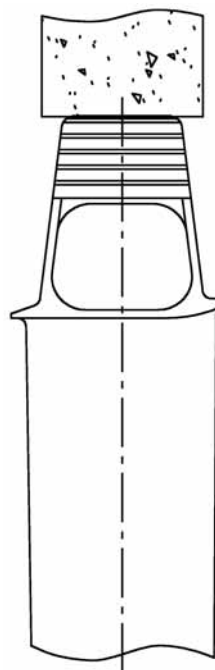


Рис. 9.17. Глубинное шлифование основания хвостовика турбинной лопатки

ния токовой нагрузки по вариантам шлифования, при которых скорость подачи стола изменялась в пределах, допустимых технологией: на первом проходе от 60 до

9.12. Режимы глубинного шлифования основания хвостовика лопаток и правки круга

Параметр	1-й проход	2-й проход
Скорость круга, м/с	20	
Скорость подачи стола, мм/мин	100	500
Глубина резания, мм	2,7	0,03
Скорость алмазного ролика, м/с	20	Без правки
Подача ролика, мкм/об	0,4	
Токовая нагрузка, мВ	13...17	6...7

**9.13. Токовая нагрузка при глубинном шлифовании
основания хвостовика**

Параметр	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
Скорость круга, м/с	25		
Скорость подачи стола, мм/мин	80	80	60
Глубина резания, мм	2,7	2,7	2,7
Скорость правящего ролика, м/с	20		
Подача ролика, мкм/об	0,4	0,3	0,2
Токовая нагрузка, мВ	12	16	12

80 мм/мин, а подача правящего ролика от 0,4 до 0,2 мкм/об.

Испытания показали, что на указанной операции возможна обработка на максимальной скорости подачи стола, допускаемой технологией, при одновременном уменьшении расхода инструмента в 2 раза.

В табл. 9.14 и 9.15 приведены условия профильного глубинного шлифования переднего торца хвостовика лопаток турбин низкого и высокого давления из сплавов ЖС6У и ЖС32-ВИ и токовая нагрузка на приводе главного движения при обработке высокопористыми кругами на основе невыгорающих порообразователей.

**9.14. Режимы обработки, правки шлифовального круга и
токовая нагрузка при глубинном шлифовании переднего торца хвостовика
лопатки из сплава ЖС6У**

Параметр	1-й проход	2-й проход	3-й проход
Скорость круга, м/с	25	25	25
Скорость подачи стола, мм/мин	40	70	200
Глубина резания, мм	9,5	0,93	0,07
Скорость алмазного ролика, м/с	20	20	20
Подача ролика, мкм/об	0,5	0,4	0,2
Токовая нагрузка, мВ	23	15	7

**9.15. Режимы обработки, правки шлифовального круга и
токовая нагрузка при глубинном шлифовании переднего торца хвостовика
лопатки ЖС32-ВИ**

Параметр	1-й проход	2-й проход	3-й проход	4-й проход
Скорость круга, м/с	25			
Скорость подачи стола, мм/мин	40	65	80	150
Глубина резания, мм	6	2,9	1,0	0,1
Скорость алмазного ролика, м/с	20			
Подача ролика, мкм/об	0,5	0,4	0,3	0,2
Токовая нагрузка, мВ	23	20	15	10

С целью сокращения расхода абразивного материала на этой операции была проверена возможность уменьшения величины непрерывной правки. Результаты приведены в табл. 9.16. Основными критериями оценки эффективности процесса шлифования при этом являлось изменение токовой нагрузки, наличие прижогов на поверхности и точность размеров обработанного профиля. Выполняя технологиче-

ские требования к операции шлифования, новый инструмент дает возможность уменьшить расход его до 70 % за счет уменьшения величины его непрерывной правки.

Режимы шлифования, правки круга при обработке заднего торца замка лопатки из сплава ЖС6У, а также значения токовой нагрузки представлены в табл. 9.17.

**9.16. Величины правки круга и токовая нагрузка
при глубинном шлифовании переднего торца хвостовика турбинной лопатки
из сплава ЖС32-ВИ**

Номер прохода	Применяемый режим		Новый режим	
	$S_{\text{роль}}$, мкм/об	I , мВ	$S_{\text{роль}}$, мкм/об	I , мВ
1-й	0,5	17...20	0,3	22...25
2-й	0,4	20...23	0,3	23...25
3-й	0,3	18...20	0,2	20...22
4-й	0,2	9...10	0,2	9...10

9.17. Режимы глубинного шлифования, правки круга при обработке заднего торца хвостовика лопатки из сплава ЖС6У и токовая нагрузка

Параметр	1-й проход	2-й проход
Скорость круга, м/с	25	
Скорость подачи стола, мм/мин	80	200
Глубина резания, мм	1,0	0,05
Скорость ролика, м/с	20	
Подача ролика, мкм/об	0,4	0,1
Токовая нагрузка, мВ	18	8

На указанной операции была проверена возможность форсирования режимов обработки и уменьшения величины правки. При этом было опробовано несколько вариантов и комбинаций режимов. Скорость подачи стола на первом проходе изменялась от 80 до 120 мм/мин и от 200 до 300 мм/мин на втором проходе, подача правящего ролика от 0,4 до 0,2 мкм/об и от 0,1 до 0,05 мкм/об соответственно. В технологии предусмотрена скорость подачи стола соответственно 80 и 200 мм/мин, а величина правки – 0,4 и 0,1 мкм/об.

Результаты измерения токовой нагрузки для одной из наиболее показательных комбинаций приведены в табл. 9.18.

По результатам проведенных испытаний можно сделать вывод, что круги на основе невыгорающих порообразователей позволяют при одновременном повышении скорости стола в 1,5 раза сократить расход инструмента в 2 раза. При этом токовая нагрузка, качество обработанной поверхности и точность профиля соответствуют требованиям директивной технологии завода и чертежа детали.

9.18. Токовая нагрузка при шлифовании заднего торца хвостовика лопатки при изменении режимов обработки и правки круга

Параметр	1-й проход	2-й проход
Скорость круга, м/с	25	25
Скорость подачи стола, мм/мин	120	300
Глубина резания, мм	1,0	0,05
Скорость ролика, м/с	20	20
Подача ролика, мкм/об	0,2	0,05
Токовая нагрузка, мВ	25	10

9.19. Режимы обработки, правки круга и токовая нагрузка при глубинном шлифовании торцов хвостовика лопаток

Параметр	1-й проход	2-й проход	3–12-й проходы
Скорость круга, м/с	20	20	20
Глубина резания, мм	0,9...1,1	0,8	0,02
Скорость подачи стола, мм/мин	200	200	2000
Правка круга	Непрерывная	Непрерывная	Циклическая
Отношение скорости правящего ролика к скорости круга	0,8		
Скорость подачи правящего ролика, мкм/об	0,4	0,4	0,5
Величина правки за цикл, мм	Зависит от режимов	Зависит от режимов	0,1
Токовая нагрузка, %	14...16	18...20	8...10

Глубинное шлифование торцов хвостовиков рабочих лопаток турбины низкого давления газоперекачивающей установки из жаропрочного никелевого сплава ЦНК-7-РС проводилось на одношпиндельном станке с ЧПУ для глубинного шлифования модели MFP-125-35 фирмы Mägerle (Швейцария) одновременно двумя кругами типоразмеров 1 500×25×203 и 1 500×40×203 с характеристикой 99BA 100 G 12 V. Лопатки на столе станка устанавливались в специальное приспособление по две штуки и обрабатывались последовательно за 14 проходов по схеме совмещения глубинного (1-й и 2-й проходы) и маятникового (3–12-й проходы) шлифования с двумя окончательными выхаживающими проходами. Профилирование и промежуточная правка шлифовальных кругов производилась прецизионным алмазным роликом методом непрерывной правки на первых двух проходах и циклической перед третьим и седьмым проходами. В качестве СОТС использовался 1,5...2 % водный раствор эмульсола "Аквол-2".

На предварительном этапе высокопористые шлифовальные круги испытывались на режимах обработки, предусмотренных серийной технологией изготовления лопаток. В ходе обработки при помощи аналогового индикатора измерялась токовая нагрузка на приводе главного движения станка, принятая в качестве критерия, отражающего динамику процесса глубинного шлифования. В табл. 9.19 приведены режимы обработки замков лопаток по проходам (без учета выхаживающих), режимы правки шлифовального круга и токовая нагрузка, выраженная в % от мощности привода.

В указанных условиях были обработаны торцы замков с двух сторон у 14 лопаток. Операционный контроль точности показал, что у всех лопаток геометрические и линейные размеры обработанных поверхностей соответствуют требованиям чертежа. Однако в месте пересечения плоскости торца и полки наблюдалось образование радиуса сопряжения, равного 0,55...0,75 мм, т.е. превышающего допустимое значение, что, вероятно, было вы-

звано низкой твердостью кругов (ЗИ 33 вместо используемого на этой операции ЗИ 37).

При проведении люминесцентного контроля каких-либо дефектов поверхностного слоя замков не обнаружено. Параметр шероховатости обработанной поверхности составил $Ra = 0,9$ мкм (требуемая по чертежу $Ra = 3,2$ мкм).

Для сравнения были проверены хвостовики лопаток, обработанные в аналогичных условиях высокопористыми кругами производства Опытного абразивного завода с характеристикой 25А 25Н ЗИ37 10 К ТКФ40. Параметр шероховатости обработанной поверхности составил также $Ra = 0,9$ мкм, радиус сопряжения – $0,25...0,35$ мм.

С целью повышения производительности процесса обработки новыми высокопористыми кругами и обеспечения требуемого качества обработанных поверхностей была проверена возможность форсирования принятых режимов глубинного шлифования. Скорость шлифовального круга была увеличена в 1,5 раза (до 30 м/с), а скорость подачи стола на 1-м и 2-м проходах в 1,25 раза (до 250 мм/мин), подача при маятниковом шлифовании осталась без изменения (2000 мм/мин). Увеличение режимов шлифования привело к изменению динамики процесса – токовая нагрузка на первом и втором проходах увеличилась до 18...20 % и 22...25 % соответственно.

Контроль операционных размеров хвостовиков двух лопаток, обработанных на форсированных режимах, показал их полное соответствие требованиям чертежа. Радиус сопряжения уменьшился в 2,5...3 раза и составил $0,2...0,25$ мм. Шероховатость обработанных поверхностей не изменилась. Люминесцентным контролем дефектов в виде прижогов и микротрещин на обработанных поверхностях не выявлено.

Вследствие прямой зависимости величины непрерывной правки от скорости шлифования и основного времени, непро-

порциональное изменение скорости круга и скорости подачи стола привело к увеличению расхода абразивного материала на 0,2 мм за время одного цикла обработки. Для компенсации расхода была увеличена скорость подачи стола до 300 мм/мин, тем самым сокращено время обработки. В результате этого величина правки круга за цикл обработки была уменьшена до прежнего значения. Увеличение подачи привело к некоторому увеличению радиуса сопряжения, который в данном случае составил $0,35...0,45$ мм, что не превышало допустимого значения.

Дальнейшая обработка деталей проводилась на форсированных режимах шлифования. До полного износа шлифовальных кругов было обработано 77 лопаток. Все лопатки после обработки были признаны годными, точность размеров и шероховатость обработанных поверхностей соответствовали требованиям чертежа. Прижогов и микротрещин в поверхностном слое замков не обнаружено.

Для сравнения в аналогичных условиях была проверена работа высокопористых кругов производства ОАЗ с характеристикой 25А 25Н ЗИ37 10 КТ КФ40. Однако при обработке этими кругами на форсированных режимах на поверхности торца замка образовывались явно выраженные следы прижогов.

Таким образом, установлено, что высокопористые шлифовальные круги с характеристикой 99ВА 100 G 12 V, изготовленные по технологии с использованием невымарающих порообразователей, при обработке замков лопаток ГТК-10И из жаропрочного никелевого сплава ЦНК-7-РС методом глубинного шлифования на режимах, предусмотренных серийной технологией, обеспечивает требуемое качество поверхности. Одним из нежелательных эффектов при обработке на этих режимах является образование радиуса сопряжения между торцом и полкой замка, превышающего допустимый. Для уменьшения радиуса сопряжения рекомендуется использовать высокопористые

шлифовальные круги указанной характеристики на более высоких скоростях резания, что одновременно позволяет увеличить и производительность обработки за счет форсирования скорости подачи стола.

В результате выполненного анализа установлено, что высокопористые шлифовальные круги, изготовленные по технологии с использованием невыгорающих порообразователей, обладают высокими режущими свойствами. При глубинном шлифовании поверхностей хвостовика турбинных лопаток обеспечивают требуемую производительность и качество поверхностного слоя с формированием наиболее благоприятного для условий эксплуатации характера распределения остаточных напряжений.

Высокопористые круги с характеристикой 99BA 100 G 12 V (твердость по звуковому индексу ЗИ 33) при глубинном шлифовании елочного профиля хвостовика турбинных лопаток обеспечивают токовую нагрузку на 10...25 % меньше, чем высокопористые круги фирмы Tyrolit с характеристикой 89A 100 2G 11A V237 P25 при работе в аналогичных условиях.

Установлено, что новыми высокопористыми кругами возможно шлифование елочного профиля, торцов и основания хвостовика лопаток газотурбинных двигателей на максимальных режимах обработки, допустимых технологией, при одновременном снижении величины правки до 2 раз. При этом токовая нагрузка не превышает допустимых значений, а качество поверхностного слоя и точность размеров соответствует требованиям чертежа.

Исследования остаточных напряжений в поверхностном слое хвостовиков, обработанных высокопористыми кругами на основе невыгорающих порообразователей, кругами фирмы Tyrolit и отечественными аналогами на основе фруктовых косточек показали, что остаточные напряжения 1-го рода и их распределение в поверхностном слое хвостовиков, обработанных новыми кругами, более подходят к рекомендуемым параметрам.



Рис. 9.18. Турбинные лопатки газотурбинных двигателей

Испытаниями на сопротивление усталости лопаток, обработанных высокопористыми кругами различных производителей, установлено, что наибольший предел выносливости имеют замки лопаток после обработки кругами с использованием невыгорающих порообразователей.

На рис. 9.18 показаны лопатки, обработанные новым инструментом.

Шлифование бандажных полок лопаток. В заводских условиях были проведены испытания высокопористых кругов при глубинном шлифовании контактных поверхностей (z-профиль) лопаток ротора турбины из жаропрочного никелевого сплава ЖС6У.

На станке модели ОШ-165М обработка производилась по схеме встречного шлифования за один проход с охлаждением 1,5%-ным водным раствором эмульсола "Аквиол-2" под давлением 0,4 МПа с расходом 1210 л/мин.

Использовался высокопористый круг с характеристикой 24A 16П M1...M2 12 K5 со специальной структурой, формируемой невыгорающими микросферами и молотыми фруктовыми косточками с размером 400 мкм. Профилирование рабочей поверхности и правка в процессе шлифования осуществлялась в автоматическом цикле алмазным роликом после обработки каждой заготовки на режиме: скорость ролика 15 м/с, подача 1 мм/мин, глубина врезания 0,05 мм.



Рис. 9.19. Сектора лопаток газотурбинных двигателей

Во всех случаях скорость шлифовального круга 20 м/с и скорость перемещения стола 120 мм/мин оставались постоянными, а глубина резания изменялась от 1,5 до 8 мм.

Производственные испытания показали, что высокопористый круг исследованной характеристики по производительности, потребляемой мощности и качеству обработки показал лучшие результаты, чем аналог, изготовленный только на фруктовых косточках в качестве порообразователя.

Внутреннее шлифование секторов лопаток. При обработке секторов лопаток и лопаток статора турбины (рис. 9.19) на токарном станке модели МК-163 с фортунной ТМ-153 тяжелые условия шлифовального круга на скорости 39 м/с приводили к потере им режущей способности уже в первые минуты шлифования, что требовало частой правки. Экстремальные условия съема материала при нестабильном припуске часто приводили к появлению прижогов и микротрещин на обработанных поверхностях деталей.

При внутреннем шлифовании нескольких деталей, установленных в приспособлении, кругом 23 125×50×32 с характеристикой 25А 25П СМ2 6 К15 и пропитанным бакелитом, иногда происхо-

дило его разрушение. Скорость вращения детали составляла 20 м/мин, а подача круга на врезание 0,03 мм на оборот детали. Охлаждалась зона резания поливом 3%-ным водным раствором эмульсола ЭГТ.

Чтобы установить оптимальную характеристику круга с повышенной режущей способностью, были испытаны высокопористые составы инструмента с 10-й структурой на основе электрокорунда белого марки 25А зернистости 25 и 40, твердости СМ1...С2 и керамической связке К5 и К15.

Лучшие результаты среди испытанных кругов показали характеристики: 25А 40 С1 10 К15 для съема больших припусков и 25А 25 СМ1 10 К15 для окончательного шлифования радиусных переходов в детали. В первом случае более твердый круг при шлифовании обеспечил повышение своей стойкости до 6...7 раз, а при обработке кругом зернистостью 25 и более мягким – до 2...3,5 раз. При их применении дефекты шлифовочного характера на обработанных деталях отсутствовали.

В заключение можно выделить принципиальную и важную особенность, которая вскрылась в процессе производственных испытаний. При назначении характеристики шлифовального круга для обработки хвостовиков турбинных лопаток очень жестко, как уже подчеркивалось, регламентируется его твердость. Требуемая твердость по величине ЗИ может составлять от $\frac{1}{4}$ до $\frac{1}{2}$ интервала степени твердости по ГОСТ 18118–79 (в ред. 1981 г.).

Испытаниями установлено, что при глубинном шлифовании хвостовиков лопаток ГТД высокопористыми кругами на основе невыгорающих порообразователей в виде микросфер можно расширить диапазон допустимых значений твердости по ЗИ и неуравновешенности масс в сравнении с известными аналогами. В приведенных выше примерах обработки этот диапазон составил по твердости ЗИ 31...35, а для неуравновешенности масс был увеличен до 2-го класса.

Смягчение требований к качеству изготовления высокопористых кругов позволяет увеличить количество инструмента, пригодного для заданной операции, и снизить его себестоимость. При этом обеспечиваются все требования по производительности, точности и качеству глубинного шлифования.

9.6. ПРОФИЛЬНОЕ ГЛУБИННОЕ ШЛИФОВАНИЕ ХВОСТОВИКОВ ЛОПАТОК БОЛЬШИХ ГАБАРИТОВ

Реализация процесса профильного глубинного шлифования больших поверхностей потребовала решения одновременно нескольких технологических проблем.

Рабочая поверхность замка турбинной лопадки ГПУ представляет собой сложное, с точки зрения шлифования, сочетание прямолинейного и криволинейного (в виде елочного профиля) участков. Елочный профиль замка на этой поверхности занимает меньшую часть – до 20 % от общей площади. Каждая точка режущего профиля шлифовального круга, эквидистантного профилю обрабатываемой поверхности, при взаимодействии с геометрически разнородной поверхностью детали обеспечивает съем металла в кинематических и термодинамических условиях, отличных от соседних точек. По существу шлифовальный круг работает в условиях нестационарного резания, когда по линии его контакта с обрабатываемой поверхностью изменяются скорость, глубина, длина контакта, сила, температура и т.д.

Чтобы уменьшить негативное воздействие нестационарности резания на точность и качество обработки с формированием более-менее однородных значений шероховатости по всей площади обработанной поверхности и свойств поверхностного слоя, необходимо гармонизировать характеристику шлифовального круга с условиями шлифования и правки.

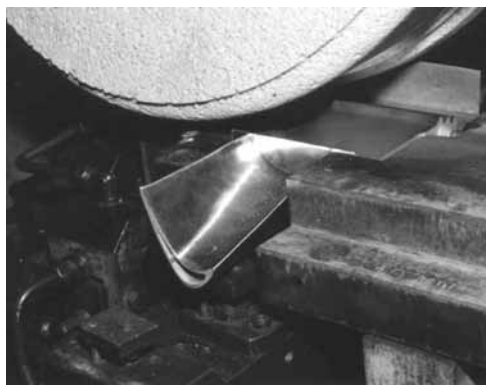
Мировой опыт свидетельствует, что для профильного глубинного шлифования

крупногабаритных замков лопаток газоперекачивающих установок и газотурбинных двигателей эффективно применение высокопористых кругов из электрокорунда с диапазоном характеристик: по зернистости от 16 до 40, по твердости от ВМ1 до М1 и по номеру структуры от 13 до 16.

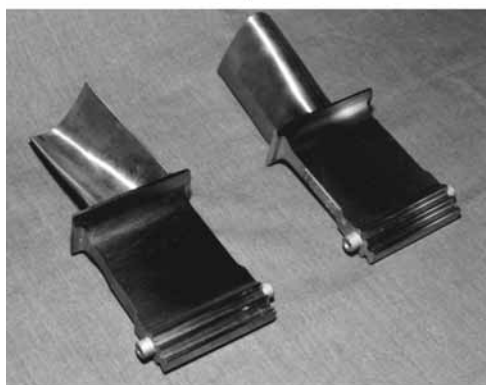
Качественное изготовление крупногабаритного – обычно с диаметрами 500... 600 мм и высотой до 200 мм – высокопористого инструмента с указанными характеристиками является еще одной сложной проблемой. Для ее решения необходимы специальные рецептурные составы и технологические приемы, которыми обладает ограниченное число фирм – производителей абразивного инструмента.

Автору, например, известна попытка одного из отечественных заводов изготовить высокопористые круги зернистостью 32 с размерами 500×150×203,2 для условий глубинного шлифования замков лопаток ГПУ, описанных ниже. При высоком уровне бракованности в процессе их производства, годные, по мнению изготовителя, круги не обеспечили необходимые кромкостойкость и износостойкость и в целом – требований по точности и качеству обработки. Контрольными измерениями было установлено, что твердость в объеме образца (вырезанной 1/8 части круга) изменяется от 7,2 до 9 мм и выходит за пределы гостированной твердости при давлении 0,05 МПа (предположительно степень твердости ЧМ1 или мягче вместо заданной ВМ2). Разница в распределении твердости по объему образца составила две степени, при этом в радиальном направлении – одна степень, а по высоте – две степени. Естественно, что с такими неоднородными показателями по основной эксплуатационной характеристике – твердости, абразивный инструмент не пригоден к качественной работе.

Производственная практика показывает, что для условий шлифования замков лопаток больших размеров колебания твердости в инструменте не должны пре-



а)



б)

Рис. 9.20. Глубинное профильное шлифование хвостовика рабочей лопатки газоперекачивающего комплекса:

а – зона шлифования; б – обработанные лопатки

вышать одной степени как в радиальном, так и в осевом направлении для рабочего слоя круга не менее $1/3$ его диаметра, что соответствует классу точности инструмента АА.

Для профильного глубинного шлифования больших поверхностей хвостовика лопаток газоперекачивающих установок была разработана оригинальная технология изготовления крупногабаритных высокопористых кругов на керамической связке диаметром 500 мм и высотой до 200 мм с номерами структуры 12...16.

Оригинальность изготовления указанных высокопористых кругов заключа-

ется не только в их рецептурном составе, но и в специальном режиме обжига: в пятиступенчатом нагреве и трехступенчатом охлаждении с различной по времени выдержкой при каждой температуре.

В производственных условиях при шлифовании елочного профиля хвостовика лопаток газоперекачивающих установок из сплава ЗМИЗ-У (рис. 9.20) с размерами обрабатываемой поверхности 124×80 мм были испытаны высокопористые круги типоразмера 1 500×130×203 с характеристиками 99А 60 Н 16 V, 99А 60 G/Н 13 V и 99А 60 Н 16 V и 99А 60/70 G 16 V. Обработка лопаток производилась на станках с ЧПУ модели НРА 124 фирмы Mägerle a.g. (Швейцария) за 20 проходов по схеме совмещенного глубинного (1–4-й проходы) и маятникового (5–20-й проходы) шлифования в следующем диапазоне режима: рабочая скорость круга 30 м/с; скорость рабочей подачи стола на 1–4-м проходах 215...245 мм/мин; на 5–19-м проходах 895...1000 мм/мин; на 20-м проходе 415...500 мм/мин; глубина шлифования 0,1...0,6 мм.

Циклическая правка шлифовальных кругов осуществлялась профильными прецизионными алмазными роликами.

В ходе обработки фиксировалась нагрузка на приводе главного движения, по которой производилось сравнение новых кругов между собой, а также с высокопористыми кругами фирмы Carborundum Schleifmittelwerke GmbH (Германия).

На начальном этапе, на 1-й операции, обработка поверхностей замка со стороны спинки пера шлифовальным кругом с характеристикой 99А 60 Н 16 V производилась на режиме с меньшей скоростью рабочей подачи, чем это рекомендовано в технологии: скорость круга 30 м/с; скорость подачи стола на 1–4-м проходах 215 мм/мин; на 5–19-м проходах 895 мм/мин; на 20-м проходе 415 мм/мин; глубина шлифования за один проход 0,1...0,6 мм.

Время цикла обработки на указанных режимах составило 12,7 мин.

После шлифования 4 лопаток был проведен люминесцентный контроль на наличие возможных дефектов на обработанных поверхностях. При этом шлифовочных дефектов в виде прижогов и микротрещин выявлено не было. Параметр шероховатости поверхности зуба елочного профиля составил $Ra = 0,3$ мкм, что не превышало допустимого ($Ra = 0,4$ мкм).

С целью сокращения времени цикла обработки была проверена возможность увеличения скорости рабочей подачи на 1–4-м проходах до 245 мм/мин, на 5–19-м проходах до 1000 мм/мин и на 20-м проходе до 500 мм/мин. При этом время цикла обработки сократилось на 2 мин.

Визуальным осмотром и люминесцентным контролем каких-либо дефектов поверхностного слоя также выявлено не было. Шероховатость обработанной поверхности зуба елочного профиля не изменилась.

Дальнейшая обработка проводилась при скоростях подачи стола: на 1-й операции: 1–4-й проход 245 мм/мин 5–19-й проход 1000 мм/мин, 20-й проход 500 мм/мин; на 2-й операции: 1–4-й проход 300 мм/мин, 5–19-й проход 980 мм/мин; 20-й проход 500 мм/мин.

В указанных условиях замки лопаток обрабатывались на первой операции со стороны спинки пера, на второй – со стороны корыта.

В ходе испытаний фиксировалась также нагрузка на приводе главного движения, производилось сравнение новых высокопористых кругов между собой, а также с инструментом фирмы Carborundum Schleifmittelwerke GmbH.

За время работы шлифовального круга до полного износа на одной операции обрабатывалось в среднем по 40–43 лопатки.

Установлено, что высокопористые круги, изготовленные по технологии с использованием невыгорающих порообразователей, в одинаковых условиях ра-

боты обеспечивают результаты по токовой нагрузке, стойкости, производительности и качеству обработанной поверхности, аналогичные серийным шлифовальным кругам немецкой фирмы Carborundum Schleifmittelwerke GmbH.

Операционный контроль показал, что геометрические и линейные размеры хвостовика на всех обработанных лопатках соответствовали требованиям чертежа. Визуальным осмотром и люминесцентным контролем каких-либо дефектов поверхностного слоя обнаружено не было. Параметр шероховатости поверхности зуба елочного профиля в среднем составил $Ra = 0,3 \dots 0,35$ мкм, что не превышало допустимого ($Ra = 0,4$ мкм). Все лопатки, обработанные новыми кругами, были признаны годными.

9.7. МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГЛУБИННОГО ШЛИФОВАНИЯ ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ

Постоянно растущие требования к производительности, точности и качеству операций формообразования жаропрочных никелевых сплавов при одновременном снижении их обрабатываемости резанием стимулирует постоянный поиск новых методов и средств повышения эффективности процесса шлифования.

Высокоскоростное глубинное шлифование. Принципиально новым этапом в развитии процессов механической обработки ответственных деталей авиационных двигателей может явиться использование скоростного и высокоскоростного глубинного шлифования. Аналитические и экспериментальные исследования, проведенные в России, Германии, США и Японии, указывают на большие перспективы технологии глубинного шлифования на скоростях до 100...180 м/с и выше.

О положительном и отрицательном влиянии повышения скорости резания на выходные параметры процесса шлифования было написано в главе 8. В ней также

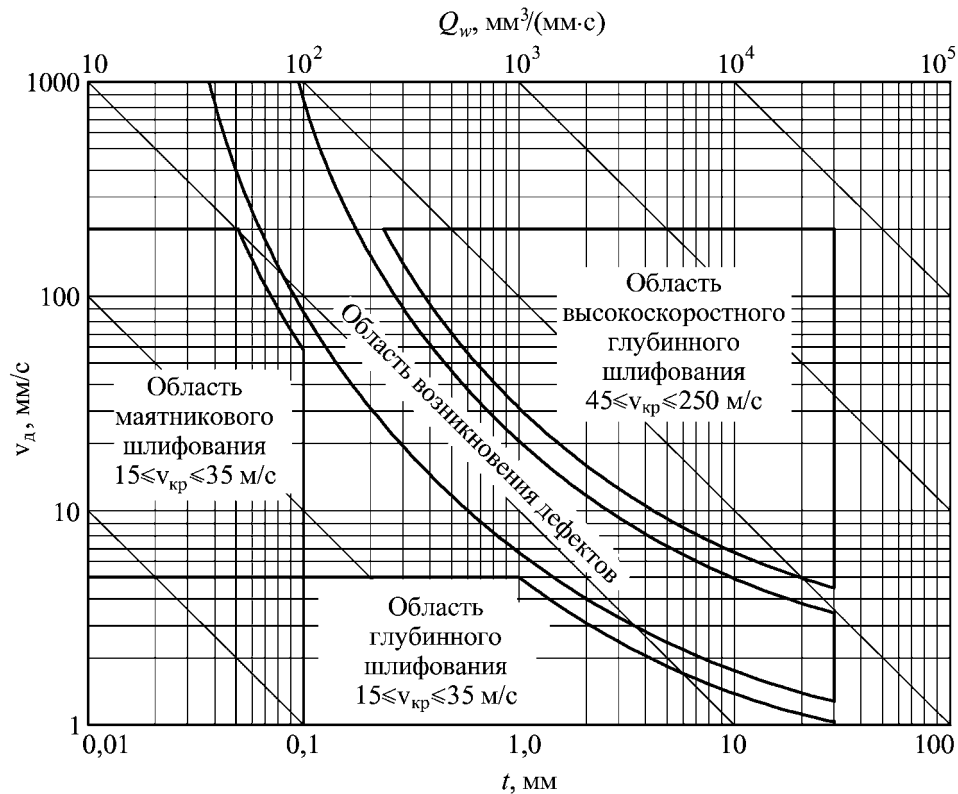


Рис. 9.21. Диапазон использования высокоскоростного шлифования

приведены результаты исследований при высокоскоростном шлифовании (до 100 м/с) закаленной стали без принудительного охлаждения СОТС.

По данным фирмы Guhring Automation (Германия) технология высокоскоростного глубинного шлифования подразумевает обработку со скоростями резания $v_{кр}$ от 60 до 250 м/с (рис. 9.21). Скорость подачи стола $v_{ст}$ при этом может быть увеличена до 1000...10 000 мм/мин, а глубина шлифования за один проход достигать 30 мм. Производительность съема материала при высокоскоростном шлифовании в 10...20 раз выше производительности съема материала, достигаемого при обработке лезвийным инструментом. По диаграмме на рис. 9.21, если повысить скорость круга до 60 м/с и более

и при этом одновременно увеличить скорость подачи стола до 1000 мм/мин, то мы попадаем в область высокоскоростного глубинного шлифования. При этом критическую область появления термических дефектов, которая наблюдается при подачах 300...500 мм/мин, удастся миновать за счет увеличения скорости подачи обрабатываемой детали.

Фирмами Blohm, Elb-Schliff и другими созданы и серийно изготавливаются станки для профильного шлифования со скоростями резания до 170 м/с. Для обработки с высокими скоростями резания рекомендуются шлифовальные круги из кубического нитрида бора на спекаемых и гальванических металлических связках.

Основным сдерживающим фактором широкого использования и развития про-

цесса высокоскоростного глубинного шлифования являлось ограничение по разрывной прочности высокопористых абразивных кругов. В настоящее время реализованы технологии изготовления высокопористых шлифовальных кругов на керамических связках с рабочей скоростью до 120 м/с. Это дает возможность использовать преимущества абразивного инструмента на керамических связках на более высоких скоростях резания, чем применяемые в заводских условиях.

С помощью нового инструмента на основе невыгорающих порообразователей реализован процесс высокоскоростного глубинного шлифования деталей из жаропрочных никелевых сплавов со скоростью до 70 м/с. При этом повысилась производительность процесса за счет увеличения скорости съема металла при пропорциональном повышении скорости продольной подачи стола.

Исследования процесса высокоскоростного глубинного шлифования образцов из жаропрочного никелевого сплава проводились на модернизированном профишлифовальном станке модели ЛШ-220, который позволил обеспечить рабочую скорость глубинного шлифования до 70 м/с [42].

Для шлифования был выбран наиболее труднообрабатываемый литейный жаропрочный сплав на никелевой основе марки ЖС26-ВИ, который используется для изготовления турбинных лопаток ГТД, работающих в условиях длительного воздействия высокой температуры (до 1100 °С).

Высокоскоростные и высокопористые абразивные круги для глубинного шлифования типоразмера 1 500×25×203 были изготовлены на фирме Carborundum Electrite a.s. (Чехия) по технологии, разработанной автором. С учетом требований, предъявляемых к инструменту для глубинного шлифования жаропрочных сплавов, круги были изготовлены из электрокорунда белого марки 99ВА, зернисто-

стью 100 (12), твердостью F (ВМ1) и G (ВМ2), с номерами структуры 12 и 14. Круги были протестированы на рабочую скорость 70 м/с.

Исследованный диапазон параметров режимов глубинного шлифования и правки высокопористых кругов составил: скорости круга 15...70 м/с, скорость стола 50...3000 мм/мин, глубина обработки 0,2...3 мм и скорость правки круга 0,5...5 мкм/об.круга. Обработка проводилась на образцах размером 45×40×10 [42].

Одним из основных критериев, оценивающим эффективность процесса шлифования, является удельный износ шлифовального круга, который характеризуется коэффициентом шлифования $K_{\text{шл}}$.

В результате проведенных исследований получены эмпирические зависимости коэффициента шлифования жаропрочного сплава ЖС26-ВИ от параметров режима шлифования:

для кругов с характеристикой 99ВА 100 F 12 V (25А 12 ВМ1 12 К)

$$K_{\text{шл}} = 7,5 v_{\text{кр}}^{0,438} v_{\text{дет}}^{-0,776} t^{-0,334}; \quad (9.9)$$

для кругов с характеристикой 99ВА 100 G 12 V (25А 12 ВМ2 12 К)

$$K_{\text{шл}} = 18,8 v_{\text{кр}}^{0,422} v_{\text{дет}}^{-0,866} t^{-0,307}. \quad (9.10)$$

Как показали результаты исследований, с увеличением скорости круга от 15 до 70 м/с коэффициент шлифования увеличивается в 1,9 раза, а с увеличением скорости подачи стола и глубины резания происходит его уменьшение в 3,4...4 раза для более мягкого и в 1,9...2,1 раза для более твердого круга.

На рис. 9.22 приведена зависимость производительности или удельного съема металла от скорости круга с характеристикой 99ВА 100 G 12 V для различных коэффициентов шлифования. Установлено, что увеличение скорости резания до 70 м/с с одновременным увеличением скорости стола позволяет увеличить удельный

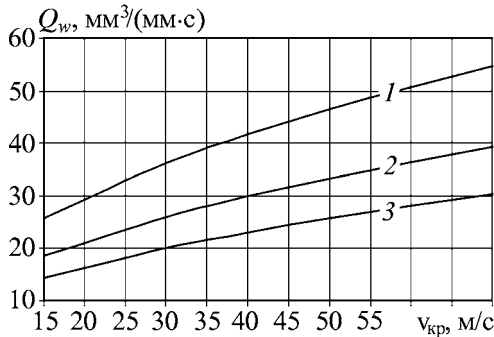


Рис. 9.22. Влияние скорости резания на удельный съем при шлифовании кругом 99BA 100 G 12 V с коэффициентами: 1 – $K_{шл} = 0,15$; 2 – $K_{шл} = 0,2$; 3 – $K_{шл} = 0,25$

съем металла до 45...55 мм³/(мм·с), т.е. в 3...5 раз по сравнению с традиционным глубинным шлифованием при постоянном коэффициенте шлифования.

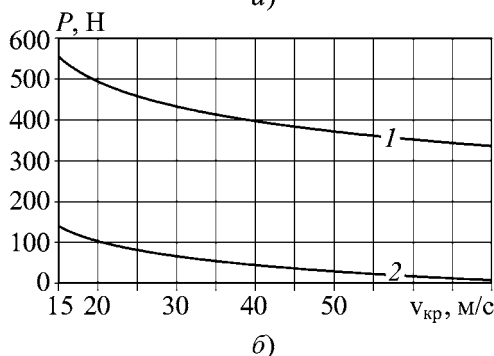
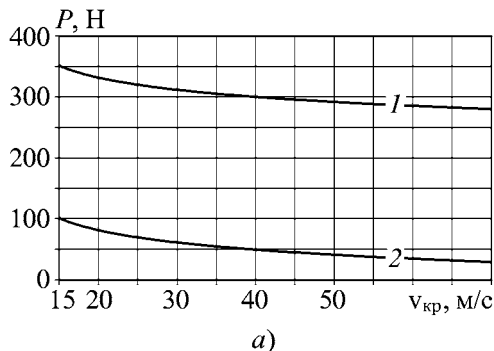


Рис. 9.23. Зависимости составляющих сил резания P_y (1) и P_z (2) от скорости шлифовального круга при $v_{ст} = 1000$ мм/мин, $t = 1$ мм: а – круг 99BA 100 F 12 V; б – круг 99BA 100 G 12 V

Более твердый круг обеспечивает значение Q_w на 20...30 % больше, чем более мягкий.

В ходе исследований установлено, что увеличение окружной скорости шлифовального круга приводит к снижению составляющих сил резания P_y и P_z (рис. 9.23). Так, например, при увеличении скорости шлифования с 15 м/с до 70 м/с для высокопористого круга с характеристикой 99BA 100 G 12 V составляющая P_y уменьшается с 550 до 335 Н или почти в 1,65 раза, а составляющая P_z при скорости 70 м/с уменьшается до 10 раз по сравнению с обработкой на скорости 15 м/с.

В результате математической обработки результатов экспериментов получены зависимости составляющих сил резания P_y и P_z от режимов высокоскоростного глубинного шлифования:

для кругов с характеристикой 99BA 100 F 12 V

$$P_y = 11,4 v_{кр}^{-0,118} v_{ст}^{0,455} t^{0,663}, \quad (9.11)$$

$$P_z = 3,1 v_{кр}^{-0,648} v_{ст}^{0,580} t^{0,429}; \quad (9.12)$$

для кругов с характеристикой 99BA 100 G 12 V

$$P_y = 20,6 v_{кр}^{-0,303} v_{ст}^{0,496} t^{0,727}, \quad (9.13)$$

$$P_z = 6,5 v_{кр}^{-0,739} v_{ст}^{0,687} t^{0,553}. \quad (9.14)$$

Интенсификация процесса глубинного шлифования возможна лишь при условии устранения или смягчения отрицательного воздействия теплового фактора. Известно, что количество теплоты Q_t , выделяемое в зоне шлифования, эквивалентно мощности шлифования:

$$Q_t = k P_z v_{кр}.$$

С увеличением скорости круга составляющая силы резания P_z , как установлено, уменьшается не линейно, а в степени 0,648...0,739. Следовательно, количество теплоты, выделяемое в зоне шлифования, при увеличении скорости круга будет возрастать.

Для оценки тепловой напряженности процесса высокоскоростного глубинного шлифования получены зависимости контактной температуры от режимов обработки:

для кругов с характеристикой 99BA 100 F 12 V

$$\Theta = 38,8 v_{кр}^{0,193} v_{ст}^{0,252} t^{0,174}; \quad (9.15)$$

для кругов с характеристикой 99BA 100 G 12 V

$$\Theta = 42,8 v_{кр}^{0,209} v_{ст}^{0,312} t^{0,222}. \quad (9.16)$$

Анализ результатов исследований показал, что с увеличением скорости шлифовального круга от 15 до 70 м/с при постоянном удельном сьеме контактная температура повышается в 1,35...1,38 раза (рис. 9.24). Однако, несмотря на увеличение теплонапряженности процесса при использовании технологии высокоскоростного глубинного шлифования, контактная температура не достигает температуры образования термических дефектов, которая для исследуемого сплава ЖС26-ВИ составляет 1200 °С.

Пропорционально увеличению скорости шлифования также снижается параметр шероховатости обработанной поверхности Ra (рис. 9.25). Требуемая шероховатость поверхности обеспечивается выбором оптимального сочетания параметров режима шлифования. При этом одинаковую величину микронеровностей на обработанной поверхности можно получить при различных сочетаниях скорости круга и скорости продольной подачи стола. Например, при шлифовании кругом 99BA 100 G 12 V на скорости 70 м/с с продольной подачей 1500 мм/мин $Ra = 1,5$ мкм, что аналогично шероховатости, полученной при обработке на скорости 35 м/с и подаче 300 мм/мин, т.е. с производительностью в 5 раз меньше.

Для количественной оценки шероховатости поверхности при глубинном шлифовании получены эмпирические за-

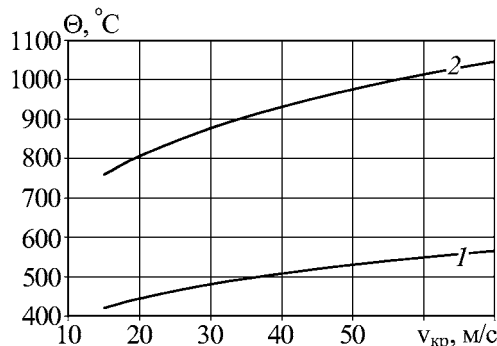


Рис. 9.24. Зависимость контактной температуры от скорости шлифовального круга при $v_{ст} = 1000$ мм/мин, $t = 2$ мм:
1 – 99BA 100 F 12 V, 2 – 99BA 100 G 12 V

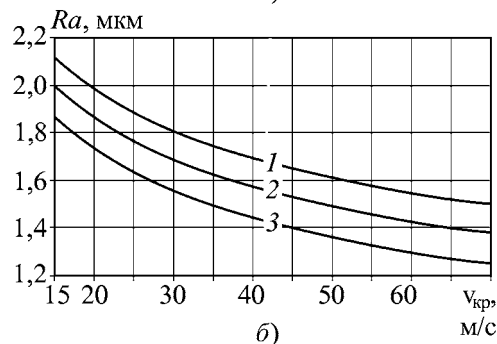
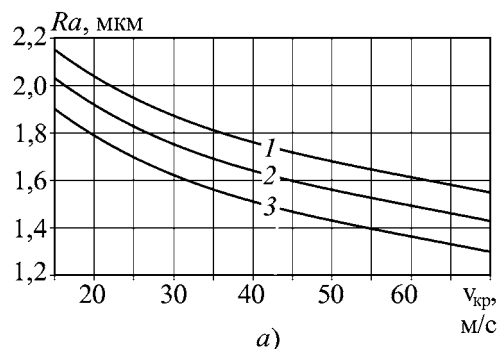


Рис. 9.25. Зависимости параметра шероховатости поверхности от скорости резания при шлифовании с глубиной 0,2 мм высокопористыми кругами:
а – 99BA 100 F 12 V; б – 99BA 100 G 12 V;
1 – $S_d = 1500$ мм/мин; 2 – $S_d = 700$ мм/мин;
3 – $S_d = 300$ мм/мин

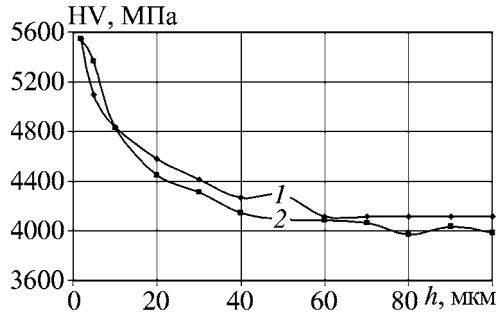


Рис. 9.26. Распределение микротвердости по глубине поверхностного слоя образцов при шлифовании кругом

99BA 100 G 12 V с удельным съемом

$Q_{уд} = 50 \text{ мм}^3/(\text{мм} \cdot \text{с})$ на режимах:

1 – $v_{кр} = 70 \text{ м/с}$, $v_{ст} = 1500 \text{ мм/мин}$, $t = 2 \text{ мм}$;

2 – $v_{кр} = 15 \text{ м/с}$, $v_{ст} = 1500 \text{ мм/мин}$, $t = 2 \text{ мм}$

зависимости среднего арифметического отклонения профиля Ra от режимов резания:

для кругов с характеристикой 99BA 100 F 12 V

$$Ra = 1,283 v_{кр}^{-0,233} v_{ст}^{0,124} t^{0,083}; \quad (9.17)$$

для кругов с характеристикой 99BA 100 G 12 V

$$Ra = 0,797 v_{кр}^{-0,224} v_{ст}^{0,092} t^{0,024}. \quad (9.18)$$

Полученные зависимости позволяют определить оптимальное соотношение параметров производительности и качества обработки. При этом обеспечивается высокая скорость съема металла и стабилизация тепловой и силовой нагрузок на обрабатываемую поверхность.

Как показали результаты исследований, при высокоскоростном глубинном шлифовании жаропрочного сплава ЖС26-ВИ поверхностный слой толщиной до 40 мкм подвержен наклепу во всем исследованном диапазоне режимов резания. На рис. 9.26 в качестве примера показано распределение микротвердости в поверхностном слое образцов после шлифования кругом с характеристикой 99BA 100 G 12 V со скоростями 15 и 70 м/с.

Повышение скорости шлифовального круга от 15 до 70 м/с практически не оказывает влияния на изменение глубины наклепа. Увеличение глубины шлифования от 0,2 до 2 мм при скорости стола $v_{ст} = 1500 \text{ мм/мин}$ приводит к упрочнению поверхностного слоя на глубину от 10 до 40 мкм. Указанный эффект объясняется возрастанием составляющих силы резания. Глубина и степень наклепа поверхностного слоя зависят от свойств материала и условий обработки. При высокоскоростном глубинном шлифовании жаропрочного сплава ЖС26-ВИ поверхностный слой толщиной до 40 мкм подвержен наклепу во всем исследованном диапазоне режимов резания.

Повышение скорости шлифовального круга от 15 м/с до 70 м/с при больших значениях скорости съема металла приводит к некоторому снижению степени наклепа. При шлифовании кругом меньшей твердости степень наклепа снижается до 1,2 раза. Важно отметить, что увеличение твердости круга от F до G приводит к увеличению глубины наклепа только при относительно малой глубине шлифования $t = 0,2 \text{ мм}$.

Величина и распределение по глубине остаточных напряжений являются показателями качества детали, по которому оценивают внедряемые новые процессы при обработке деталей из жаропрочных материалов. Поэтому условиям формирования остаточных напряжений при глубинном шлифовании уделяется особое внимание.

Результаты исследования влияния скорости резания на распределение остаточных напряжений в поверхностном слое образцов из жаропрочного сплава на никелевой основе ЖС26-ВИ приведены на рис. 9.27 и 9.28.

Из анализа эпюр распределения остаточных напряжений следует, что при традиционном и высокоскоростном глубинном шлифовании в поверхностном слое формируются остаточные напряжения сжатия до 450 МПа, переходящие на

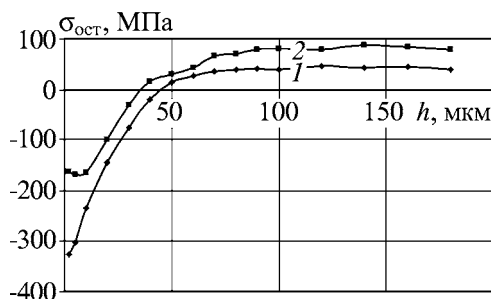


Рис. 9.27. Эпюры распределения остаточных напряжений в поверхностном слое образцов из сплава ЖС26-ВИ после шлифования кругом 99ВА 100 F 12 V при $v_{ст} = 1000$ мм/мин, $t = 1$ мм: 1 — $v_{кр} = 15$ м/с; 2 — $v_{кр} = 70$ м/с

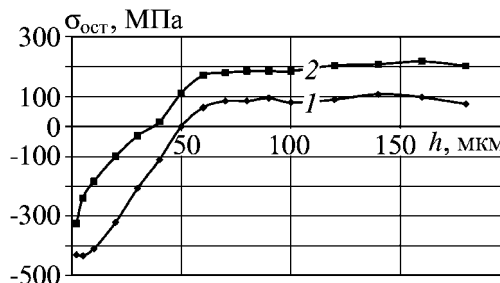


Рис. 9.28. Эпюры распределения остаточных напряжений в поверхностном слое образцов из сплава ЖС26-ВИ после шлифования кругом 99ВА 100 G 12 V при $v_{ст} = 1000$ мм/мин, $t = 1$ мм: 1 — $v_{кр} = 15$ м/с; 2 — $v_{кр} = 70$ м/с

глубине 30...50 мкм в растягивающие напряжения до 200 МПа.

Увеличение скорости шлифовального круга от 15 до 70 м/с приводит к некоторому увеличению растягивающих напряжений из-за увеличения контактной температуры. При шлифовании более твердым кругом 99ВА 100 G 12 V также наблюдается увеличение растягивающих напряжений по сравнению с обработкой кругом 99ВА 100 F 12 V.

Прошлифованные образцы подвергали контролю методом люминесцентной дефектоскопии на выявление микротрещин. Установлено, что увеличение скорости шлифовального круга до 70 м/с при удельном сьеме металла $Q_{уд} = 50$ мм³/(мм·с) не вызывает критических значений внутренних напряжений и микротрещин на обработанной поверхности.

Комплексным критерием оценки состояния поверхностного слоя детали после механической обработки является величина предела выносливости σ_{-1} .

Для оценки влияния режимов шлифования, характеристики шлифовальных кругов и других параметров на предел выносливости В.В. Семиколенных была разработана методика, по которой проведены сравнительные усталостные испытания образцов с пазом, имитирующем паз елочного профиля. Образцы шлифова-

лись по трем технологическим вариантам:

- серийный вариант (шлифование за 14 проходов, характеристика шлифовального круга 25А 10П ЗИЗ1 10 К, правка циклическая);
- опытный вариант № 1 (высокоскоростное шлифование за 3 прохода, характеристика круга 99ВА 100 F 12 V, правка непрерывная);
- опытный вариант № 2 (высокоскоростное шлифование за 4 прохода, характеристика круга 99ВА 100 F 12 V, правка непрерывная).

Режимы шлифования, правки шлифовальных кругов, машинное время и предел выносливости образцов приведены в табл. 9.20.

В результате анализа усталостных испытаний установлено, что применение процесса высокоскоростного глубинного шлифования с непрерывной правкой специальных высокопористых шлифовальных кругов при трехпроходном цикле обработки обеспечивает требуемый предел выносливости при снижении времени обработки в 6,8 раза. Применение четырехпроходного цикла высокоскоростного глубинного шлифования позволяет повысить производительность обработки в 4,9 раза при обеспечении требуемого предела выносливости.

9.20. Результаты сравнительных усталостных испытаний образцов

Вариант обработки	Режимы резания						$T_{\text{маш}},$ мин	$\sigma_{-1},$ МПа
	Номер хода	$V_{\text{кр}},$ м/с	$V_{\text{ст}},$ мм/мин	$t, \text{ мм}$	$t_{\text{пр}},$ мм*	$S_{\text{р}},$ мкм/об. кр**		
Серийный (14 проходов); правка циклическая	1	20	500	0,6			7,83	180
	2	20	500	0,6	0,15			
	3	20	500	0,6				
	4	20	500	0,4	0,15			
	5	20	500	0,2				
	6	20	500	0,15	0,15			
	7	20	500	0,1	0,005			
	8	20	500	0,05	0,005			
	9	20	500	0,04	0,005			
	10	20	600	0,03	0,005			
	11	20	600	0,015	0,005			
	12	20	800	0,008	0,005			
	13	20	800	0,005				
	14	25	1000	0,002				
Опытный (3 прохода); правка непрерывная	1	70	1000	2,55		2	1,15	180
	2	70	500	0,2		1		
	3	70	250	0,05				
Опытный (4 прохода); правка непрерывная	1	70	1000	2,0		1	1,61	190
	2	70	500	0,5		0,5		
	3	70	250	0,25		0,1		
	4	70	250	0,05				

* Глубина циклической правки.

** Врезная подача алмазного ролика при непрерывной правке.

Полученные результаты показывают, что повышение удельного съема металла при высокоскоростном глубинном шлифовании позволяет существенно повысить производительность обработки при обеспечении требуемого предела выносливости.

В результате усталостных испытаний установлено, что применение процесса высокоскоростного глубинного шлифования с непрерывной правкой высокопористых кругов обеспечивает требуемый пре-

дел выносливости при увеличении производительности по съему материала в 3...5 раз.

Скоростное CD-шлифование.* По зарубежной терминологии процесс шли-

* По ГОСТ 23505–79 (в ред. 1988 г.) "Обработка абразивная. Термины и определения" скоростное шлифование – это шлифование с рабочей скоростью абразивного инструмента свыше 35 м/с, а высокоскоростное – с рабочей скоростью свыше 60 м/с.

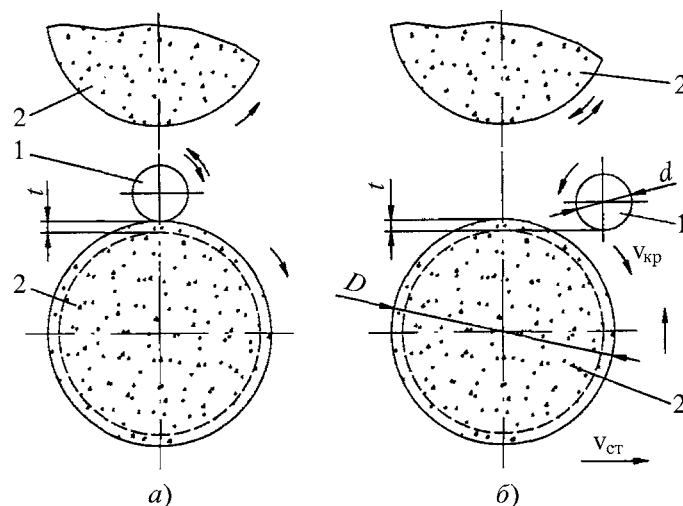


Рис. 9.29. Схема профильной правки круга:

а – с радиальным врезанием; б – с тангенциальным врезанием; 1 – алмазный ролик;
2 – абразивный круг

фования с непрерывной правкой круга называют CD-шлифованием.

Глубинное шлифование с непрерывной правкой шлифовального круга алмазным роликом позволяет повысить производительность операции по скорости съема материала не менее чем в 3 раза по сравнению с циклической правкой [17].

В некоторых случаях CD-шлифование применяется как вынужденная мера, чтобы поддерживать режущую способность инструмента на постоянном уровне и обеспечивать качественную обработку одновременно нескольких деталей с высокой производительностью. При непрерывной правке возможно использование более мягких кругов (ВМ1), чем при шлифовании с циклической правкой (ВМ2...М2). Правка мягких кругов происходит с меньшим расходом алмазов, но при непрерывной правке всегда будет больший расход шлифовальных кругов.

Правку (рис. 9.29, а) производят путем шлифования круга алмазным роликом при попутном вращении и соотношении скоростей ролика и круга, равным 0,6...0,8. Интенсивность правки t_n оцени-

вается в мкм на оборот круга и принимается при черновой правке $t_n = 0,8...1,0$ мкм/об, а при чистовой $t_n = 0,3...0,6$ мкм/об.

Правка осуществляется до снятия заданного припуска t . Величина t зависит от твердости и зернистости круга. Для кругов твердостью ВМ1, ВМ2, М1 структуры 9...12 и зернистостью 10, 25, 40 оптимальное значение t соответственно составляет 0,05...0,08; 0,08...0,12; 0,25...0,3 мм. Меньшие значения соответствуют более твердым кругам (М1), а большие – мягким кругам (ВМ1). При правке второго круга направление вращения ролика реверсируется.

При правке с тангенциальным врезанием ролика (рис. 9.29, б) абразивный круг сразу подается на глубину t и проходит под правящим устройством со скоростью $v_{ст}$. Правящий ролик вращается только в одну сторону, а один из кругов реверсируется для обеспечения попутной правки. Интенсивность правки определяется по формуле:

$$t_n = \frac{\pi D v_{ст}}{v_{кр}} \sqrt{\frac{t}{D+d}}.$$

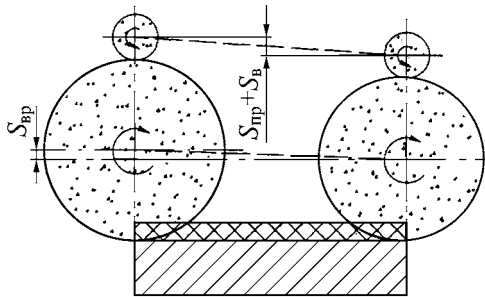


Рис. 9.30. Схема непрерывной правки с компенсацией износа круга:

$S_{вр}$ – подача на врезании; $S_{пр}$ – подача правящего ролика; $S_{в}$ – подача на износ ролика

Скорость движения стола $v_{ст}$ из этой формулы определяют по заданной интенсивности правки.

Тангенциальная правка обеспечивает более плавное врезание алмазного ролика и является предпочтительной при однокруговой обработке.

Ряд поверхностей с точки зрения качества можно обработать только с непрерывной правкой, при которой профилирование круга происходит в течение всего процесса шлифования, т.е. круг и ролик во время всего цикла обработки находятся в постоянном контакте (рис. 9.30).

Компенсация износа круга при этом также осуществляется непрерывно, поэтому, если алмазный ролик имеет подачу врезания $S_{вр}$, то она компенсируется подачей всей шлифовальной бабки на величину врезания и правки.

Благодаря непрерывной правке шлифование осуществляется при неизменном состоянии режущей поверхности круга. Несмотря на то что расход абразивного круга увеличивается по сравнению с дискретной правкой в 1,5...2 раза, производительность повышается в 5...7 раз по сравнению с обычным глубинным шлифованием, снижаются температуры и силы резания.

Преимуществом CD-шлифования безусловно является возможность высокопроизводительного, точного и качест-

венного профильного шлифования наиболее труднообрабатываемых жаропрочных никелевых сплавов и экономия времени на операцию шлифования, так как нет необходимости в промежуточных правках.

В большинстве случаев никелевые сплавы шлифуются с непрерывной правкой со скоростями резания 15...25 м/с, обеспечивая производительность до 10...15 мм³/(мм·с).

В работе [128] приводятся результаты исследований, которые позволяют повысить удельную скорость съема металла до 90 мм³/(мм·с) за счет согласованного увеличения скорости круга до 30...50 м/с, скорости перемещения стола и радиальной подачи правки до 2...2,4 мкм.

В зарубежной промышленной практике область CD-шлифования никелевых сплавов характеризуется глубиной резания 1...8 мм и скоростью перемещения детали 40...60 мм/мин. Если эту скорость повысить до 1500 мм/мин при одновременном увеличении радиальной подачи правки, то можно получить технологический вариант обработки с уменьшенной тепловой нагрузкой на обрабатываемую деталь.

На рис. 9.31 показаны результаты измерения составляющих сил резания, отнесенных к 1 мм высоты круга с характеристикой 89A G01 H 9 AV2 и температуры обрабатываемой поверхности сплава Inconel 738 LC при шлифовании со скоростью 20 м/с и глубиной 1 мм от скорости перемещения детали.

С увеличением радиальной подачи правки от 0,5 (рис. 9.31, а) до 1,5 мкм (рис. 9.31, б) нормальная составляющая силы резания P_y при скорости детали 1500 мм/мин существенно уменьшается – в 1,6 раз, а тангенциальная составляющая всего на 14 %. Температура на поверхности детали достигает максимума при определенной скорости стола, которая, в свою очередь, зависит от радиальной подачи правки. Интенсивность нагрева

также уменьшается с увеличением радиальной подачи правки.

В главе 8 подробно рассматривался процесс высокоскоростного шлифования, когда повышение скорости круга сопровождалось согласованным увеличением скорости вращения детали при сохранении их отношения $v_{кр}/v_d$. Условия правки исследованных высокопористых кругов сохранялись постоянными.

При повышении скорости сухого шлифования от 35 до 96 м/с при соответствующем увеличении производительности процесса от 0,58 до 24 мм³/(мм·с) раз энергетические затраты на сьем материала и интенсивность теплообразования в зоне резания снизились почти в 4 раза.

Результатами экспериментов, которые приведены в п. 9.4, установлено, что с увеличением радиальной подачи правки S_p токовая нагрузка при профильном глубинном шлифовании хвостовиков лопаток уменьшается. Чем больше S_p , тем больше вероятность бездефектной обработки.

Если обобщить результаты проведенных экспериментов, связанных с изменением радиальной подачи правки, то можно сделать заключение, что при увеличении производительности шлифования по сьему материала Q_w (размерностью мм³ на мм высоты круга в 1 с) необходимо пропорциональное повышение S_p :

$$S_p \approx k Q_w^{1...1,24}. \quad (9.19)$$

Коэффициент k и показатель степени зависят от допустимого уровня термодинамической напряженности зоны шлифования.

Несмотря на безусловные преимущества непрерывной правки для повышения производительности и качества профильного глубинного шлифования, условия экономической целесообразности ее применения рекомендуется определять в каждом конкретном случае [88, 128].

Сравним эффективность использования циклической и непрерывной правок на изменении технологической себесто-

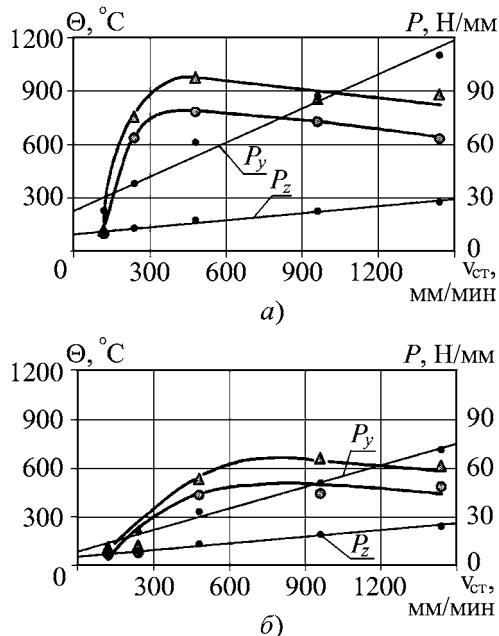


Рис. 9.31. Зависимость температуры поверхности и составляющих силы резания от скорости перемещения стола для различных значений радиальной подачи правки круга:
а – $S_p = 0,5$ мкм; б – $S_p = 1,5$ мкм

имости операций шлифования. Ее величина складывается из трех основных составляющих: стоимости времени на обработку и затрат на износ шлифовального круга и алмазного правящего ролика.

При непрерывной правке инструмента время обработки включает в себя время правки, а при циклической правке ее время добавляется к машинному времени. Время циклической правки определяется заданным размером на одну промежуточную правку круга, величина которого для профильного глубинного шлифования составляет $f = 0,15...0,23$ мм. Шлифовальный круг, диаметр D которого обычно равен 500 мм для обработки хвостовиков турбинных лопаток, может быть изношен на 1/3 своего диаметра.

При шлифовании с непрерывной правкой, как уже подчеркивалось, могут быть использованы более мягкие круги,

9.21. Структура технологической себестоимости операции профильного глубинного шлифования

Правка	Структура затрат, %, на		
	станок	инструмент	ролик
Непрерывная	68	26,7	5,3
Циклическая	80,8	16,3	2,9

чем при обработке с циклической правкой. Для простоты расчетов примем, что темп изнашивания Δ алмазных роликов пропорционален времени правки и не зависит от твердости шлифовального круга.

Для двух сравниваемых вариантов технологическая себестоимость операции шлифования для пути резания L (несколько деталей, обрабатываемых одновременно, или одна деталь) определяется следующим образом:

для варианта шлифования с непрерывной правкой

$$C_T = C_{ст} \frac{L}{v_{ст}^*} + 3C_{кр} S_p \frac{v_{кр}}{v_{ст}^*} \frac{L}{\pi D^2} + C_a \Delta \frac{L}{v_{ст}^*}, \quad (9.20)$$

для варианта шлифования с циклической правкой

$$C_T = C_{ст} \left(\frac{L}{v_{ст}} + \frac{\Delta f}{S_p} \frac{\pi D}{v_{кр}} \right) + 3C_{кр} \frac{\Delta f}{D} + C_a \Delta \frac{f \pi D}{S_p v_{кр}}, \quad (9.21)$$

где $C_{ст}$ – стоимость станкоминуты, т.е. стоимость 1 мин работы станка; $C_{кр}$ – стоимость шлифовального круга; C_a – стоимость алмазного правящего ролика. Учтено, что скорость стола при непрерывной правке $v_{ст}^*$ отличается от соответствующей $v_{ст}$ при циклической правке шлифовального круга.

При сравнении двух вариантов шлифования было принято, что обработка

ведется при скорости круга 20 м/с со скоростью стола 100 мм/мин при циклической правке и в 1,2 раза большей при непрерывной правке с радиальной подачей врезания в обоих случаях 0,5 мкм на один оборот вращения шлифовального круга. Циклическая правка в расчетах принята равной $f = 0,15$ мм. Путь резания $L = 100$ мм. Другие составляющие расчетных формул (9.20) и (9.21) были определены с учетом реальных цен на профильношлифовальные станки, высокопористые шлифовальные круги и алмазные правящие ролики и опыт их эксплуатации в производстве турбинных лопаток из жаропрочных никелевых сплавов.

Для принятых условий сравнения двух вариантов шлифования, когда скорость стола при непрерывной правке только на 20 % больше, чем при циклической, время операции шлифования с непрерывной правкой круга уменьшается в 1,65 раз, а расходы на абразив и алмазный ролик возрастают примерно на 30 и 18 % соответственно. Структура затрат в технологической себестоимости операции по двум вариантам шлифования показана в табл. 9.21.

Шлифование с ускоренной подачей стола. Производительность процесса шлифования по скорости съема материала зависит от глубины обработки и скорости перемещения инструмента относительно обрабатываемой детали. Увеличение только скорости вращения круга не приводит к возрастанию производительности процесса. Но в соответствии с расчетами

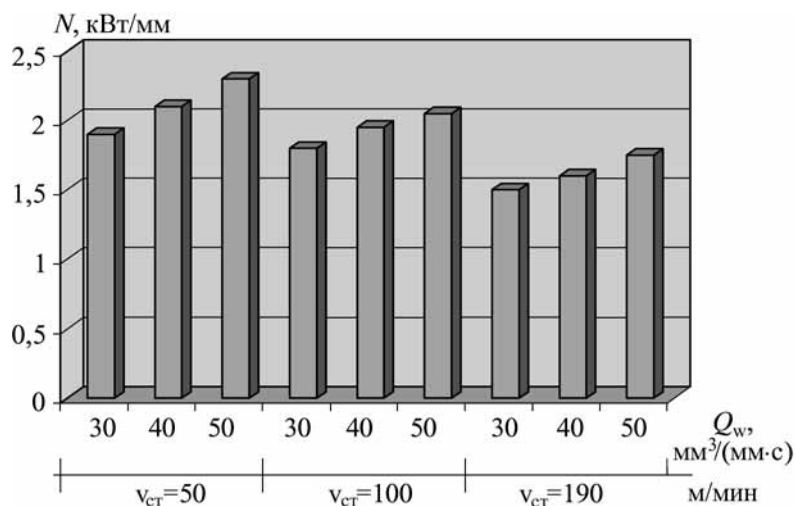


Рис. 9.32. Диаграмма изменения приведенной мощности шлифования от скорости стола и производительности по съему материала (при $v_{кр} = 50$ м/с)

толщины стружки (см., например, (2.29)), чтобы сохранять комфортность стружкообразования по толщине удаляемой стружки, при увеличении скорости круга необходимо пропорционально увеличивать и скорость перемещения детали, что обеспечивает и соответствующее увеличение производительности.

В работе [133] рассмотрены различные аспекты процесса резания и создания оборудования для шлифования с ускоренной подачей стола – до 200 м/мин (с ускорением 50 м/с^2), что на порядок превышает используемый уровень скоростей на практике. Процесс обработки с ускоренной подачей стола предлагается как альтернатива глубинному шлифованию по скорости съема материала. В отличие от глубинной схемы обработки, в которой сочетаются большая глубина и малые скорости детали, при ускоренной подаче глубина резания, так же, как и скорость круга, не может иметь значений, оптимальных для условий стружкообразования.

Физическими особенностями шлифования с ускоренной подачей стола яв-

ляются увеличенная толщина среза и перераспределение тепловых потоков в зоне резания. С увеличением скорости детали пропорционально растут толщина среза, сопротивление резанию и ударная нагрузка на режущие зерна. Но интенсивность теплообразования от пластической деформации обрабатываемого материала при повышенной скорости стола будет меньше, чем мощность теплового потока при повышенных скоростях шлифовального круга. При этом с увеличением скорости стола все больше тепла уходит в стружку и все меньше – в обрабатываемую деталь. Зона теплового воздействия уменьшается.

По мнению авторов исследования [133] такие условия высокопроизводительного шлифования обеспечивают не только повышенные требования к качеству поверхностного слоя детали, но и к точности обработки. За счет меньшей интенсивности теплообразования и меньшего нагрева обрабатываемой детали она соответственно меньше расширяется при обработке, не происходит вышлифовыва-

ния термоупругодеформированного материала, в результате чего обеспечивается прямолинейность обрабатываемой поверхности и отсутствует "эффект ванны".

На диаграмме (рис. 9.32) показаны значения мощности шлифования, приведенные к 1 мм высоты круга, в зависимости от скорости стола (50, 100, 190 м/мин) и достигаемой при этом производительности Q_v . Во всех случаях наблюдается

снижение мощности шлифования с увеличением скорости перемещения детали. Максимальное уменьшение N составило почти 30 %, что может быть объяснено только изменением механизма стружкообразования.

При шлифовании с ускоренной подачей стола был использован высокопористый круг из кубического нитрида бора со спеченной связкой.

ПРОФИЛЬНОЕ ГЛУБИННОЕ ШЛИФОВАНИЕ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

Титановые сплавы вследствие своих уникальных физико-механических и химических свойств находят все более широкое применение в различных отраслях машиностроения. За последние годы область их использования помимо авиакосмической техники стала охватывать ракето- и судостроение, химическую, нефтяную и другие отрасли промышленности.

Возрастающие объемы применения титановых сплавов в совокупности с усложняющимися конструкциями изделий из них и высокими требованиями к качеству, надежности и конкурентоспособности сохраняют актуальной проблему их эффективного формообразования механической обработкой.

Практика показывает, что титановые сплавы относительно хорошо обрабатываются лезвийным инструментом, значительно хуже – шлифованием. Вместе с тем, за последние годы широкое распространение в промышленности находит метод глубинного шлифования, который при больших съемах материала одновременно обеспечивает высокие показатели точности и качества обработки. Этот метод хорошо изучен и внедрен при обработке деталей из жаропрочных никелевых сплавов, магнитотвердых материалов и др.

Сложнее ситуация обстоит с освоением глубинного шлифования деталей из титановых сплавов. Известны, например, работы по профильному глубинному шлифованию зубьев точного зубчатого соединения Курвик из титановых сплавов BT6 и BT20 [62], хвостовиков компрессорных лопаток из сплава BT3-1 [88] и прямоугольных пазов на образцах из сплавов BT20 и OT4 [52].

К настоящему времени, к сожалению, отсутствуют научно обоснованные предпосылки и рекомендации по эффективному внедрению различных схем глубинного шлифования деталей из титановых сплавов. Тому имеется несколько причин. Одной из главных является плохая шлифуемость титановых сплавов. Из-за их низкой теплопроводности – в 3... 10 раз ниже, чем у сталей, никелевых и алюминиевых сплавов, образующаяся при обработке теплота концентрируется в тонком поверхностном слое детали, контактирующем со шлифовальным кругом.

Титан и сплавы на его основе относятся к группе адгезионно-активных материалов, для которых интенсивность контактного взаимодействия пары абразив–металл является определяющим фактором обрабатываемости.

Вследствие повышенной химической активности титановых сплавов при высоких температурах процесс шлифования сопровождается взаимодействием титана с абразивом с последующим налипанием частиц металла на абразивные зерна и потерей ими режущих свойств. Чтобы предотвратить это явление, необходимо обеспечить работу шлифовального круга в режиме самозатачивания, что, в свою очередь, достигается подбором его характеристик: размера и материала зерна, твердости, номера структуры и состава связки, а также оптимизацией параметров режима шлифования. Эффективным средством против налипания является также создание защитных пленок путем использования специальных СОТС, которые в большинстве своем экологически не безопасны. Подбирая составы СОТС, можно в десятки раз уменьшить износ абразивного

инструмента и получить его значение при шлифовании титановых сплавов, как и при обработке закаленных сталей.

Теперь можно сравнить условия взаимодействия титановых сплавов и шлифовального круга применительно к схеме глубинного шлифования. Из-за большой толщины слоя металла, удаляемого за один рабочий ход, и малой скорости перемещения заготовки длина контакта круга с обрабатываемой поверхностью и, соответственно, длительность термодинамического воздействия при глубинном шлифовании на один-два порядка выше, чем при маятниковой схеме обработки. В сочетании с трудностями проникновения СОТС непосредственно в закрытую зону резания это становится причиной интенсификации неблагоприятных контактных физико-механических явлений и, как следствие, принципиальной возможности эффективно реализовать процесс глубинного шлифования титановых сплавов.

Глубинное шлифование помимо высокой теплонапряженности сопровождается также большими усилиями, действующими на систему резания в целом и шлифовальный круг в частности, и обильной подачей СОТС под большим давлением. Указанные специфичные условия глубинной обработки предъявляют к инструменту повышенные требования по теплостойкости, жесткости, прочности, водостойкости и химической инертности к обрабатываемому материалу.

В этой связи наличие абразивного инструмента с эксплуатационными свойствами, которые наилучшим образом соответствуют требованиям глубинного шлифования титановых сплавов, становится решающим фактором освоения этого прогрессивного технологического процесса. Проведенные исследования подтверждают этот тезис: в зависимости от характеристики применяемого шлифовального круга максимально возможная глубина шлифования титановых сплавов ВТЗ-1 и ВТ20 до появления прижогов на поверхности в одинаковых условиях об-

работки колебалась от 0,17 до 3,5 мм за проход, или более чем в 20 раз.

Таким образом, решение проблемы глубинного шлифования титановых сплавов должно включать в себя разработку специального абразивного инструмента и оптимизацию условий его применения, включая выбор схемы шлифования и параметров режима высокопроизводительной и бездефектной обработки.

10.1. ВЫСОКОПОРИСТЫЙ АБРАЗИВНЫЙ ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ ГЛУБИННОГО ШЛИФОВАНИЯ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

При глубинном шлифовании применяются высокопористые абразивные круги на керамических связках. Главным их преимуществом является легкое и экономичное профилирование и правка при обработке алмазными роликами в сравнении, например, с кругами из кубического нитрида бора. Для шлифования титановых сплавов в качестве абразивных материалов обычно назначают карбид кремния зеленый или черный, которые наиболее предпочтительны среди других абразивов по своей химической инертности к титану.

Из-за отсутствия отечественных и зарубежных аналогов высокопроизводительного абразивного инструмента повышенной пористости на основе карбида кремния была проведена работа по его созданию применительно к целям и условиям глубинного шлифования титановых сплавов. Были разработаны специальные рецептурные составы, изготовлены и исследованы круги с широким спектром технологических и эксплуатационных свойств: по материалу абразива – карбид кремния зеленый марки 63С и 64С и черный 54С с зернистостью 10, 12, 16 и 25, твердостью в диапазоне от ВМ1 до С1 и с номерами структуры 10, 12, 14 и 16.

Для производственных испытаний были изготовлены на отечественных и зарубежных заводах шлифовальные круги

прямого профиля с размерами 200×20×76, 300×20×127, 450×16×203 и специальные кольца с размерами 115×100×75, 170×100×130.

Возможные варианты составов высокопористой абразивной массы предполагают и различные ее технологические свойства. К ним можно отнести плотность, технологичность изготовления и прочность сырца, деформацию инструмента при спекании, вероятность его разрушения на различных этапах изготовления, стабильность твердости в объеме одного и партии из нескольких кругов, неуравновешенность масс и ее рассеяние в зависимости от состава и типоразмера инструмента и др. В этой связи для изготовления нового высокопористого инструмента из карбида кремния использовались обычные компоненты карборундовых кругов нормальной структуры и керамические связки (КЗ и КЗЗ или их зарубежные аналоги) и принятый для них режим обжига. В качестве наполнителей подбирались выгорающие (органического происхождения) и невыгорающие (в том числе в виде полых тонкостенных полых микросфер) порообразующие компоненты. Были исследованы различные их комбинации как по отдельности, так и в разнообразных сочетаниях по составу, формам и размерам. Основным требованием к технологии изготовления высокопористых кругов было требование по экологической безопасности, что существенно ограничивало поиски оптимального порообразователя. При подборе порообразователей и оптимизации состава высокопористой абразивной массы критерием оптимальности был принят минимум ее себестоимости при различных возможных вариациях изготовления инструмента конкретной заданной характеристики.

У каждого круга до обжига и после измеряли его массу и размеры, а после механической обработки – неуравновешенность масс и возможную рабочую скорость. На основе измерений определя-

ли плотность круга, его деформацию при обжиге, в том числе объемную, а также деформацию по высоте, наружному и внутреннему диаметрам. Твердость инструмента оценивалась одновременно пескоструйным методом по глубине лунки и акустическим методом по частоте собственных колебаний. Для повышения достоверности оценки контролируемых параметров инструмент каждой характеристики изготавливали в количестве от 3 до 8 штук. Результаты тестирования исследованных высокопористых кругов представлены в табл. 10.1.

Широкий диапазон исследованных характеристик дал возможность смоделировать корреляционные связи и взаимосвязанное влияние состава круга – зерна, связки и порообразователей – на его плотность, твердость, объемную деформацию при спекании и дисбаланс для различных зернистостей и номеров структур.

Выполненные исследования позволили разработать наиболее экономичную и экологически безопасную технологию, а также оптимальные рецептурные составы, обеспечивающие при изготовлении высокопористых кругов из карбида кремния минимальные значения объемной деформации в диапазоне 0,7...3,5 % в зависимости от номера структуры и дисбаланса не более 3 г с рабочей скоростью инструмента не менее 50 м/с.

10.2. ИССЛЕДОВАНИЯ ГЛУБИННОГО ШЛИФОВАНИЯ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

Исследования глубинного шлифования были выполнены на станке мод. "Profimat 412" фирмы Blohm и модернизированном станке мод. ЛШ-322 производства Липецкого станкозавода высокопористыми кругами различных характеристик с размерами 200×20×76. Размеры образцов 20×25×80 мм из наиболее распространенных марок и различных по своей структуре и свойствам титановых сплавов ВТЗ-1, ВТ9 и ВТ20 были выбра-

10.1. Технологические и эксплуатационные свойства высокопористых абразивных кругов из карбида кремния

№ п/п	Характеристика круга	Плотность γ , г/см ³		Твердость круга		
		Диапазон значений	Среднее значение	по глубине лунки h_p , мм		
				Диапазон значений	Среднее значение	Диапазон значений
1	64С 16П М1 12 К3	1,34...1,51	1,44	6,0...6,5	6,3	—
2	64С 16П ВМ1 12 К3	1,5...1,52	1,51	8,0...8,3	8,1	—
3	48С 100 J 10 V* (54С 12П М2-3 10 К)	1,54...1,55	1,54	5...5,3	5,15	14,6...14,8
4	49С 100 J 10 V* (64С 12П М3 10 К)	1,63...1,65	1,64	4,3...4,5	4,4	15,6...15,8
5	48С 100 I 12 V* (54С 12П М1-2 12 К)	1,48...1,51	1,49	5,1...6,2	5,5	11,7...12,7
6	49С 100 H 12 V* (64С 12П М1 12 К)	1,47...1,52	1,49	5,7...7,0	6,1	12,7...13,5
7	49С 100 I 12 V* (64С 12П М2 12 К)	1,48...1,52	1,49	5,7...5,9	5,8	12,3...13,3
8	49С 80 G-H 10 V* (64С 16П ВМ2 10 К)	1,56...1,6	1,58	6,2...6,7	6,45	11,4...13,6
9	49С 80 G-H 12 V* (64С 16П ВМ2 12 К)	1,44...1,48	1,46	6,5...6,9	6,7	11,0...12,0
10	49С 80 G 12 V* (64С 16П ВМ2 12 К)	1,78	1,78	2,4...2,6	2,5	—
11	63С 25П С1 10 К33	1,54...1,56	1,55	2,1...2,3	2,2	—
12	63С 16П С1 16 К33	1,64...1,65	1,65	2,1...2,3	2,2	—
13	63С 16П С1 14 К33	1,78...1,80	1,79	2,6...3,3	3,0	—
14	63С 10П СМ2 10 К33	1,47	1,47	7,0...7,2	7,1	11,2...12,1
15	63С 16П ВМ1 12 К33	1,52...1,54	1,53	7,8...8,5	8,2	—

Продолжение табл. 10.1

№ п/п	Деформация круга при обжиге, E_v , %		Рабочая скорость, м/с	Дисбаланс, г	
	Диапазон значений	Среднее значение		Диапазон значений	Среднее значение
1	–	–	40	–	–
2	–	–	35	–	–
3	10,1...10,6	10,3	> 51	–	–
4	7,1	7,1	> 51	–	–
5	0,8...2,7	1,66	> 51	0,5...5,0	2,8
6	0,8...3,6	2,12	> 51	2...3,5	3,1
7	0,6...3,5	1,67	> 51	2...6,5	3,6
8	0,1...1,4	1,01	> 51	0,5...5	3,0
9	1,3...4,5	2,66	> 51	1,0...6,0	3,2
10	0,6...0,8	0,7	> 45	–	–
11	3,5	3,5	> 45	–	–
12	2,5...2,6	2,6	> 45	–	–
13	2,5...3,9	3,4	> 45	–	–
14	2,6...5,7	4,2	> 50	7,0...12,0	9,3
15	1,2...1,8	1,5	> 45	–	–

* Обозначение Carborundum Electrite a.s.

ны после анализа габаритных размеров обрабатываемых поверхностей замков компрессорных лопаток I–V ступеней, а по площади обрабатываемой поверхности превышали их в 2 раза.

Сплавы ВТЗ-1 и ВТ9 относятся к двухфазным ($\alpha+\beta$)-сплавам мартенситного класса, упрочняющимся при термической обработке. Они используются для изготовления в основном дисков и лопаток компрессоров авиационных ГТД. Титановый сплав ВТ20 является представителем группы псевдо- α -сплавов, которые не упрочняются при термической обработке. Он применяется в отоженном состоянии для изготовления нагруженных узлов планера самолета, опор валов и других деталей авиадвигателей.

Эффективность назначения характеристики инструмента и режимов шлифования оценивалась по потребляемой мощности на приводе главного движения, которая была принята в качестве критерия динамической напряженности процесса резания, фактическому съему металла, размерному износу шлифовального круга, удельной производительности и качеству обработки: шероховатости обработанной поверхности, изменению микротвердости и структурным изменениям в поверхностном слое.

Выбор характеристики инструмента. Уже отмечалось, что от характеристики высокопористого круга зависит предельно возможная глубина шлифования за один проход. Такое ограничение предопределено уменьшением размера абразивного зерна и номера структуры и увеличением твердости, а также составом абразивной массы.

Все шлифовальные круги, свойства которых представлены в табл. 10.1, были испытаны при обработке титановых сплавов ВТЗ-1 и ВТ20, а некоторые из них – при обработке сплава ВТ9 в возможном для каждого из них диапазоне режима шлифования. По результатам испытаний и их статистической обработки были разра-

ботаны для каждого круга математические модели связи в виде логарифмических полиномов между потребляемой мощностью, износом круга, удельной производительностью и шероховатостью обработки как выходных параметров процесса, с одной стороны, и параметрами режима шлифования – $v_{кр}$, $v_{ст}$ и t , с другой стороны. Их анализ и применение позволяет оптимизировать различную область применения каждого из них при шлифовании исследованных марок титановых сплавов.

В табл. 10.2 представлены данные по сравнительному анализу различных характеристик высокопористых кругов при шлифовании сплавов ВТЗ-1 и ВТ20 на двух режимах шлифования с постоянной скоростью 20 м/с. На режиме $t = 0,03$ мм и $v_{ст} = 2000$ мм/мин реализована схема маятникового шлифования с производительностью 60 мм³/(мм·мин), на другом режиме $t = 2,5$ мм и $v_{ст} = 30$ мм/мин – схема глубинного шлифования с минутным съемом 75 мм³/(мм·мин). Приведенные данные дают возможность, прежде всего, сравнить эффективность двух схем шлифования. При практически близкой скорости съема металла маятниковая схема шлифования во всех случаях обеспечивает меньшие значения потребляемой мощности N и шероховатости обработанной поверхности Ra . Но если на исследованном режиме маятникового шлифования, например, титанового сплава ВТЗ-1 потребуется удалять припуск, равный 2,5 мм, то время обработки будет в 2,52 раза, а общая затраченная мощность – в 15,6 раз больше, чем при глубинном шлифовании.

Исследованиями установлено, что основные параметры характеристики круга: твердость, зернистость и номер структуры, оказывают сильное влияние на потребляемую мощность. Так, при постоянных условиях шлифования, например, титанового сплава ВТ20 при $v_{ст} = 30$ мм/мин и $t = 2,5$ мм мощность в зависимости от характеристики круга изменя-

10.2. Сравнительный анализ различных характеристик кругов при шлифовании титановых сплавов

Характеристика круга	Сплав	Режим шлифования	N , кВт	Ra , мкм
64С 16П М1 12 К3	ВТ3-1	$t = 0,03$ мм $v_{ст} = 2000$ мм/мин	0,45	1,94
48С 100 J 10 V			1,91	1,13
49С 100 L 10 V			1,62	1,25
48С 100 I 12 V			0,9	0,71
49С 100 H 12 V			1,44	0,78
49С 100 I 12 V			1,26	0,69
49С 80 H 10 V			0,99	0,85
49С 80 H 12 V			1,08	0,9
64С 16П М1 12 К3	ВТ3-1	$t = 2,5$ мм $v_{ст} = 30$ мм/мин	2,43	2,27
48С 100 I 12 V			3,24	2,22
49С 100 H 12 V			3,24	2,09
49С 100 I 12 V			2,88	2,37
49С 80 H 10 V			2,61	–
49С 80 H 12 V			2,34	3,02
64С 16П М1 12 К3	ВТ20	$t = 0,03$ мм $v_{ст} = 2000$ мм/мин	0,54	1,57
48С 100 J 10 V			1,44	0,76
49С 100 L 10 V			1,37	0,9
48С 100 I 12 V			0,9	2,07
49С 100 H 12 V			1,62	0,59
49С 100 I 12 V			1,26	2,8
49С 80 H 12 V			0,9	1,03
64С 16П М1 12 К3	ВТ20	$t = 2,5$ мм $v_{ст} = 30$ мм/мин	2,34	2,62
48С 100 I 12 V			3,06	1,71
49С 100 H 12 V			2,16	2,39
49С 100 I 12 V			2,88	3,25
49С 80 H 10 V			2,38	3,53
49С 80 H 12 V			1,44	4,52

лась до 2,1 раз (для сплава ВТ3-1 колебание мощности составило 39 %). При обработке на режимах чистового шлифования ($v_{ст} = 2000$ мм/мин и $t = 0,03$ мм) изменение потребляемой мощности в зависимости от зернистости, твердости и структуры круга сохраняется – до 1,8 раза (для сплава ВТ3-1 ее изменение составляет в пределах 45 %).

Кроме того, на потребляемую мощность влияет и материал абразивного зер-

на. Так, изготовленные из одинаковой по составу высокопористой абразивной массы два шлифовальных круга из карбида кремния зеленого и карбида кремния черного зернистости 12П и номеру структуры 10 обеспечивали разную динамическую напряженность процесса. Например, в одинаковых условиях глубинного шлифования сплава ВТ20 круг с характеристикой 49С 100 J 10 V (отечественный аналог 64С 12П М3 10 К) обеспечивал меньшую

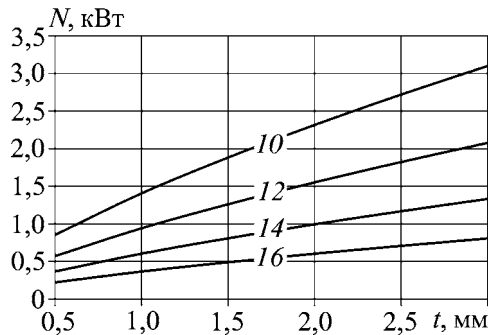


Рис. 10.1. Влияние глубины обработки на потребляемую мощность шлифования сплава ВТЗ-1 кругом 64С 16П М1 12 К с номерами структуры 10, 12, 14 и 16 при $v_{кр} = 20$ м/с, $v_{ст} = 40$ мм/мин

токовую нагрузку и большую стабильность процесса, чем более мягкий круг 48С 100 I...J 10 V (54С 12П М2 10 К).

В ходе исследований была проверена возможность использования для глубинного шлифования титановых сплавов высокопористого круга из электрокорунда белого с характеристикой 25А 12П М1 12 К, который обычно применяется для глубинного шлифования конструкционных легированных сталей и жаропрочных сплавов. При обработке сплава ВТ9 на режиме $v_{кр} = 20$ м/с, с переменными параметрами по скорости подачи $v_{ст} = 20...40$ мм/мин и глубине резания $t = 0,5...1,0$ мм шлифовальный круг указанной характеристики показал низкие режущие свойства, а нагрузка скачкообразно возрастала до 2 раз в сравнении с обработкой в аналогичных условиях кругами из карбида кремния. Кроме того, на обработанной поверхности были отмечены случаи появления прижогов.

По результатам исследований можно сделать важный вывод о том, что оптимальная характеристика высокопористых кругов на керамических связках должна назначаться в зависимости от условий шлифования титановых сплавов. Для условий маятникового шлифования целесообразно применять круги твердостью МЗ...СМ1 со структурой 10...12, а для

глубинного шлифования с циклической правкой инструмента – круги твердостью М1...М2 и структурой 12 и выше. Зернистость абразива зависит от требуемой шероховатости обрабатываемой поверхности, но при глубинном шлифовании титановых сплавов более эффективно работают высокопористые круги с зернистостью 16.

При глубинном шлифовании титановых сплавов большое значение имеет структура абразивного инструмента. Как показывают расчеты, с увеличением структуры от 10 до 16 (соответственно уменьшается объемное содержание абразивного зерна с 42 до 30 %) потребляемая мощность заметно снижается (рис. 10.1). Это снижение тем больше, чем больше глубина обработки.

Анализ схем глубинного шлифования. В зависимости от применяемой схемы шлифования – попутной или встречной – изменяется механизм и характер стружкообразования, величина и направление действия нагрузки на обрабатываемую заготовку и распространение теплового потока в ней.

При испытаниях был проведен сравнительный анализ обеих схем глубинного шлифования. При обработке титанового сплава ВТ9 кругом 64С 16П М1 12 К на режиме $v_{кр} = 20$ м/с, $v_{ст} = 20$ мм/мин, $t = 0,5...1,0$ мм токовая нагрузка и размерный износ инструмента были одинаковыми как при встречной, так и при попутной схемах шлифования. Параметр шероховатости Ra обработанной поверхности при попутной схеме уменьшился почти в 2 раза. При шлифовании сплава ВТЗ-1 кругом 64С 12П М3 10 К в диапазоне режима: $v_{кр} = 20...35$ м/с, $v_{ст} = 100...2000$ мм/мин и $t = 0,03...0,36$ мм – токовая нагрузка при встречной схеме обработки во всех случаях была меньше. Снижение ее значения составило от 9 до 36 % – в зависимости от режима шлифования. Попутная схема обработки обеспечила на всех режимах обработки меньшее значение шероховатости обработанной поверх-

ности. Основные исследования в дальнейшем проводились при встречной схеме глубинного шлифования.

Назначение параметров режима шлифования. При оптимизации режима глубинного шлифования титановых сплавов необходимо учитывать взаимосвязанное влияние параметров характеристики инструмента и режима обработки на выходные параметры процесса.

Потребляемая мощность глубинного шлифования N является очень удобным информативным параметром, который определяет термодинамическое состояние зоны резания. Испытаниями было установлено, что для конкретных условий обработки имеется критическое значение N , превышение которого сопровождается появлением прижогов на обработанной поверхности (рис. 10.2). Ограничение по мощности дает возможность оптимизировать назначение характеристики шлифовального круга и предельно возможное по производительности сочетание глубины резания t и скорости стола $v_{ст}$.

Потребляемая мощность может служить и критерием обрабатываемости титановых сплавов при глубинном шлифовании (рис. 10.3). Так же, как и при маятниковом шлифовании, обрабатываемость титанового сплава ВТ3-1 глубинным шлифованием более низкая, чем у сплавов ВТ9 и ВТ20 [88].

При статистическом анализе экспериментальных данных по глубинному шлифованию всех исследованных титановых сплавов отмечается сильная корреляционная связь между $v_{ст}$ и t , т.е. необходимость их взаимообусловленного назначения (см. рис. 10.2).

В результате статистического обобщения экспериментальных данных по глубинному шлифованию сплава ВТ3-1 при скорости 20 м/с разработана модель связи мощности процесса N с характеристикой круга, скоростью стола и глубиной резания в виде логарифмического полинома:

$$\ln N = 1,768 \ln h_d + 4,001 \ln V_3 - 2,137 \ln A_3 + 0,553 \ln v_{ст} + 0,720 \ln t - 5,371. \quad (10.1)$$

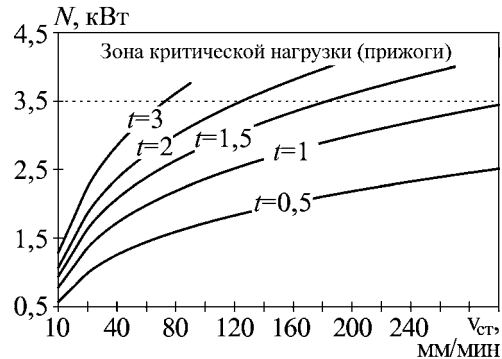


Рис. 10.2. Зависимость потребляемой мощности глубинного шлифования сплава ВТ20 от скорости подачи стола при обработке кругом 64С 12П М2 16 К

В модели (10.1) характеристика высокопористого круга представлена через его твердость по глубине лунки h_d (ГОСТ 18118–79), относительному содержанию

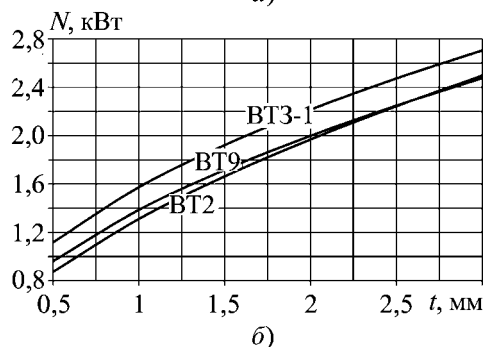
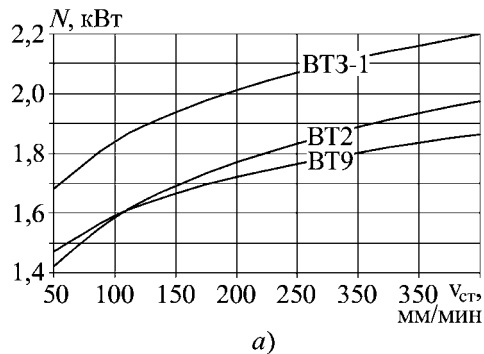


Рис. 10.3. Зависимость мощности глубинного шлифования титановых сплавов кругом 64С 16П М1 12К от скорости подачи стола при $t = 1$ мм (а) и глубины резания при $v_{ст} = 30$ мм/мин (б)

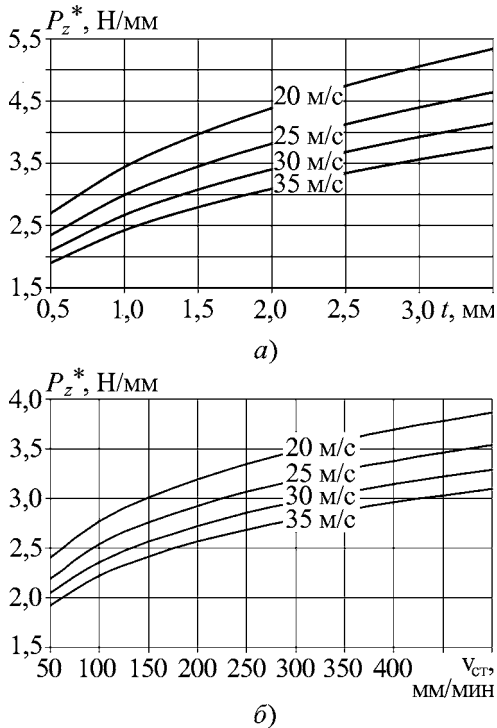


Рис. 10.4. Влияние глубины (а) и скорости подачи стола (б) на приведенную составляющую силы резания в зависимости от скорости шлифования при обработке сплава ВТ3-1 кругом 49С 100 L 10 V ($v_{кр} = 20, 25, 30$ и 35 м/с)

абразивного зерна в объеме инструмента V_z (в экспериментах $V_z = 0,3 \dots 0,42$) и его размерам A_z .

Из корреляционной матрицы входных параметров модели следует, что сильно коррелированы между собой твердость круга и размер абразива (коэффициент парной корреляции равен 0,843), а также, как уже отмечалось, скорость стола и глубина резания ($-0,879$). На мощность глубинного шлифования наиболее сильно влияет размер зерна, меньше – структура и твердость круга. Из исследованных параметров режима обработки влияние глубины больше, чем скорости продольного перемещения детали.

Все вышеприведенные результаты получены при скорости круга 20 м/с, ха-

рактерной для процесса глубинного шлифования. Были проведены также исследования и при более высоких скоростях – до 35 м/с. Стремление повысить скорость шлифования обычно связывают с возможностью одновременного форсирования и других параметров режима и, соответственно, увеличения скорости съема материала. Насколько оправданы эти ожидания при глубинном шлифовании титановых сплавов – на этот вопрос должны были ответить результаты проведенных экспериментов.

Увеличение скорости вращения шлифовального круга $v_{кр}$ безусловно приводит к прямо пропорциональному возрастанию мощности процесса. Но если пересчитать мощность через отношение $N/v_{кр}$ на тангенциальную составляющую силы резания P_z , то можно оценить физическую природу съема материала при повышенных скоростях. При изменении скорости шлифования от 20 до 35 м/с сила резания, т.е. фактические энергетические затраты на сьем материала, уменьшается, и эта тенденция сохраняется при увеличении и скорости стола и глубины резания, как это показано на рис. 10.4 при шлифовании сплава ВТ3-1.

На примере обработки титанового сплава ВТ20 кругом 49С 100 J 10 V (64С 12П МЗ 10 К) установлены другие интересные закономерности глубинного шлифования с повышенными скоростями. Увеличение скорости круга способствует также повышению удельной производительности q за счет снижения размерного износа инструмента. Эффект увеличения скорости шлифования проявляется также в повышении удельной производительности при одновременном увеличении глубины прохода (рис. 10.5). Таким образом, эффективность глубинного шлифования неизменно связана с его скоростью: чем больше скорость круга, тем больший объем материала можно снять за один проход за счет увеличения глубины резания.

Проведенные исследования показали, что при глубинном шлифовании тита-

новых сплавов целесообразно назначать максимально возможную глубину прохода. Максимум ее значения может быть достигнут при увеличении скорости шлифования с применением высокопористых кругов со структурами 12...16.

Назначение СОТС. Состав смазочно-охлаждающей жидкости всегда имел большое значение при шлифовании титановых сплавов, предохраняя рабочую поверхность инструмента от налипания. Эффективные для этих целей составы СОТС были, как правило, токсичны, и их использование создавало дополнительные проблемы в производстве.

Описанные выше исследования были проведены на станке мод. "Profimat 412" с охлаждением СОТС, которая была залита в систему станка для обработки закаленных сталей. Тем не менее, полученные результаты свидетельствуют о том, что при назначении оптимальной характеристики высокопористого круга при глубинном шлифовании титановых сплавов можно исключить нежелательные последствия, характерные для их обработки.

В табл. 10.3 приведены результаты сравнительных лабораторных испытаний по подбору СОТС при шлифовании титановых сплавов ВТ3-1 и ВТ20 кругом с характеристикой 64С 16П М1 12 К при постоянном режиме шлифования $v_{кр} = 27$ м/с, $v_{ст} = 200$ мм/мин, $t = 0,06$ мм. Обработка производилась на станке ЛШ-322, оснащенном приводом медленной подачи стола для глубинного шлифования.

Были испытаны составы СОТС в виде 4%-ных водных растворов солей K_3PO_4 и Na_3PO_4 , а также их комбинации, рекомендованные для шлифования титановых сплавов в работе [52]. Кроме того, проверялся 2%-ный содовый раствор и водные растворы концентратов ИФХАН-33 и ИФХАН-33 (Ф), разработанные в Институте физической химии РАН. Последние составы содержат гидрохлорид натрия, алифатические углеводороды и сернистый ангидрид и, по заключению разработчиков, являются экологически безопасными СОТС.

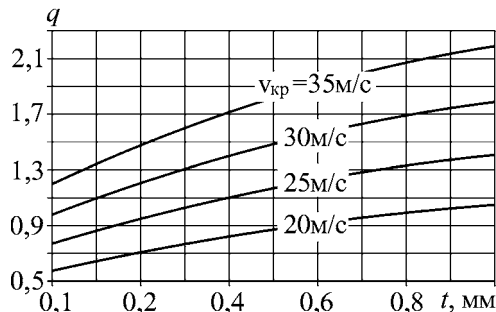


Рис.10.5. Зависимость коэффициента шлифования сплава ВТ20 от глубины обработки

При сравнительном анализе вариантов охлаждения зоны резания, включая шлифование без СОТС, оценивались показатели процесса: относительный съем металла как отношение фактической и номинальной глубины обработки, коэффициент шлифования, шероховатость обработанной поверхности Ra и нагрузка на шпинделе станка, определяемая амперметром.

Обращает внимание, что рекомендованный высокопористый круг специального состава с характеристикой 64С 16П М1 12 К в экстремальных условиях шлифования титановых сплавов ВТ3-1 и ВТ20 без охлаждения на относительно мягком режиме обработки работает в режиме самозатачивания, т.е. практически без налипания стружки на абразивные зерна. Это подтверждают более низкие в сравнении с другими вариантами обработки значения токовой нагрузки, удельной производительности процесса и большая шероховатость обработанной поверхности. Следовательно, в случае необходимости, возможно шлифование титановых сплавов высокопористыми кругами на керамической связке без применения принудительного охлаждения СОТС.

После сравнения результатов применения различных составов СОТС можно сделать вывод, что лучшими составами при шлифовании сплавов ВТ3-1 и ВТ20 среди исследованных вариантов являются

10.3. Влияние состава смазывающе-охлаждающей жидкости на процесс шлифования титановых сплавов

СОТС	Относительный съем металла		Коэффициент шлифования		Шероховатость R_a , мкм		Токовая нагрузка, А
	Диапазон значений	Среднее значение	Диапазон значений	Среднее значение	Диапазон значений	Среднее значение	
Сплав ВТ3-1							
Без охлаждения	0,96... 0,98	0,97	0,34...0,38	0,36	2,01...2,55	2,28	2,1
2%-ный содовый раствор	0,90...0,92	0,91	0,56...0,57	0,57	1,6...1,89	1,75	2,2
4%-ный раствор ИФХАН-33	0,98...1,0	0,99	0,63...0,78	0,70	1,25...1,44	1,35	2,1
4%-ный раствор ИФХАН-33 (Ф)	0,96...1,0	0,98	0,62...0,79	0,70	2,31...2,64	2,48	2,8
4%-ный раствор K_3PO_4	0,93...1,0	0,97	1,61...1,62	1,62	1,51...2,20	1,86	2,3
4%-ный раствор Na_3PO_4	0,97...1,0	0,99	1,62...1,63	1,62	1,35...2,0	1,72	2,2
2%-ный раствор K_3PO_4 + 2%-ный раствор Na_3PO_4	0,98...1,0	0,99	1,08...1,90	1,94	1,50...2,37	1,94	2,3
Сплав ВТ20							
Без охлаждения	0,95...1,0	0,98	0,45...0,52	0,49	1,95...3,01	2,48	2,1
2%-ный содовый раствор	0,95...0,98	0,97	0,36...0,37	0,37	1,7...1,82	1,76	2,2
4%-ный раствор ИФХАН-33	0,98...1,0	0,99	1,2...1,3	1,25	1,31...1,36	1,34	2,2
4%-ный раствор ИФХАН-33 (Ф)	0,93...0,98	0,96	0,7...0,73	0,72	1,46...1,75	1,61	3,0
4%-ный раствор K_3PO_4	0,98...1,0	0,99	0,98...1,0	0,99	0,52...1,14	0,83	2,4
4%-ный раствор Na_3PO_4	0,95...1,0	0,98	0,99...1,25	1,12	1,75...2,25	1,98	2,2
2%-ный раствор K_3PO_4 + 2%-ный раствор Na_3PO_4	0,97...0,98	0,98	1,92...1,96	1,94	1,69...2,19	1,94	2,3

водные растворы солей K_3PO_4 и Na_3PO_4 . Состав ИФХАН-33 (Ф) незначительно уступает по своей эффективности указанным растворам, но, учитывая его экологическую безопасность, именно он рекомендуется для производственных испытаний и внедрения.

Качество обработки. При оценке качества обработки анализировалось влияние режимов глубинного шлифования, а также проводилось сравнение схем маятникового и глубинного шлифования с одинаковой производительностью по съему материала.

Формирование шероховатости обработанной поверхности при глубинном шлифовании титановых сплавов носит необычный характер. При увеличении глубины резания параметр Ra возрастает (рис. 10.6, а), а при увеличении скорости стола шероховатость обработанной поверхности, наоборот, уменьшается. Причем эта закономерность сохраняется для всего исследованного диапазона скоростей шлифования (рис. 10.6, б).

Статистическое обобщение данных изменения Ra при глубинном шлифовании титанового сплава ВТ3-1 различными высокопористыми кругами также подтверждает эту закономерность. Из анализа разработанной модели по аналогии с (10.1) в виде

$$\ln Ra = 3,518 - 2,158 \ln h_d - 9,344 \ln V_3 + 3,713 \ln A_3 - 0,041 \ln v_{ст} + 0,174 \ln t \quad (10.2)$$

следует, что минимальная шероховатость обработанной поверхности будет при шлифовании высокопористыми кругами, у которых выше твердость, меньше размер абразивного зерна и номер структуры. При этом сильно коррелированы между собой объемное содержание зерна в круге V_3 и размер абразива A_3 (коэффициент парной корреляции равен 0,858), а также $v_{ст}$ и t (-0,899), что требует взаимосвязанного их назначения для обеспечения заданной шероховатости обработанной поверхности.

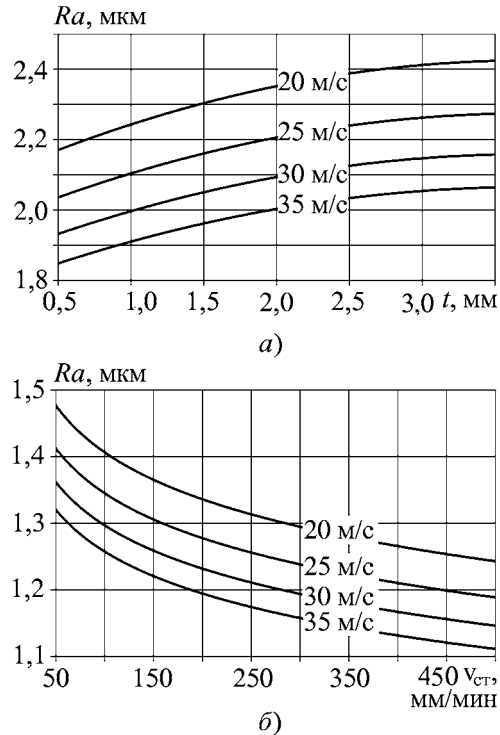


Рис. 10.6. Зависимость шероховатости обработанной поверхности сплава ВТ3-1 от глубины обработки кругом 49С 100 L 10 V (а) и скорости подачи стола (б) при различной скорости круга

Механизм формирования микрорельефа обработанной поверхности при шлифовании обусловлен кинематическим фактором процесса, как результат удаления материала с поверхности в виде множества стружек различных форм и размеров рабочей поверхностью инструмента, рельеф которой поддается статистическому описанию. В случае адгезионного воздействия режущих кромок зерна со стружкой и последующим ее налипанием, как это имеет место при шлифовании титановых сплавов, интенсивность этого процесса оказывает существенное воздействие на механизм формирования микрорельефа. Так как интенсивность налипания связана со временем контактирования абразивного зерна с обрабатываемой поверхностью, то увеличение скорости его

перемещения за счет повышения $v_{кр}$ и $v_{ст}$, по-видимому, становится фактором, благоприятным для снижения шероховатости. Таким образом, создаются предпосылки для формирования на чистовом проходе обработанной поверхности с минимальной шероховатостью.

После шлифования образцов из титанового сплава ВТ9 высокопористым кругом 64С 16П М1 12 К при постоянной скорости 20 м/с с различными сочетаниями по глубине обработки (0,5...2 мм) и скорости стола (20...80 мм/мин) при встречной схеме обработки в поверхностном слое не было обнаружено микротрещин и каких-либо структурных изменений. Микротвердость в поверхностном слое глубиной до 10 мкм при нагрузке 50 г не отличалась от микротвердости сердцевины образца. Шаржирования абразивных зерен в поверхность титанового сплава во всех случаях также не обнаружено.

На двух скоростях 20 и 35 м/с при шлифовании сплава ВТ20 кругом 64С 16П М1 12 К оценивалось влияние условий маятниковой ($v_{ст} = 1000$ мм/мин и $t = 0,03$ мм) и глубинной ($v_{ст} = 100$ мм/мин и $t = 0,3$ мм) схем обработки. Металлографическим анализом не обнаружены структурные изменения в поверхностных слоях образцов во всех случаях обработки и наблюдалась незначительное (до 9 %) снижение микротвердости на поверхности в сравнении с сердцевиной образца.

По результатам металлографического анализа можно констатировать, что глубинное шлифование высокопористым кругом оптимальной характеристики не приводит к заметным структурным изменениям в поверхностном слое титановых сплавов.

В работах [52, 88] также не обнаружены заметные структурные изменения в поверхностных слоях титановых сплавов после маятникового и глубинного шлифования, а также изменения микротвердости на глубине до 450 мкм.

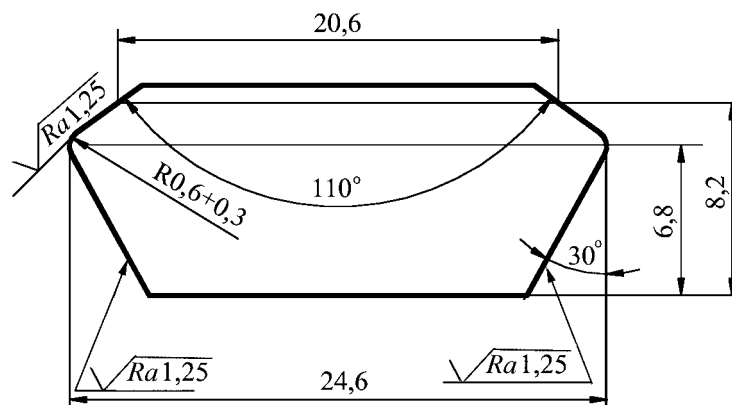
Однако полученные данные не являются основанием для утверждения о том, что поверхностный слой титановых сплавов не претерпевает структурных превращений после шлифования. Этот класс материалов относится к металлам с гексагональной плотноупакованной решеткой, которые, к тому же, в зависимости от внешних условий воздействия способны существовать в различных кристаллографических состояниях. Пластическая деформация в таких металлах из-за ограниченного числа систем скольжения локализуется по отдельным плоскостям скольжения. Так как она охватывает локальные объемы металла, ее трудно зафиксировать не только измерением микротвердости, но и выявлением более тонких структурных изменений – дислокаций [77].

Упрочнение поверхностного слоя титановых сплавов проявляется при измерении остаточных напряжений. После глубинного шлифования сплава ВТ3-1 были зафиксированы сжимающие напряжения с максимальным уровнем 50...80 МПа в поверхностном слое с уменьшением до значений, близких нулю, на глубине 30...35 мкм [88].

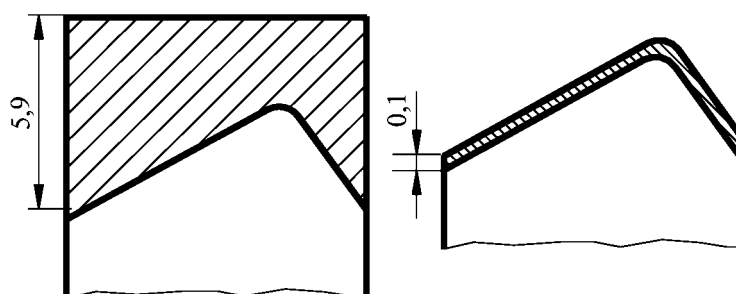
В заключение можно констатировать, что разработанный высокопористый инструмент на керамических связках со структурами 10...16 в сочетании с оптимальными режимами обработки дает возможность эффективной реализации процесса профильного глубинного шлифования различных деталей из титановых сплавов с производительностью до $300 \text{ мм}^3/(\text{мм} \cdot \text{мин})$.

10.3. ОПЫТ ГЛУБИННОГО ШЛИФОВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

Приведенные результаты исследования ориентированы на безусловное их применение для профильного глубинного шлифования хвостовиков компрессорных лопаток из титановых сплавов взамен протягивания. Производственные испы-



Чертеж детали



1-й проход

2-й проход

Рис. 10.7. Пример обработки детали "груз балансировочный"

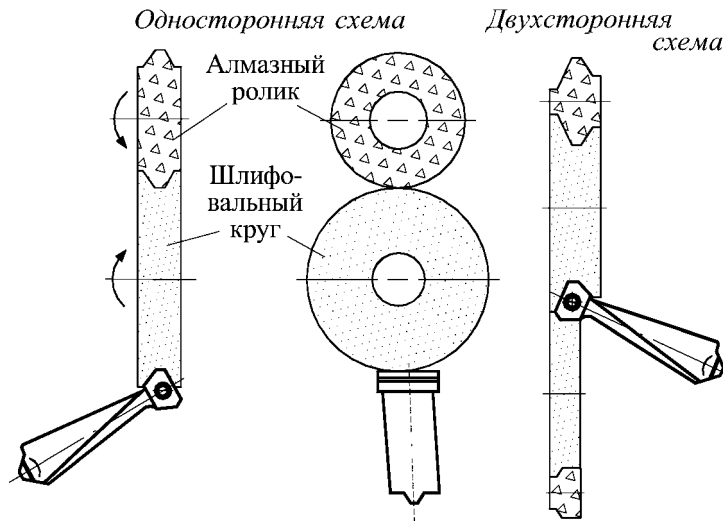
тания и опыт освоения свидетельствуют, что глубинное шлифование эффективно и для других типов обрабатываемых деталей.

В производственных условиях освоена технология изготовления высокоточного шлицевого соединения Курвик из титановых сплавов BT6 и BT20 методом профильного глубинного шлифования. Профилирование зубьев соединения высокопористыми кругами типоразмеров 2 115×100×75 и 2 170×100×130 с характеристикой 49С 80 К 12 V (аналог 64С 16П CM1 12 K) производится на зубошлифовальном станке мод. WNC 30 фирмы Klingelnberg с глубиной от 0,5 до 0,05 мм за проход. Процесс профилирования протекает при низкой температуре, что позволяет использовать в качестве

СОТС масло с температурой вспышки 180 °С.

Проведены испытания профильного глубинного шлифования детали типа "груз балансировочный" из сплавов BT3-1 и BT20 на профилешлифовальном станке мод. ЛШ-220 с охлаждением водным раствором "Аминил-Б". Трапецидальный профиль детали с габаритными размерами 24,6×8,2×120 мм формировался за два прохода при скорости шлифования 25 м/с высокопористым кругом 450×16×203 с характеристикой 49С 80 Н 12 V (64С 16П M1 12 K) при его непрерывной правке (рис. 10.7).

При глубине резания на первом проходе до 5,9 мм и скорости стола 50 мм/мин обеспечивалась производительность по съему материала 295 мм³/(мм·мин). После



10.8. Схемы профильного глубинного шлифования хвостовиков компрессорных лопаток

чистового прохода с глубиной 0,1 мм и скоростью стола 500 мм/мин шероховатость обработанной поверхности по Ra не превышала 0,7 мкм, а ее отклонение от прямолинейности составило менее 0,1 мкм/мм.

Схема профильного глубинного шлифования замков компрессорных лопаток из титановых сплавов аналогична обработке замков турбинных лопаток, но конструкция у них проще (рис. 10.8).

Исследования глубинного шлифования титанового сплава ВТЗ-1 проводились для условий обработки замков елочного профиля с циклической правкой и непрерывной правкой круга в процессе резания [88]. Применяемое оборудование — модернизированный для обработки с непрерывной правкой станок "Матрикс" и станок мод. ЛШ-220, работающий в режиме с циклической и непрерывной правкой. В качестве СОТС использовался серийный для глубинного шлифования состав "Аквол-2".

Правящий инструмент — серийно применяемые алмазные ролики, как

сложнопрофильные, так и плоские для правки периферийных поверхностей круга.

В качестве абразивного инструмента использовались пористые круги из карбида кремния зеленого и черного на керамической связке, а также серийные круги из карбида кремния на бакелитовой связке производства ОАО "Волжский абразивный завод".

В результате исследований было установлено, что глубинное шлифование титановых сплавов пористыми кругами на керамической связке при циклической правке возможно и по производительности находится на уровне глубинного шлифования жаропрочных материалов типа ЖС6К при аналогичных условиях. При этом наблюдается высокая кромкостойкость кругов на керамической связке, что дает возможность преимущественного применения кругов твердостью ВМ1... ВМ2.

Сравнительные исследования показали существенное преимущество кругов повышенной зернистости при всех прочих условиях. Устойчиво полученная произво-

10.4. Насыщение поверхности титанового сплава ВТЗ-1 кремнием после шлифования

Характеристика шлифовального круга	Режимы шлифования		k_2 , %	Δk , %
	t , мм	$V_{\text{сш}}$, мм/мин		
54С 25 М2 12 К10	1,5	100	0,944	0,669
54С 25 ВМ2 12 К10	1,5	100	0,917	0,642
54С 10 ВМ2 12 К10	1	100	0,901	0,626
54С 10 ВМ2 12 К10	0,5	100	0,857	0,852
54С 25 М2 12 К10	0,5	100	0,955	0,680
63С 16Н СМ2 7К	0,0025	15 000	0,895	0,620

дительность кругов характеристики 54С 10 ВМ2 12 К10 составляет $1,67 \text{ мм}^3/(\text{мм}\cdot\text{с})$, кругов с характеристикой 54С 25 ВМ2 12 К10 – $2,1...2,5 \text{ мм}^3/(\text{мм}\cdot\text{с})$.

В табл. 10.4 представлены данные о насыщении поверхностных слоев титанового сплава ВТЗ-1 кремнием при глубинном шлифовании опытными кругами в сравнении с серийным маятниковым шлифованием после протягивания поверхностей замков типа "ласточкин хвост". Исследования выполнены с помощью прибора микроанализатора рентгеноспектрального мод. МАР-1 [88].

Прирост концентрации кремния в процентах определяли по формуле

$$\Delta k = k_2 - k_1,$$

где k_1 , k_2 – концентрация кремния соответственно на эталонной и шлифованной поверхности ($k_1 = 0,275\%$).

Из приведенных данных видно, что насыщение поверхности кремнием при глубинном шлифовании практически не зависит от зернистости абразива, твердости круга и глубины резания. Сколь угодно значимого отличия в насыщении кремнием при глубинной обработке от применяемого в настоящее время в серийных условиях маятникового шлифования со съемом $0,02...0,03 \text{ мм}$ не обнару-

жено. После глубинного шлифования в поверхностных слоях существенных структурных изменений не наблюдается.

Для сравнительных прочностных исследований были изготовлены специальные образцы из титанового сплава ВТЗ-1, обработанные по обеим сторонам методом протягивания и глубинного шлифования. Остаточные напряжения в поверхностном слое на исследуемых протянутых и шлифованных поверхностях (рис. 10.9) являются сжимающими и имеют уровень в пределах $50...80 \text{ МПа}$. При глубинном шлифовании напряжения более стабильны, в то время как у протянутых образцов наблюдается рассеяние их значений, на

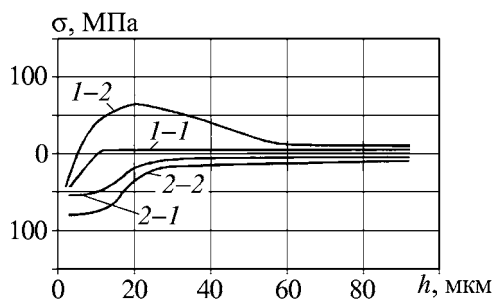


Рис. 10.9. Графики распределения остаточных напряжений образцов, обработанных протягиванием и глубинным шлифованием:
1-1, 1-2 – протягивание; 2-1, 2-2 – глубинное шлифование

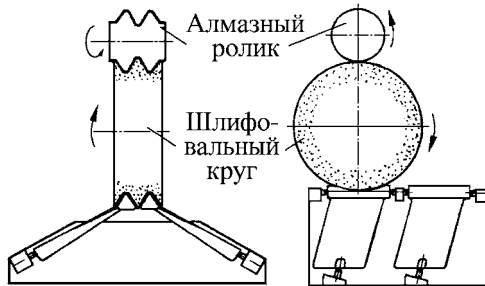


Рис. 10.10. Схема односторонней обработки

глубине более 5 мкм появляются растягивающие напряжения.

Усталостные испытания плоских образцов производились на резонансной установке типа ВЭС-400 по методике сравнительных малоцикловых испытаний. Выбрано базовое число циклов $w = 3 \cdot 10^5$ и начальное напряжение $\sigma_n = 300 \dots 400$ МПа, резонансная частота образцов $f = 430 \dots 450$ Гц.

Установлено, что средний максимальный уровень напряжений протянутых образцов ($\sigma_{\max} = 640$ МПа) на 8 % выше среднего максимального уровня образцов ($\sigma_{\max} = 557$ МПа) после глубинного шлифования. Эти величины значительно превосходят уровень средних максимальных напряжений образцов, шлифованных по серийной технологии методом маятникового шлифования с суммарным съемом 0,025 мм после глубинного шлифования и протягивания ($\sigma_{\max} = 420 \dots 500$ МПа) [88].

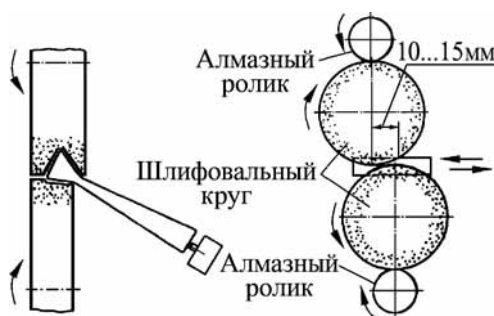


Рис. 10.11. Схема двусторонней обработки

В работе [87] описаны схемы глубинного шлифования замков компрессорных лопаток типа "ласточкин хвост" из титановых сплавов.

Обработка хвостовика типа "ласточкин хвост" методом глубинного шлифования возможна по двум схемам.

1. Односторонняя двухпереходная обработка с перестановкой лопаток на плоскошлифовальном однокруговом станке типа ЛШ-220 (рис. 10.10). Шлифовальный круг профилируется алмазным двухручьевым роликом, содержащим все элементы хвостовика по каждой стороне. Припуск на подошве хвостовика распределяется на два перехода.

2. Однопереходная обработка на станке мод. ЛШ-233. Два одноручьевых алмазных ролика формируют на верхнем и нижнем кругах профили, в совокупности создающие при замыкании общий профиль хвостовика типа "ласточкин хвост" (рис. 10.11).

По производительности обработки обе схемы практически равнозначны, так как одновременно обрабатывается одинаковое количество поверхностей. Число устанавливаемых лопаток в продольном направлении ограничивается длиной стола станка, так как обработка производится с непрерывной правкой.

В первой схеме потери времени связаны с перестановкой лопаток для второго перехода. Первая схема осуществляется на универсальном плоскошлифовальном станке с использованием более простых по конструкции рабочих приспособлений.

Для второй схемы требуется станок в специальном исполнении со смещением центров кругов в продольном направлении. Это требуется для исключения касания кругов при замыкании профиля, что оставляет по линии замыкания полосу неснятого материала и требует ручной доработки. Кроме того, приспособления кассетного типа более сложны конструктивно, а также в доводке и настройке. Преимуществом второй схемы является

возможность автоматической загрузки и выгрузки кассет с обрабатываемыми лопатками при полной автоматизации обработки на автоматических линиях.

Как для односторонней, так и для двусторонней обработки возможно применение раздельной схемы образования профильной части хвостовика и подошвы. Обработка торцов лопатки и выемки на подошве при любой схеме формирования рабочей части замка выделяется в отдельную операцию. Усложнив несколько эту операцию, обрабатывая одновременно и подошву, целесообразно упростить схему образования ответственной размерной части хвостовика лопатки типа "ласточкин хвост" (рис. 10.12).

При этом упрощаются по конструкции и становятся более универсальными правящие алмазные ролики профильной части (рис. 10.12, а). Чтобы упростить конструкцию алмазного правящего инструмента для торцов и подошвы с выемкой, целесообразно, в свою очередь, разделить операции на две – обработка торцов, затем подошвы с выемкой (рис. 10.12, б).

Применение метода глубинного шлифования для обработки замков типа "ласточкин хвост" компрессорных лопаток из титановых сплавов вместо метода притягивания кардинально меняет весь техпроцесс, позволяет максимально его автоматизировать.

Глубинное шлифование титановых сплавов кругами на керамических и бакелитовых связках на примере обработки пазов описано в работе [52]. Испытания проведены при шлифовании образцов из титановых сплавов BT20 и OT4 на плоскошлифовальном станке мод. 3Е711ИВ, оснащенного механизмом замедленного движения стола. Режим шлифования: скорость круга 24 м/с; скорость детали 50 мм/мин; глубина шлифования 10 мм/ход; ширина шлифования 15 мм; длина шлифования 20 мм.

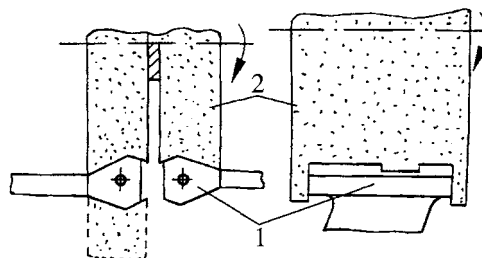


Рис. 10.12. Схема раздельной обработки методом глубинного шлифования элементов хвостовика типа "ласточкин хвост":

а – шлифование профильной части по односторонней и двусторонней схемам;
б – шлифование подошвы торцов и выемки;
1 – обрабатываемые детали; 2 – шлифовальные круги

Пазы сечением 10×15 мм шлифовали за один проход по целому методом встречной подачи. Правку периферии кругов проводили перед началом каждого опыта алмазным карандашом. Торцы круга правили один раз перед началом серии экспериментов.

Исследовано влияние на процесс глубинного шлифования четырех составов СОТС на водной основе:

СОТС 1 – лучший состав на водной основе для шлифования титановых сплавов с присадкой перфторэнантовой кислоты: натрий фосфорнокислый трехзамещенный – 4 %, гексаметафосфат натрия – 0,3 %, сода кальцинированная – 0,3 %, перфторэнантовая кислота – 0,06 %;

СОТС 2 – применяется для глубинного шлифования сталей и сплавов на никелевой основе; в составе нитрит натрия – 0,3 %, триэтаноламин – 0,4 %;

СОТС 3 – 5%-ная эмульсия "Азерол-2", применяется для средних и тяжелых режимов шлифования, в ее состав входит эмульгатор, антикоррозионные и противозадирные присадки;

СОТС 4 – 5%-ный раствор "Аквол-14", синтетический состав на основе полиалкиленгликолей с добавлением трибоактивных присадок.

Охлаждающую жидкость подавали по ходу вращения круга методом полива через направляющий лоток с расходом 20...25 л/мин. Результаты испытаний кругов и СОТС представлены в табл. 10.5.

Бесприжоговое шлифование высокопористыми кругами на керамической связке обеспечивает только СОТС 1 (образование прижога на шлифованной поверхности образца определяли методом травления). При обработке кругами на бакелитовой связке бесприжоговое шлифование возможно со всеми исследованными составами. СОТС 1 превосходит другие составы и по другим показателям процесса. Так, например, коэффициент шлифования кругами на керамической связке с охлаждением СОТС 1 в 1,5...1,6 раза, а на бакелитовой – в 3,0...4,7 раза выше, чем с охлаждением СОТС 2, 3 и 4. В результате снижения износа круга обеспечивается меньший радиус перехода от дна паза к его стенке.

Удельная мощность шлифования кругами на керамической связке с охлаждением СОТС 1 в 1,2 раза ниже, чем с остальными. Для кругов на бакелитовой связке это соотношение равно 0,85.

Выбор характеристики круга сделан на основании результатов исследований, представленных в табл. 10.5, при шлифовании титанового сплава ОТ4. С увеличением твердости кругов удельная мощность и коэффициент шлифования возрастают. В частности, для кругов на бакелитовой связке зернистостью 12 с увеличением твердости удельная мощность и коэффициент шлифования возрастают соответственно в 1,6 и 3,0 раза.

Одним из главных критериев при выборе характеристики инструмента является отсутствие прижогов на обработанной поверхности детали. Бесприжоговое шлифование высокопористыми керамическими кругами зернистостью 12 обеспечивается при твердости инструмента ВМ2...М1, для зернистости 25 твердость круга должна быть не выше ВМ2. Применение кругов на бакелитовой связке позволяет повысить твердость до М3.

Коэффициент шлифования при обработке кругами из карбида кремния на бакелитовой связке для зернистости 12 в 1,7 раза выше, чем при шлифовании кругами на керамической связке, а для зернистости 25 коэффициенты шлифования одинаковы. Кроме того, круги на бакелитовой связке обладают большей кромкостойкостью (см. табл. 10.5).

Результаты лабораторных исследований были проверены в производственных условиях при глубинном шлифовании деталей из титанового сплава кругами типоразмера 1 450×20×203 следующих характеристик: круги на бакелитовой связке 54С 12 М2...М3 8 Б; круги высокопористые на керамической связке 54С 12 ВМ2 10 К10. Круги указанных характеристик обеспечивают бесприжоговое шлифование и требуемые геометрические размеры обрабатываемых деталей.

Для глубинного шлифования деталей из титановых сплавов с периодической правкой круга можно рекомендовать высокопористые круги на керамической связке твердости ВМ2 и круги на бакелитовой связке твердостью М2...М3. В качестве охлаждающей жидкости следует применять СОТС 1.

Обработку пазов с непрерывной правкой шлифовального круга осуществляли на специальном станке для глубинного плоского шлифования мод. ЛШ-220. Испытывали круги из карбида кремния зеленого и черного на бакелитовой и керамической связках и высокопористые на керамической связке. Задача исследования заключалась в выборе характеристики круга, режимов шлифования и правки, обеспечивающих радиус перехода от дна канавки к стенке не более 0,1 мм, отсутствие прижогов и параметр шероховатости поверхности Ra не более 2,5 мм.

Результаты испытаний оценивали по режущей способности, скорости изнашивания абразивного инструмента, силам и коэффициенту шлифования, радиусу перехода от дна паза к стенке, шероховатости поверхности и наличию прижогов.

10.5. Результаты испытаний кругов и СОТС при глубинном шлифовании пазов

Сплав	СОТС	Характеристика шлифовального круга	Коэффициент шлифования	Удельная мощность шлифования, Вт/мм	R_a , мкм	Радиус паза, мм	Наличие прижогов
ВТ20	1	54С 25 ВМ2 12 К10 НК40	2,34	5,6	0,27	0,79	Нет
		54С 25 М1 12 К10 НК40	2,64	5,8	0,24	0,73	Есть
		54С 25 М2 8 Б	1,64	5,5	0,36	0,65	Нет
		54С 25 СМ1 8 Б	2,13	6,4	0,35	0,58	Есть
		54С 25 М2 12 К10	3,42	6,8	0,27	0,59	Есть
	2	54С 25 ВМ2 12 К10 НК40	1,58	6,9	0,28	1,15	Есть
		54С 25 М2 8Б	0,55	4,9	0,40	1,02	Нет
	3	54С 25 ВМ2 12 К10 НК40	1,39	6,8	0,32	1,21	Есть
		54С 25 М2 8Б	0,40	4,6	0,40	1,36	Нет
	4	54С 25 ВМ2 12 К10 НК40	1,38	6,8	0,37	1,50	Есть
		54С 25 М2 8Б	0,31	4,7	0,43	1,62	Нет
ОТ4	1	54С 12 ВМ2 12 К10 НК40	0,61	5,9	0,30	0,76	Нет
		54С 12 М2 12 К10 НК40	0,77	7,4	0,32	0,59	Есть
		54С 25 ВМ2 12 К10 НК40	1,59	5,8	0,33	0,89	Нет
		54С 25 М1 12 К10 НК40	1,71	6,0	0,32	0,86	Есть
		54С 25 М3 12 К10	1,88	10,2	0,31	0,84	Есть
		54С 12 М2 28 Б	1,06	6,1	0,30	0,58	Нет
		54С 12 М2 38 Б	1,14	6,9	0,40	0,50	Нет
		54С 12 СМ1 8 Б	2,04	7,7	0,38	0,50	Есть
		54С 12 С 28 Б	3,22	9,9	0,40	0,47	Есть
		54С 25 М 28 Б	1,19	5,7	0,38	0,70	Нет
		54С 25 М3 8 Б	1,50	6,2	0,36	0,64	Нет
		54С 25 СМ1 8 Б	1,80	6,7	0,42	0,60	Есть
		54С 25 С1 8 Б	2,14	8,2	0,40	0,36	Есть
		54С 25 М2 12 К10	2,11	7,0	0,42	0,68	Есть

Установлено, что при попутном шлифовании на поверхности образца (дно паза) появляется прижог независимо от режима правки. Скорость правки влияет в основном на радиус перехода от дна паза к стенке. При встречном шлифовании бесприжоговую обработку обеспечивают круги твердостью МЗ и мягче, радиус перехода от дна паза к стенке меньше, по сравнению с кругами аналогичной твердости для попутного метода шлифования.

Для глубинного шлифования с непрерывной правкой круга скорость износа круга и его режущая способность по скорости съема материала функционально определяются режимными факторами. Износ зависит от подачи правящего ролика, а съем материала определяется скоростью стола и глубиной шлифования. С увеличением скорости стола и подачи на правку пропорционально возрастает соответственно режущая способность и скорость износа круга. С увеличением глубины шлифования режущая способность возрастает почти пропорционально.

Все исследованные круги обеспечивали получение шероховатости поверхности, не превышающей $Ra = 2,5$ мкм. Наименьшее значение сил шлифования получено при обработке кругами на бакелитовой связке, но при неудовлетворительных результатах по кромкостойкости. Для получения радиуса паза 0,1 мм скорость правки должна быть более 8 мкм/имп, что приводит к большому расходу абразивного инструмента. Требуемое значение радиуса паза получено кругами из карбида кремния на керамической связке, износ инструмента при этом в 2–3 раза ниже.

Показатели процесса шлифования титановых сплавов, по мнению В.А. Носенко [52], зависят от температурно-силовых условий взаимодействия абразива с металлом, регулировать которые можно путем изменения режимов шлифования. С повышением скорости круга возрастает контактная температура в зоне шлифования и создаются благоприятные условия

для интенсификации взаимодействия абразива со сплавом титана. Это приводит к налипанию сплава на вершины зерен и ухудшению качества шлифованной поверхности. При низких скоростях круга возрастает механическая нагрузка на абразивное зерно, что приводит к повышенному износу круга и ухудшению шероховатости обрабатываемой поверхности. Глубина шлифования и скорость продольного хода стола также изменяют температурно-силовые условия шлифования и существенно влияют на износ круга и качество обработанной поверхности.

При скоростях круга 12...15 м/с можно достигнуть приблизительно одинакового значения коэффициента шлифования кругами из электрокорунда и карбида кремния. Увеличение скорости свыше 20 м/с вызывает резкое ухудшение режущих свойств электрокорундовых кругов, повышение их износа и ухудшение качества поверхности, в то время как износ кругов из карбида кремния при такой скорости уменьшается. Однако, в связи с активизацией адгезионных процессов и ухудшением состояния обработанной поверхности (ростом остаточных напряжений, появлением следов схватывания, являющихся концентраторами напряжений) при шлифовании кругами из карбида кремния необходимо руководствоваться следующим: при черновой обработке рекомендуется повышать скорость до максимально возможной, а при чистовой обработке снижать скорость на 50 % с одновременным уменьшением глубины шлифования.

Проведенные исследования [52] и практика обработки титановых сплавов показывают, что круги из карбида кремния на бакелитовой связке целесообразно использовать на следующих режимах: скорость круга 25...30 м/с, глубина шлифования 0,01...0,02 мм, скорость обрабатываемой детали при плоском шлифовании 0,20...0,25 м/с, при круглом шлифовании 0,4...0,6 м/с. Для кругов из корундовых материалов рабочая скорость должна быть не более 15 м/с.

Повышению эффективности процесса шлифования способствует применение кругов из сверхтвердых материалов – алмаза и эльбора. Но и в данном случае большое значение имеет выбор связки инструмента. Например, при обработке кругами из эльбора на бакелитовой связке коэффициент шлифования всего в 1,3 раза выше, чем кругами из карбида кремния. Расход алмаза в кругах на бакелитовой связке при шлифовании титановых сплавов в 3,5–17 раз больше, чем при шлифовании термообработанных сталей Х15Н5Д2Т, 18ХГТ, 30ХГТ. Износ инструмента значительно снижается при шлифовании титановых сплавов алмазными кругами на металлической связке. Алмазные круги на металлической связке рекомендуются на операции шлифования пера

лопаток из титановых сплавов. Наибольшая эффективность достигается при обработке спинки и корыта лопаток. Подгонка профиля пера лопатки осуществляется в основном кругами из карбида кремния, вследствие трудностей профилирования алмазного инструмента [52].

При шлифовании титановых сплавов и особенно при глубинных схемах обработки необходимо сбалансировано назначать параметры характеристики шлифовального круга. Чем меньше зернистость инструмента, тем меньше по твердости он должен быть. Увеличение номера структуры дает возможность расширить диапазон возможных сочетаний зернистость–твердость и тем самым гарантировано обеспечить бездефектное шлифование.

ШЛИФОВАНИЕ МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Магнитные материалы представляют особый класс конструкционных материалов, специфичность которых заключается в их чувствительности к условиям шлифования. Повышенная термодинамическая напряженность в зоне резания становится фактором изменения свойств, прежде всего магнитных, у шлифуемых материалов. Из-за низкой теплопроводности и хрупкости магнитных материалов в тонком поверхностном слое быстро аккумулируется в больших количествах теплота, которая приводит к необратимым изменениям структуры сплава, разупрочнению границ зерен и, как следствие, образованию трещин и сколов на обрабатываемой поверхности. Идиосинкразия к условиям шлифования сильно зависит от химического состава сплавов.

В данной главе приведены результаты систематизированных и комплексных исследований влияния структурного строения высокопористых кругов и режимов шлифования магнитных материалов на его выходные характеристики и сравнительная оценка эффективности схем малярного и глубинного шлифования.

11.1. ПРИМЕНЕНИЕ МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ОСОБЕННОСТИ ИХ ОБРАБОТКИ

В современном приборостроении и машиностроении широкое распространение для изготовления различных деталей получили магнитные материалы. Они условно делятся на две большие группы: магнитотвердые и магнитомягкие материалы.

Первая группа материалов – это постоянные магниты и сплавы, характеризующиеся трудностью намагничивания и

сохраняющие остаточный магнетизм при снятии намагничивающего поля даже под действием внешних размагничивающих сил. К этой группе относят литейные сплавы ЮНД4, ЮНДК24, АЛНИСИ, ЮНДК15, сплавы различных марок систем Fe-Co-V, Ag-M-Al, Fe-Ni-Cu и др.

К этой же группе относятся прессованные и спеченные магниты из оксидов кобальта CoO и железа $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_3\text{O}_4$ – КУНИК01 и КУНИК02, прессованные и металлокерамические магниты из порошков АЛНИ, АЛНИКО, МАГНИКО, а также прессованные и спеченные изделия из гексагонального текстурованного комплексного оксида $\text{BaO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$ – ФЕРРО-КСДУР или магнитотвердый феррит.

Постоянные магниты являются неотъемлемым элементом многих магнито-электрических машин, аппаратов и приборов, выпускаемых электротехнической, радиотехнической, приборостроительной и другими отраслями промышленности. Потребность в постоянных магнитах особенно возросла в последнее время в приборостроении и во многих других областях техники, в том числе в медицинских аппаратах, бытовых устройствах и т.д. Однако механическая обработка магнитных материалов вызывает серьезные затруднения. Литые сплавы постоянных магнитов обрабатываются главным образом шлифованием и частично электроэрозионным методом. Обработка металлическим инструментом считается практически невозможной, так как при этом нарушается геометрия изделия и выкрашивание части магнита на входе и выходе инструмента.

Магнитомягкие материалы предназначены для изготовления изделий, работающих в слабых переменных полях. Эти

материалы характеризуются тем, что они легко намагничиваются, но весьма мало сохраняют или вообще не сохраняют магнетизм при снятии намагничивающего поля. К магнитомягким материалам относятся технически чистое железо, различного рода электротехнические стали класса Э, пермаллой 50Н, 50НХС, 80НХС, 79НМ, 81НМА, альфенолы Ю16, 16ЮИХ, сендасты, альсиферы, а также спрессованные и спеченные из порошков оксидов магнитомягкие ферриты никель-цинкового и марганец-цинкового состава.

Особенностью литых сплавов для постоянных магнитов является их высокая твердость, хрупкость, низкая механическая прочность, склонность к сколам и трещинам. До настоящего времени шлифование является практически единственным методом обработки поверхности литых постоянных магнитов. С развитием электрофизических и электрохимических методов обработки появилось возможность применения этих методов для обработки поверхности магнитов.

Шлифование применяется для обработки плоскостей, наружных и внутренних поверхностей тел вращения, а также фасонных поверхностей. Операции шлифования подразделяются на предварительные (до термомагнитной обработки, с целью удаления основного припуска) и окончательные (после термомагнитной обработки, с целью получения окончательно заданных размеров). Шлифовальное оборудование работает в очень тяжелых условиях, так как припуски на обработку в силу специфических условий получения деталей из магнитных сплавов составляют значительную величину (от 0,5 до 10 мм). Обработка выполняется на универсальном шлифовальном оборудовании электрокорундовыми кругами на керамической связке или мягкими абразивными кругами на бакелитовой связке.

По механической обработке магнитных сплавов в литературе имеются лишь общие указания, зачастую противоречивые. К сожалению, в настоящее время это

приводит к тому, что на различных предприятиях существуют самые различные технологические рекомендации как по выбору абразивных инструментов, так и по назначению режимов резания.

В связи с возрастающими объемами потребления магнитных материалов в последние годы остро встала проблема повышения производительности их шлифования. Большой объем занимает при этом шлифование кругами нормальной структуры из белого электрокорунда и монокорунда. Однако эти круги не могут обеспечить повышенные требования по производительности процесса и качеству обработанной поверхности деталей. Это объясняется сравнительно низкой твердостью применяемых шлифовальных кругов, которая не соответствует твердости магнитных материалов. Производительность процесса абразивной обработки можно увеличить в 1,5...2 раза, повышая твердость шлифовального круга от МЗ до С1, но повышение твердости инструмента приводит к образованию трещин, вырывов и сколов на обрабатываемом материале.

Круги на керамических связках обеспечивают большую производительность и в 10...12 раз меньше расход инструментов, чем круги на бакелитовой связке. Работоспособность абразивных кругов и интенсивность их изнашивания также существенно зависят от вида шлифования. Так, по данным [14], если при плоском шлифовании магнитов износ абразивного круга пропорционален съему материала, то при круглом шлифовании он значительно выше. Например, изнашивание кругов на керамической связке при скорости съема сплава 8,3 мм³/с при круглом шлифовании в среднем в 10...20 раз выше, чем при плоском.

Производительность и качество шлифования магнитных материалов в последние годы удается повысить за счет применения алмазных и эльборовых кругов.

Удельный расход алмазов при обработке магнитотвердых сплавов достаточно высок и доходит на операциях наружного шлифования до 30 мг/г, а на операциях круглого внутреннего шлифования до 15 мг/г. При этом применение алмазных кругов в производстве повысило производительность труда только на 12...15 % и незначительно уменьшило шероховатость шлифованных поверхностей.

Хорошие результаты обеспечивают при шлифовании постоянных магнитов эльборовые инструменты. Круги на основе кубического нитрида бора рекомендуются применять на окончательных операциях шлифования при удалении припуска не более 0,3 мм. При этом круги на керамических связках обладают более высокой стойкостью, производительностью и обеспечивают получение параметра шероховатости в пределах $Ra = 0,5...1,0$ мкм, а круги на органических связках характеризуются более высокими режущими свойствами, способностью к самозатачиванию, не засаливаются и не образуют шлифовочных трещин и прижогов.

Шероховатость поверхностей, обработанных эльборовыми кругами на органических связках, достигает значения $Ra = 0,15$ мкм. Эльборовые круги на операциях шлифования труднообрабатываемых магнитных сплавов обеспечивают по сравнению с абразивным шлифованием рост производительности труда не менее чем в 1,5 раза при стойкости между правками в 20...50 раз больше стойкости абразивных кругов.

Автором предложен и совместно с Т.С. Балкаровым [4] исследован иной подход к совершенствованию технологии шлифования магнитных материалов.

Специфичность их обработки обусловлена двумя основными причинами. С одной стороны, детали из магнитных материалов предрасположены из-за своей хрупкости к механическим повреждениям обрабатываемых поверхностей. Другой особенностью шлифования магнитных

материалов является существенное снижение (иногда до 100 раз) магнитных свойств поверхностного слоя детали из-за совместного действия силового и температурного факторов. Поэтому управление процессом шлифования магнитных материалов сводится к подбору таких характеристик инструмента, параметров режима обработки и условий охлаждения, чтобы свести к минимуму термодинамическое воздействие на обрабатываемую заготовку.

Эксплуатационные возможности высокопористого абразивного инструмента вполне отвечают указанным требованиям. Кроме того, этот класс инструмента позволяет освоить более производительную схему обработки – глубинное шлифование взамен маятникового, традиционно используемого в производстве изделий из магнитных материалов.

11.2. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СХЕМ МАЯТНИКОВОГО И ГЛУБИННОГО ШЛИФОВАНИЯ

Чтобы ответить на вопрос, насколько эффективно глубинное шлифование в сравнении с маятниковой схемой обработки, было выполнено обстоятельное исследование выходных параметров сравниваемых процессов. Особое внимание было уделено анализу динамической напряженности в зоне резания, интенсивность которой становится наиболее важным фактором эффективности шлифования магнитных материалов.

Методика проведения экспериментальных исследований. Исследования проводились на модернизированном плоскошлифовальном станке мод. ЗГ71, который позволяет работать по схемам глубинного и маятникового шлифования. Основная идея модернизации – максимальное использование базовых узлов станка. Станок был оснащен приводом медленной подачи стола. Узел правки шлифовального круга был установлен на столе. В качестве правящего инструмента

применялся алмазный правящий ролик прямого профиля с размерами $100 \times 30 \times 52$ мм. Алмазный правящий ролик был изготовлен из синтетических алмазов марки АСО зернистостью 250/200. Правка осуществлялась при попутной схеме. Режимы правки были следующие: скорость ролика $v_p = 18$ м/с, врезная подача $S_{вр} = 1$ мм/мин, подача на глубину $t = 0,06$ мм, время выхаживания $\tau = 2$ с.

Система подачи охлаждения спроектирована и изготовлена с учетом теплонапряженности процесса глубинного шлифования. Расход СОТС для очистки периферии круга составлял 24 л/мин, а в зону шлифования – 88 л/мин при давлении 0,23 МПа. В качестве СОТС использовался "Аквол-10М".

Силы резания измеряли при помощи универсального динамометра УДМ-100 конструкции ВНИИ, который позволяет регистрировать при плоском шлифовании две основные составляющие силы резания. Динамометр УДМ-100 тарировался с помощью переносного динамометра системы Токаря ДОС-0,5.

Измерение износа абразивного круга производилось переносом профиля абразивного круга после шлифования на тонкую пластину (лезвие) путем врезания пластины в круг с последующим ее измерением на микроскопе БМИ-1 при 50-кратном увеличении.

Расчетом определялась скорость изнашивания абразивного круга и минутный съем материала. Параметр шероховатости обработанной поверхности Ra замеряли на профилограф-профилометре мод. 202.

Обрабатываемый материал: заготовка магнитотвердого материала ЮНДК35Т5 длиной в направлении шлифования 50 мм, шириной 8 мм. В каждом опыте производился съем слоя металла толщиной 1 мм. Каждый опыт повторяли 5 раз. На основании полученных результатов определяли средние значения и статистические характеристики – средне-

квадратичные отклонения СКО и коэффициент вариации КВ.

Для выявления лучшей схемы шлифования было проведено исследование работоспособности кругов при двух схемах шлифования магнитотвердого материала: маятникового и глубинного. Режимы маятникового и глубинного шлифования назначались таким образом, чтобы производительность шлифования по обеим схемам была одинакова, что обеспечивалось сочетанием скорости стола и глубины обработки при постоянной скорости круга, равной 10 м/с (табл. 11.1). Исследовалось влияние минутного съема материала на динамическую напряженность процесса, энергоемкость, шероховатость обработанной поверхности и скорость изнашивания круга.

В исследованиях использовались серийный высокопористый абразивный круг производства ОАО "Завод "Ильич", в котором в качестве наполнителя применялся перлит; высокопористый круг с 5%-ным содержанием выгорающих наполнителей – фруктовых косточек; круг с содержанием 5 % выгорающих наполнителей – фруктовых косточек и 5%-ным содержанием невыгорающих наполнителей – корундовых микросфер и стандартный абразивный круг 8-й структуры. Были приняты следующие обозначения наполнителей в маркировке кругов: П – перлит; МС – корундовые микросферы; КФ – фруктовые косточки.

Исследования проводились на абразивных кругах одной и той же зернистости, твердости и связке. Абразивные круги имели следующие характеристики:

24А 16 М2 12 К5/П40-15 (1);

24А 16 М2 12 К5 КФ5 (2);

24А 16 М2 12 К5 МС5 КФ5 (3);

24А 16 М2 8 К5 (4).

Сравнивались между собой три высокопористых круга 12-й структуры с шлифовальным кругом 8-й структуры.

11.1. Режимы одинаковой производительности при маятниковой и глубинной схемах шлифования

Скорость круга $v_{кр}$, м/с	Скорость стола $v_{ст}$, м/мин	Глубина шлифова- ния t , мм	Минутный съём материала Q_w , мм ³ /(мин·мм)
40	20/0,2	0,02/2	6,6
10	5/0,05	0,02/2	1,6
10	20/0,2	0,005/0,5	1,6
10	5/0,05	0,005/0,5	0,42

Примечание. В числителе даны режимы шлифования при маятниковой схеме, в знаменателе – при глубинной схеме шлифования.

Режимы шлифования в табл. 11.1 подобраны таким образом, чтобы во всех случаях обработки обеспечить отсутствие на обработанной поверхности образца дефектов шлифовочного характера.

Высокопористые круги различных составов, но одной характеристики были выбраны для того, чтобы в процессе исследований получить ответы на вопросы:

- Являются ли высокопористые круги в принципе эффективным инструментом шлифования магнитных материалов независимо от их рецептурного состава?
- Сохраняется ли общий характер закономерностей процесса шлифования по обеим технологическим схемам высокопористыми кругами различных составов?
- Как велико влияние рецептурного состава высокопористых кругов на их работоспособность при обработке магнитных материалов?

Исследуемыми параметрами процесса шлифования были: минутный съём материала Q_w , мм³/(мм·с); скорость изнашивания абразивного круга $Q_{кр}$, мм³/(мм·с); коэффициент шлифования q , радиальная P_v (Н) и тангенциальная P_z (Н) составляющие силы резания, энергоёмкость процесса шлифования η (Дж/мм) и шероховатость обработанной поверхности Ra (мкм).

Энергоёмкость и напряжённость шлифования. Для оценки работоспособности абразивного круга по силовым и энергетическим параметрам, для двух схем шлифования важно знать динамическую напряжённость и удельную энергоёмкость процесса шлифования, которая определяется соответственно по формулам:

$$\varepsilon = \frac{P}{L_k}; \quad (11.1)$$

$$\eta = \frac{P v_{кр}}{v_{ст} t}, \quad (11.2)$$

где P – равнодействующая сила резания, L_k – длина дуги контакта.

Формула (11.1) показывает величину силы резания, приходящую на единицу длины дуги контакта, а формула (11.2) количество энергии, затрачиваемое для снятия единицы объема материала.

На рис. 11.1 и 11.2 показаны графики зависимостей удельной энергоёмкости и динамической напряжённости от минутного съёма материала при обработке магнитотвёрдого материала ЮНДК35Т5 при маятниковой и глубинной схемах шлифования.

Анализ экспериментальных данных показывает, что при съёме одинакового объема материала при глубинном шлифовании затрачивается больше энергии, чем

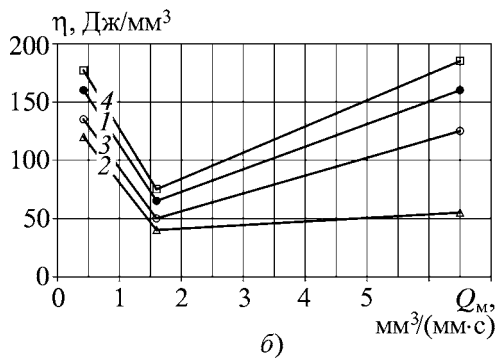
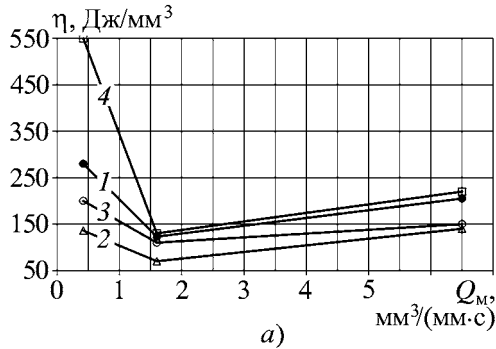


Рис. 11.1. Влияние минутного съема материала на удельную энергоемкость при глубинном (а) и маятниковом шлифовании (б):

1 – 24А 16 М2 12 К5/П40-15; 2 – 24А 16 М2 12 К5 КФ5; 3 – 24А 16 М2 12 К5 МС5 КФ5; 4 – 24А 16 М2 8 К5

при маятниковом. Однако динамическая напряженность значительно меньше при глубинной схеме шлифования.

Эта особенность глубинного шлифования имеет существенное значение при обработке магнитотвердых материалов, так как по своим физико-механическим характеристикам они относятся к хрупким материалам, и значительные силовые воздействия на обрабатываемую поверхность приводят к образованию трещин и сколов. Кроме того, при маятниковой схеме шлифования характер воздействия силы резания на обрабатываемую поверхность имеет иной характер, чем при глубинной.

При глубинном шлифовании возникающая в процессе обработки сила реза-

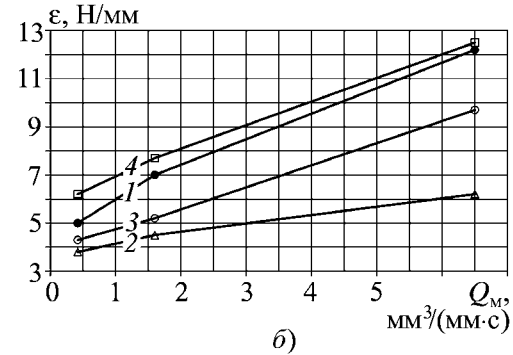
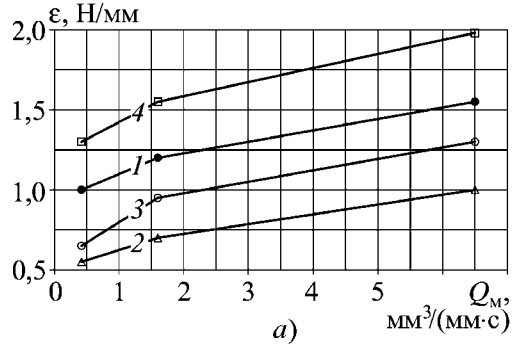


Рис. 11.2. Влияние минутного съема материала на динамическую напряженность при глубинном (а) и маятниковом шлифовании (б):

1 – 24А 16 М2 12 К5/П40-15; 2 – 24А 16 М2 12 К5 КФ5; 3 – 24А 16 М2 12 К5 МС5 КФ5; 4 – 24А 16 М2 8 К5

ния сначала, постепенно увеличиваясь по мере врезания абразивного круга в деталь, стабилизируется и затем имеет постоянную величину по всей длине обработки детали. При выходе абразивного круга из зоны шлифования она постепенно снижается.

В условиях маятникового шлифования сила резания воздействует на обрабатываемую поверхность очень короткое время, и ее воздействие имеет скачкообразный характер. Если учесть, что при маятниковой схеме шлифования необходимый припуск снимается за несколько десятков проходов, то обрабатываемая поверхность испытывает многократные циклические динамические воздействия.

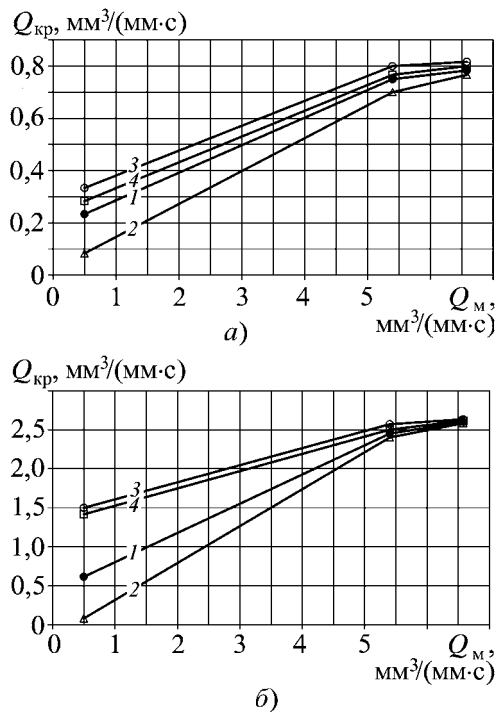


Рис. 11.3. Влияние минутного съема материала на скорость изнашивания круга при глубинном (а) и маятниковом (б) шлифовании:
 1 – 24А 16 М2 12 К5/П40-15; 2 – 24А 16 М2 12 К5 КФ5; 3 – 24А 16 М2 12 К5 МС5 КФ5; 4 – 24А 16 М2 8 К5

При глубинном же шлифовании весь припуск снимается за один-два прохода и вероятность повреждений обработанной поверхности от условий обработки существенно снижается.

Влияние минутного съема материала на скорость изнашивания круга и стабильность его работы. Анализ экспериментальных данных, полученных при сравнении маятниковой и глубинной схем шлифования, показывает, что с увеличением минутного съема материала скорость изнашивания круга растет как при маятниковой, так и при глубинной схеме. Однако, как видно из рис. 11.3, увеличение скорости изнашивания круга с увеличением минутного съема материала зна-

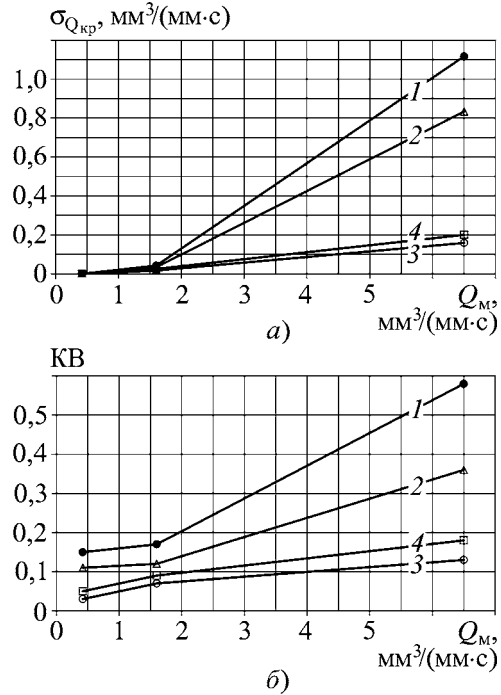


Рис. 11.4. Влияние минутного съема материала на СКО (а) и коэффициент вариации скорости изнашивания круга (б) при маятниковом шлифовании:
 1 – 24А 16 М2 12 К5/П40-15; 2 – 24А 16 М2 12 К5 КФ5; 3 – 24А 16 М2 12 К5 МС5 КФ5; 4 – 24А 16 М2 8 К5

чительно больше при маятниковой схеме шлифования: скорость изнашивания круга при маятниковой обработке в 2...4 раза выше, чем при глубинном шлифовании. Это связано с тем, что с высокой скоростью стола и малой глубиной резания, в условиях высокой теплонапряженности процесса и многократного цикла нагрева и охлаждения обрабатываемой поверхности, происходит быстрая потеря режущей способности абразивного круга. Что, в свою очередь, связано с повышенной адгезионной активностью в контакте абразив-металл, приводящий к налипанию стружки на площадки износа абразивных зерен и засаливанию рабочей поверхности инструмента. При многопроходном шли-

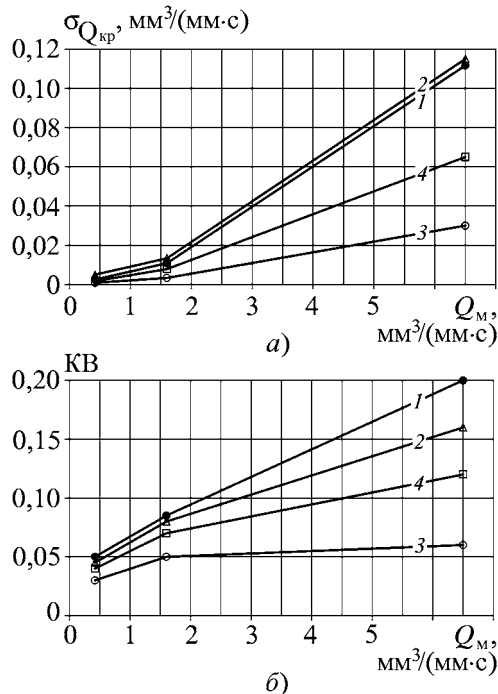


Рис. 11.5. Влияние минутного съема материала на СКО (а) и коэффициент вариации скорости изнашивания круга (б) при глубинном шлифовании:
1 – 24А 16 М2 12 К5/П40-15;
2 – 24А 16 М2 12 К5 КФ5; 3 – 24А 16 М2 12 К5 МС5 КФ5; 4 – 24А 16 М2 8 К5

фовании в этих условиях съем металла протекает нестабильно: с каждым проходом круга фактическая глубина резания уменьшается, упругий натяг в системе круг–деталь–станок нарастает. Когда податливость технологической системы резания будет исчерпана, происходит спонтанное увеличение фактической подачи на глубину и соответственно нагрузки на рабочую поверхность шлифовального круга. Как следствие, разрушаются адгезионные связи с вырывом отдельных зерен или их блоков из керамической связи.

Повышение скорости съема металла за счет увеличения подачи, глубины резания и, следовательно, толщины срезаемой стружки, создает предпосылки для более

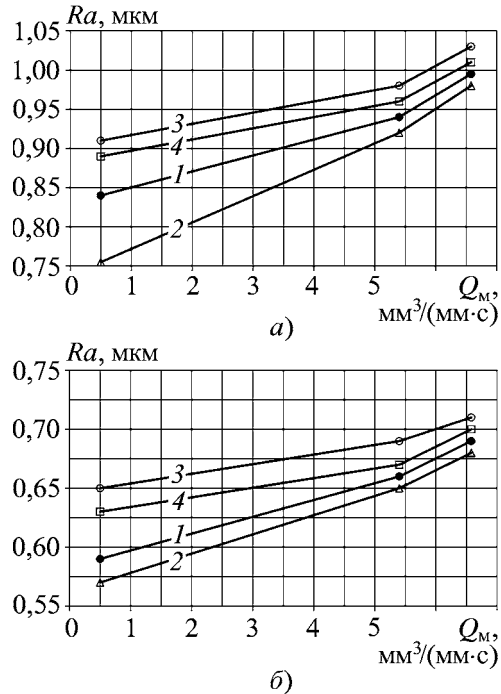


Рис. 11.6. Влияние минутного съема материала на шероховатость обработанной поверхности при глубинной (а) и маятниковой (б) схемах шлифования:
1 – 24А 16 М2 12 К5/П40-15;
2 – 24А 16 М2 12 К5 КФ5; 3 – 24А 16 М2 12 К5 МС5 КФ5; 4 – 24А 16 М2 8 К5

активного проявления описанного механизма обновления рабочей поверхности круга, его размерного износа и статистических характеристик изнашивания.

Изнашивание абразивного инструмента по механизму самозатачивания имеет слабопрогнозируемый характер, но при интенсификации режима шлифования износ круга всегда растет, так же, как и увеличиваются статистические характеристики его стабильности – СКО и коэффициент вариации (рис. 11.3, 11.4 и 11.5).

Интенсивное обновление режущих кромок на рабочей поверхности в результате повышенного износа круга приводит к увеличению высоты микронеровностей на обработанной поверхности во всех случаях (рис. 11.6). Но при глубинном

шлифовании в зоне контакта находится значительно больше абразивных зерен, участвующих в формировании микро-рельефа обрабатываемой поверхности заготовки, поэтому значение Ra до 30... 50 % меньше даже при одинаковой зерни-ности круга.

В результате сравнительного анализа двух схем шлифования магнитотвердого сплава ЮНДК35Т5 установлено, что при глубинной схеме шлифования динамиче-ские напряжения в 4...7 раз меньше, чем при маятниковой схеме, что свидетельст-вует о благоприятных условиях формиро-вания поверхностного слоя. Энергия, за-трачиваемая для снятия единицы объема материала при глубинном шлифовании, выше, чем при маятниковом, что связано с кинематическими особенностями взаимо-действия шлифовального круга с обраба-тываемой поверхностью заготовки.

Одним из преимуществ глубинного шлифования является пониженная ско-рость изнашивания круга по сравнению с маятниковым шлифованием. При этом стабильность его работы, оцениваемая через среднеквадратичное отклонение и коэффициент вариации величины износа шлифовального круга, существенно выше.

Исследования также показали, что при одинаковой производительности по-сле глубинного шлифования Ra в 1,5 раза ниже, чем после маятникового шлифо-вания.

Существенным недостатком маятни-ковой схемы шлифования магнитотвер-дых материалов является также высокая вероятность появления дефектов обработ-ки в виде сколов и трещин. Исследования и промышленные испытания показали, что брак деталей по этим видам дефектов при маятниковой схеме шлифования мо-жет достигать до 40 %.

Комплексный анализ результатов сравнительного испытания схем глубин-ного и маятникового шлифования магни-тотвердых материалов показал, что глу-бинная схема шлифования даже при оди-наковой производительности технологи-

чески более эффективна, чем маятнико-вая. Необходимо также отметить, что глу-бинное шлифование имеет значительные резервы повышения производительности по скорости съема материала, чем маят-никовая схема.

11.3. ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ СТРОЕНИЯ ШЛИФОВАЛЬНОГО КРУГА НА ЕГО РЕЖУЩУЮ СПОСОБНОСТЬ

В качестве параметров структурного строения высокопористых кругов на ос-нове электрокорунда белого марки 24А, включая диапазон их изменения, были выбраны следующие:

- зернистость абразива A_3 : 10; 12; 16 и 25;
- относительное содержание в объеме круга:
 - абразивного зерна V_3 : 34; 38; 42 % и соответственно структура 14; 12; 10;
 - керамической связки $V_{св}$: 3; 4; 5 и 6 %;
 - корундовых микросфер $V_{мс}$: 0; 10 и 20 %;
 - фруктовых косточек $V_{ф.к.}$: 0; 5 и 10 %.

Размер порообразователей составил: для корундовых микросфер 80...120 мкм, для фруктовых косточек 400 мкм.

Постоянными величинами при варь-ировании других параметров объемного строения круга были: зернистость 16, структура 12, содержание связки 4,5 %, корундовых микросфер 10 % и фруктовых косточек 5 %.

Режущую способность высокопорис-тых кругов различного объемного строе-ния исследовали при глубинном шлифо-вании сплава ЮНДК35Т5 на постоянном режиме: $v_{кр} = 10$ м/с, $v_{ст} = 50$ мм/мин, $t = 2$ мм с охлаждением.

Влияние на составляющие силы ре-зания. Сила резания является емкой ин-формативной характеристикой процесса шлифования. По ней можно судить о ди-намической напряженности в зоне обра-ботки, характере изнашивания инстру-мента, потребляемой мощности и других

свойствах технологической системы резания, которые в основном определяют производительность, точность и качество процесса. В свою очередь, дифференцированная оценка составляющих силы резания позволяет оценить эффективность процесса съема материала при шлифовании через соотношение работ трения (P_y) и диспергирования (P_z).

При постоянных параметрах режима шлифования, как принято в данном исследовании, по силе резания и ее составляющим можно сделать вывод о нагрузке на режущий рельеф рабочей поверхности круга и механизме изменения его геометрических параметров. Режущие свойства круга при шлифовании магнитного сплава ЮНДК35Т5 зависят от степени износа и затупления абразивных зерен. Из-за высоких контактных температур и давлений абразивные зерна на рабочей поверхности круга быстро округляются с образованием площадок износа. Их вершины интенсивно покрываются плотно спрессованными металлическими пленками, к которым привариваются отдельные стружки. За период стойкости поры инструмента лишь частично заполняются отходами шлифования.

Из-за отсутствия явного засаливания рабочей поверхности круга при шлифовании ЮНДК35Т5 можно сравнивать особенности строения режущего рельефа. Например, при обработке другого магнитотвердого сплава ЮН14ДК24 интенсивность засаливания рабочей поверхности на 20...25 % больше [14].

Бездефектная обработка магнитных материалов возможна при условии, когда выдерживается ограничение по предельному значению тангенциальной составляющей силы резания при шлифовании [14]. Исходя из прочности связи зерен шлифуемого материала, представленных в виде кругов с диаметром d_z , которая пропорциональна пределу прочности на растяжение σ_b , допустимая величина P_z должна соответствовать выражению [14]:

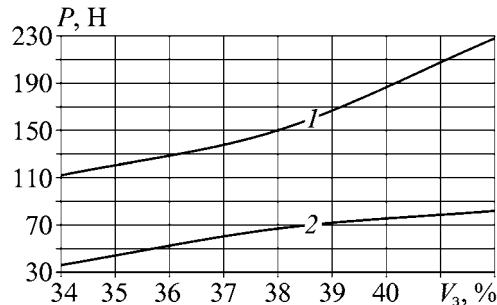


Рис. 11.7. Влияние относительного содержания зерна в объеме круга на составляющие силы резания P_y (1) и P_z (2) при глубинном шлифовании сплава ЮНДК35Т5

$$P_z \leq \frac{\pi}{4} \sigma_b K_p d_z^3 B L_k Z_s, \quad (11.3)$$

где K_p — условная удельная сила резания, B — ширина обработки; L_k — длина дуги контакта шлифовального круга с обрабатываемым материалом; Z_s — число зерен на рабочей поверхности инструмента.

При постоянном режиме шлифования достижение предельного значения P_z будет зависеть от характеристики режущего рельефа и связанной с ним удельной силы резания.

В главе 2 приведены модели распределения абразивных зерен на рабочей поверхности шлифовальных кругов Z_s . Там также дано выражение (2.50) для площади рабочего сечения режущего рельефа рабочей поверхности инструмента в зависимости от геометрии абразивных зерен, их размеров и объемного содержания в круге.

Анализируя выражение (11.3) с учетом разработанных теоретических представлений о режущем рельефе шлифовальных кругов, можно прийти к выводу, что применение высокопористых кругов позволяет заметно уменьшить тангенциальную составляющую силы резания. При сочетании высокой структурности круга с повышенной его зернистостью вероятность появления дефектов шлифовочного

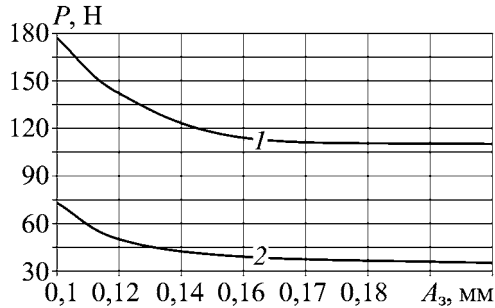


Рис. 11.8. Влияние зернистости абразивного материала на составляющие силы резания P_y (1) и P_z (2) при глубинном шлифовании сплава ЮНДК35Т5

характера при обработке магнитных материалов снижается.

Прямые эксперименты подтверждают выводы, полученные на основании теоретического прогноза. На рис. 11.7 показано изменение составляющих P_y и P_z силы резания в зависимости от относительного содержания абразивных зерен в круге, а на рис. 11.8 – от их размеров при глубинном шлифовании сплава ЮНДК35Т5. С повышением номера структуры от 10 до 14 составляющие силы резания уменьшаются более чем в 2 раза, а с увеличением зернистости от 10 до 25 это уменьшение составляет 1,65 для P_y и 2 раза – для P_z .

При повышенном содержании керамической связки в круге его твердость растет и, как следовало ожидать, возрастает сопротивление резанию (рис. 11.9).

С увеличением объемного содержания абразивного зерна (рис. 11.7) и керамической связки (рис. 11.9) темп нарастания составляющих P_y и P_z одинаков: нормальная составляющая увеличивается быстрее, чем тангенциальная составляющая силы резания. Это можно рассматривать как негативный момент процесса шлифования: увеличивается доля работы трения в энергетическом балансе съема материала.

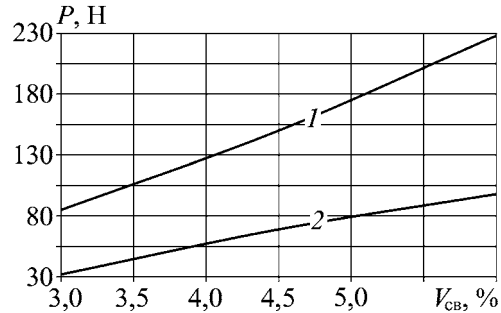


Рис. 11.9. Влияние относительного содержания связки в объеме круга на составляющие силы резания P_y (1) и P_z (2) при глубинном шлифовании сплава ЮНДК35Т5

Введение порообразователей в объемную структуру круга – корундовых микросфер и фруктовых косточек – меняет характер изменения составляющих P_y и P_z силы резания (рис. 11.10). Фруктовые косточки как выгорающий порообразователь, формируют открытую пористость абразивного инструмента, всегда понижают динамическую напряженность процесса шлифования. Чем больше объемное содержание фруктовых косточек в круге, тем меньше значения P_y и P_z .

Влияние другого порообразователя – корундовых микросфер – на составляющие силы резания имеет другой характер. Наличие в больших количествах прочных и тугоплавких микросфер препятствует внедрению шлифовального круга в обрабатываемую поверхность, и соответственно возрастает нормальная составляющая P_y . Другая составляющая силы резания P_z , напротив, уменьшается. В целом сила резания незначительно увеличивается в пределах 10...12 %, что свидетельствует о незначительном и неявном влиянии корундовых микросфер на динамику шлифования.

Статистическое моделирование результатов экспериментальных измерений (табл. 11.2) подтверждает этот тезис. Степень влияния содержания микросфер $V_{мс}$ на составляющие силы резания практически

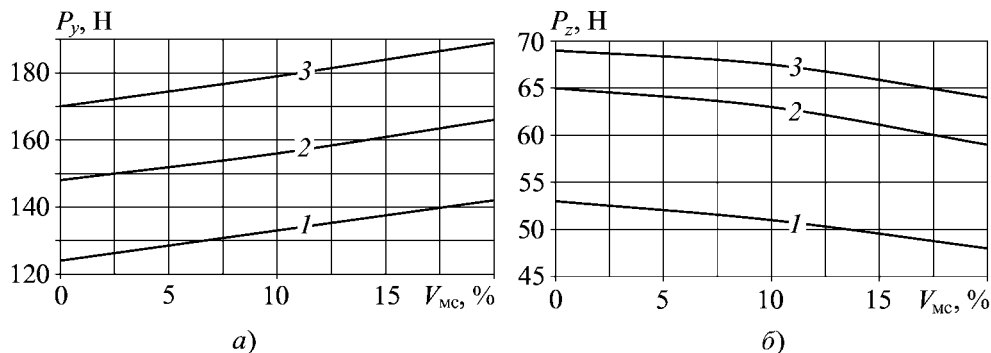


Рис. 11.10. Влияние относительного содержания корундовых микросфер на составляющие силы резания P_y (а) и P_z (б) при глубинном шлифовании сплава ЮНДК35Т5:

1 – при 10%-ном; 2 – при 5%-ном содержании фруктовых косточек; 3 – при их отсутствии

не ощутима, в отличие, например, от содержания связки $V_{св}$ и абразивных зерен V_3 в круге и их размеров A_3 .

Качество полученных моделей высокое: коэффициент множественной корреляции для модели P_y составляет 0,938, а для модели P_z – 0,943.

Изнашивание круга. Интенсивность изнашивания круга при постоянном режиме обработки становится важным фактором его эффективности, так как определяет удельную производительность или коэффициент шлифования.

При глубинном шлифовании магнитотвердого материала ЮНДК35Т5 на основании полученных экспериментальных данных были разработаны обобщенные статистические модели, определяющие степень влияния на скорость изнашивания круга $Q_{кр}$ и коэффициент шлифования q составляющих компонентов рецептуры круга. Параметры статистических моделей представлены в табл. 11.3, степень адекватности которых по коэффициенту множественной корреляции составляет 0,97...0,98.

11.2. Параметры статистических моделей составляющих силы резания от состава круга при глубинном шлифовании сплава ЮНДК35Т5

Члены моделей	Коэффициенты парной корреляции		Коэффициенты статистической модели	
	P_y	P_z	P_y	P_z
A_0	–	–	–4,727	–6,47
$\ln A_3$	–0,435	–0,59	–0,280	–0,515
$\ln V_3$	0,466	0,44	2,50	2,96
$\ln^2 V_3$	0,683	0,60	1,422	1,63
$\ln V_{св}$	0,015	–0,10	0,005	0,026
$\ln V_{к.ф}$	–0,209	–0,147	–0,056	0,047

11.3. Параметры статистических моделей скорости изнашивания круга и коэффициента глубинного шлифования сплава ЮДНК35Т

Члены моделей	Коэффициенты парной корреляции		Коэффициенты статистической модели	
	$Q_{кр}$	q	$Q_{кр}$	q
A_0	—	—	12,39	—8,42
$\ln A_3$	0,65	—0,65	0,76	—0,74
$\ln V_3$	—0,32	0,33	—2,49	2,63
$\ln V_{св}$	—0,66	0,66	—2,3	2,3
$\ln V_{мс}$	0,02	—0,04	—0,005	—0,003
$\ln V_{к.ф}$	0,17	—0,118	0,065	—0,04

Из анализа экспериментальных данных следует, что наиболее сильное влияние на скорость изнашивания круга оказывает процентное содержание связки, которая определяет твердость абразивного круга. С ростом содержания связки уменьшается износ абразивного круга и увеличивается коэффициент шлифования (рис. 11.11). Наиболее оптимальным для глубинного шлифования магнитотвердых материалов является 5%-ное содержание связки в объеме круга. Дальнейшее увеличение количества связки хотя и умень-

шает скорость изнашивания круга и повышает коэффициент шлифования, однако приводит к сколам и трещинам, что связано с увеличением твердости абразивного круга и составляющих силы резания.

Увеличение объемного содержания зерна в круге также, хотя и в меньшей степени, снижает скорость изнашивания круга и повышает коэффициент шлифования (рис. 11.12). Это связано с тем, что число зерен, участвующих в резании в единицу времени, увеличивается, а значит, сила, действующая на единичное

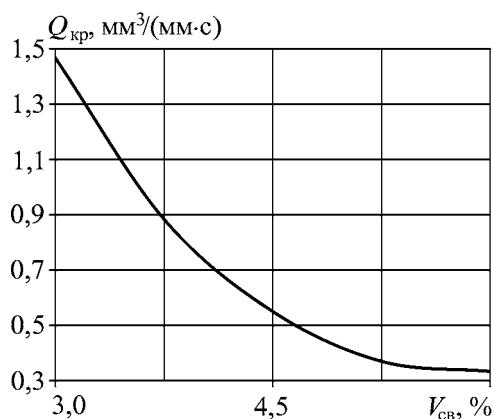


Рис. 11.11. Влияние относительного содержания связки на скорость изнашивания круга при глубинном шлифовании сплава ЮДНК35Т5

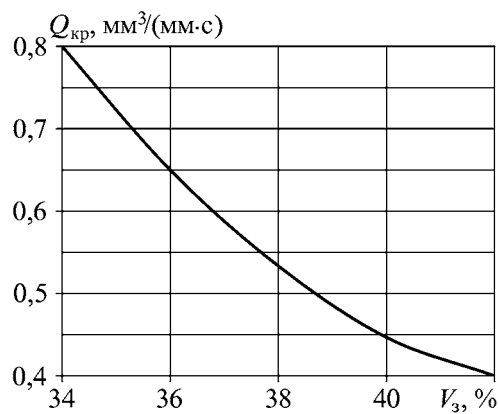


Рис. 11.12. Влияние относительного содержания зерна в круге на скорость его изнашивания при глубинном шлифовании сплава ЮДНК35Т5

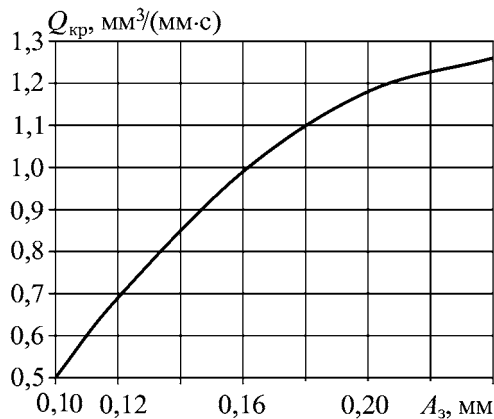


Рис. 11.13. Влияние зернистости круга на скорость его изнашивания при глубинном шлифовании сплава ЮНДК35Т5

зерно, снижается. Это способствует повышению динамической твердости абразивного круга. Наиболее оптимальным для глубинного шлифования магнитотвердых материалов является 38%-ное содержание зерна в объеме абразивного круга (12-я структура). Дальнейшее увеличение числа зерен из-за роста контактной температуры резания приводит к появлению прижогов, микротрещин и сколов на обработанной поверхности.

Увеличение зернистости инструмента увеличивает скорость изнашивания круга $Q_{кр}$ и снижает коэффициент шлифования, так как силы, действующие на единичное зерно, увеличиваются (рис. 11.13). Кроме того, выбор зернистости абразивного круга связан и с требованием к шероховатости обработанной поверхности. Для глубинного шлифования магнитотвердых материалов с учетом требований к размерной точности и шероховатости поверхности наиболее оптимальным является зернистость электрокорундового круга 12.

Влияние невыгорающего наполнителя – корундовых микросфер и выгорающего наполнителя – фруктовых косточек показан на рис. 11.14. Рост содержания

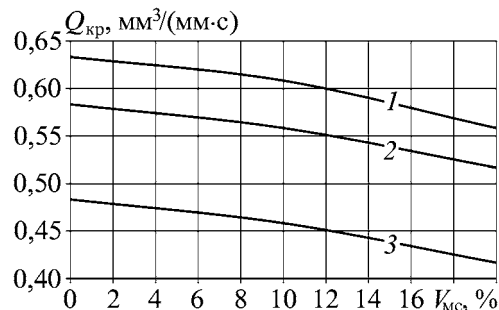


Рис. 11.14. Влияние относительного содержания корундовых микросфер на скорость изнашивания круга $Q_{кр}$ при обработке сплава ЮНДК35Т5:
1 – при 10%-ном содержании фруктовых косточек; 2 – при 5%-ном содержании фруктовых косточек; 3 – без фруктовых косточек

корундовых микросфер снижает скорость изнашивания круга $Q_{кр}$, хотя и несколько увеличивает радиальную составляющую силы резания P_y . Введение же фруктовых косточек, снижая составляющие силы резания P_y и P_z , приводит к увеличению скорости изнашивания круга $Q_{кр}$. Поэтому одновременным варьированием объемами содержаниями электрокорундовых микросфер и фруктовых косточек можно добиться постоянства твердости абразивного инструмента при увеличении его пористости, что крайне необходимо для глубинного шлифования. Наиболее оптимальными для глубинного шлифования магнитотвердых материалов является содержание в объеме круга 20 % наполнителя в виде корундовых микросфер и 10 % фруктовых косточек.

Влияние на шероховатость обработанной поверхности. Исследование влияния характеристики абразивного круга при глубинном шлифовании магнитотвердого материала ЮНДК35Т5 показало, что характер изменения шероховатости обработанной поверхности подчиняется общим закономерностям формирования микрорельефа поверхностного слоя, установленным при обычном шлифовании.

11.4. Параметры статистической модели Ra обработанной поверхности

Члены моделей	Коэффициенты парной корреляции	Коэффициенты статистической модели
A_0	—	–2,43
$\ln A_3$	0,839	0,50
$\ln V_3$	–0,166	–0,35
$\ln V_{св}$	0,279	0,46
$\ln V_{мс}$	–0,064	–0,025
$\ln V_{к.ф}$	–0,211	–0,064

В табл. 11.4 представлены параметры статистической модели связи состава высокопористого круга с шероховатостью обработанной поверхности при глубинном шлифовании магнитотвердого материала ЮНДК35Т5, включая результаты корреляционного анализа.

На рис. 11.15–11.18 представлены графики зависимостей шероховатости обработанной поверхности от характеристики абразивного круга. Как видно из графиков, увеличение объемного содержания

связки и зерна в объеме круга снижает шероховатость обработанной поверхности, а увеличение зернистости абразивного круга приводит к росту шероховатости.

Увеличение числа корундовых микросфер снижает шероховатость поверхности после шлифования, очевидно, за счет того, что наряду с повышением однородности строения круга, равномерности его изнашивания, они оказывают и режущее воздействие, увеличивая число режущих кромок в зоне обработки.

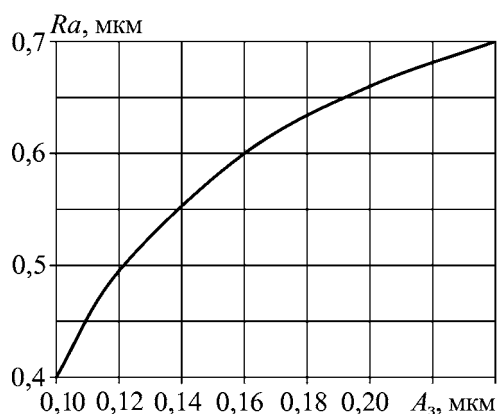


Рис. 11.15. Влияние зернистости высокопористого круга на шероховатость обработанной поверхности при глубинном шлифовании

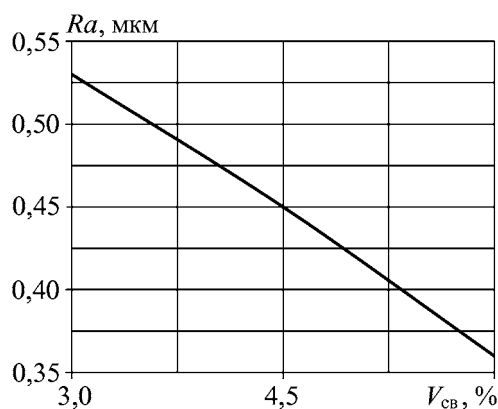


Рис. 11.16. Влияние относительного содержания связки в круге на шероховатость обработанной поверхности при глубинном шлифовании

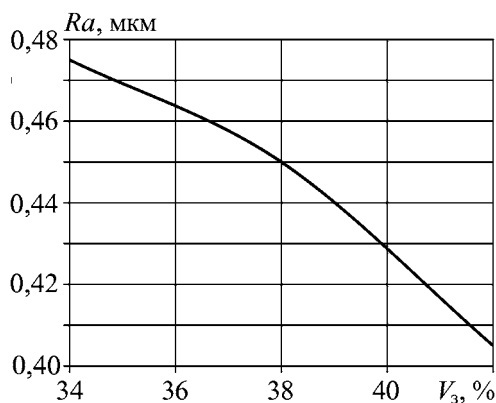


Рис. 11.17. Влияние относительного содержания зерна в объеме круга на шероховатость обработанной поверхности при глубинном шлифовании

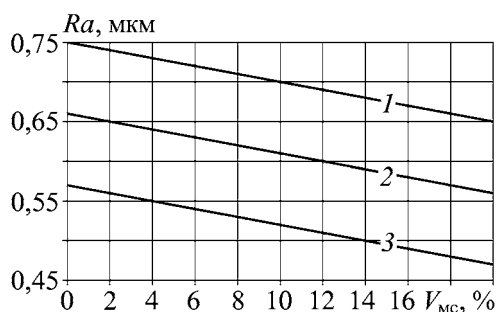


Рис. 11.18. Влияние относительного содержания корундовых микросфер на шероховатость обработанной поверхности при глубинном шлифовании: 1 – при 10%-ном; 2 – при 5%-ном содержании фруктовых косточек; 3 – без фруктовых косточек

Фруктовые косточки действуют на абразивный круг разупрочняюще, следствием чего является повышенный износ абразивного круга и рост шероховатости по мере увеличения содержания фруктовых косточек в объеме круга.

Таким образом, введением в шлифовальный круг различного вида наполнителей, для обеспечения его повышенной пористости, можно управлять режущей способностью инструмента. Использование в качестве наполнителей фруктовых косточек, например, снижает силу резания и, следовательно, динамическую напряженность зоны обработки, а введение в качестве порообразователя корундовых микросфер снижает интенсивность изнашивания круга и повышает коэффициент шлифования.

11.4. ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА ГЛУБИННОГО ШЛИФОВАНИЯ НА ЕГО ВЫХОДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Для установления характера и степени влияния параметров режима шлифова-

ния на выходные характеристики процесса глубинного шлифования был выбран высокопористый круг с характеристикой 24A 10П ВМ2 12 К5 (МС20 КФ10). Характеристика круга была обоснована полученными экспериментальными данными и разработанными на их основе математическими моделями.

Влияние на составляющие силы резания и энергоемкость процесса. Анализ результатов, полученных при глубинном шлифовании магнитотвердого материала ЮНДК35Т5, показал, что характер изменения силы резания и энергонапряженности процесса одинаков с характером изменения этих параметров при маятниковом шлифовании. На рис. 11.19 и 11.20 представлены графики зависимостей составляющих силы резания и энергоемкости от параметров режима шлифования.

В табл. 11.5 представлены параметры статистических моделей составляющих силы резания P_v и P_z и энергоемкости процесса в зависимости от параметров режимов глубинного шлифования сплава ЮНДК35Т5.

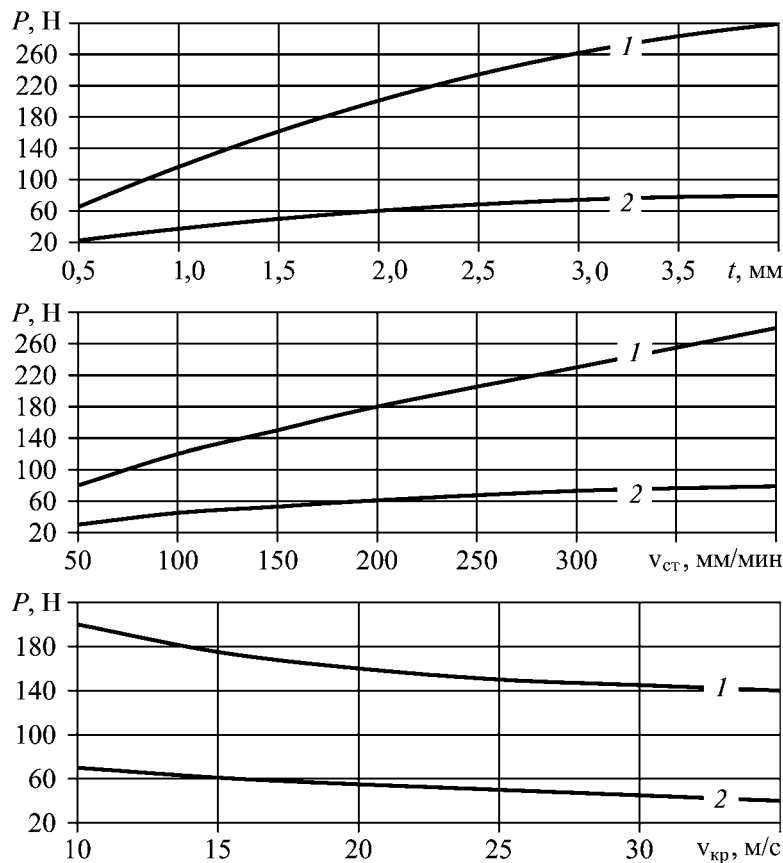


Рис. 11.19. Влияние параметров режима глубинного шлифования сплава ЮНДК35Т5 на составляющие силы резания P_v (1) и P_z (2)

Из данных табл. 11.5 следует, что наиболее сильное влияние на радиальную составляющую силы резания P_v оказывает глубина резания, а на тангенциальную составляющую силы резания P_z — скорость стола. С ростом глубины резания и скорости стола увеличивается толщина стружки, снимаемая единичным зерном, а значит и сила, действующая на единичное зерно. Вследствие этого увеличивается и суммарная тангенциальная сила P_z . Увеличение скорости стола с 50 мм/мин до 400 мм/мин и глубины резания с 0,5 мм до 4 мм (в 8 раз) приводит к увеличению составляющих силы резания более чем в 4 раза.

Из рис. 11.19 видно, что с ростом скорости стола $v_{ст}$ и глубины резания t , темп роста составляющих силы резания постепенно снижается. Это можно объяснить увеличением износа шлифовального круга.

С увеличением скорости круга $v_{кр}$ происходит снижение составляющих силы резания. Наиболее сильное влияние рост скорости круга оказывает на тангенциальную составляющую силы резания. Так увеличение скорости круга с 10 до 35 м/с (в 3,5 раза) снижает тангенциальную силу P_z в 1,68 раза, а радиальную силу P_v в 1,39 раза. Этот эффект обусловлен, как указывалось выше, прежде всего сни-

**11.5. Параметры статистических моделей составляющих
силы резания и энергоемкости процесса от параметров режима глубинного
шлифования сплава ЮНДК35Т5**

Члены моделей	Коэффициенты парной корреляции			Коэффициенты статистической модели		
	P_y	P_z	η	P_y	P_z	η
A_0	—	—	—	3,72	3,11	5,84
$\ln v_{кр}$	–0,138	–0,258	0,401	–0,42	–0,51	0,57
$\ln v_{ст}$	0,521	0,552	–0,597	0,55	0,50	–0,46
$\ln t$	0,683	0,598	–0,397	0,67	0,53	–0,34

жением толщины снимаемой стружки единичным зерном, а значит, и снижением суммарной силы резания. С ростом скорости круга происходит увеличение энергоемкости процесса шлифования, а увеличение скорости стола и глубины резания снижают энергоемкость процесса (см. рис. 11.20).

Изнашивание круга и коэффициент шлифования. В табл. 11.6 представлены параметры статистических моделей скорости изнашивания круга и коэффициента шлифования от параметров режимов шлифования.

Из табл. 11.6, а также из рис. 11.21 видно, что наиболее сильное влияние на скорость изнашивания круга $Q_{кр}$ оказывает скорость стола.

Увеличение глубины резания t приводит к небольшому росту $Q_{кр}$ при существенном пропорциональном увеличении

минутного съема материала. Если оценить коэффициент шлифования (рис. 11.22) для этих двух параметров шлифования, то видно, что с ростом глубины резания происходит существенный рост коэффициента шлифования, в то время как при увеличении скорости стола происходит преобладающий рост скорости изнашивания круга $Q_{кр}$, что приводит к постепенному снижению коэффициента шлифования. Здесь можно отметить, что дальнейшее увеличение глубины резания приводит к сильному росту радиальной составляющей силы P_z , в то время как влияние скорости стола $v_{ст}$ на радиальную составляющую силы резания начинает постепенно снижаться за счет увеличения износа круга. Дальнейшее увеличение глубины резания больше всего будет ограничиваться жесткостью станка.

**11.6. Параметры статистических моделей скорости изнашивания круга
и коэффициента шлифования**

Члены моделей	Коэффициенты парной корреляции		Коэффициенты статистической модели	
	$Q_{кр}$	q	$Q_{кр}$	q
A_0	—	—	–0,95	0,9
$\ln v_{кр}$	–0,055	0,350	–0,43	0,45
$\ln v_{ст}$	0,945	–0,433	1,33	–0,33
$\ln t$	0,098	0,856	0,32	0,68

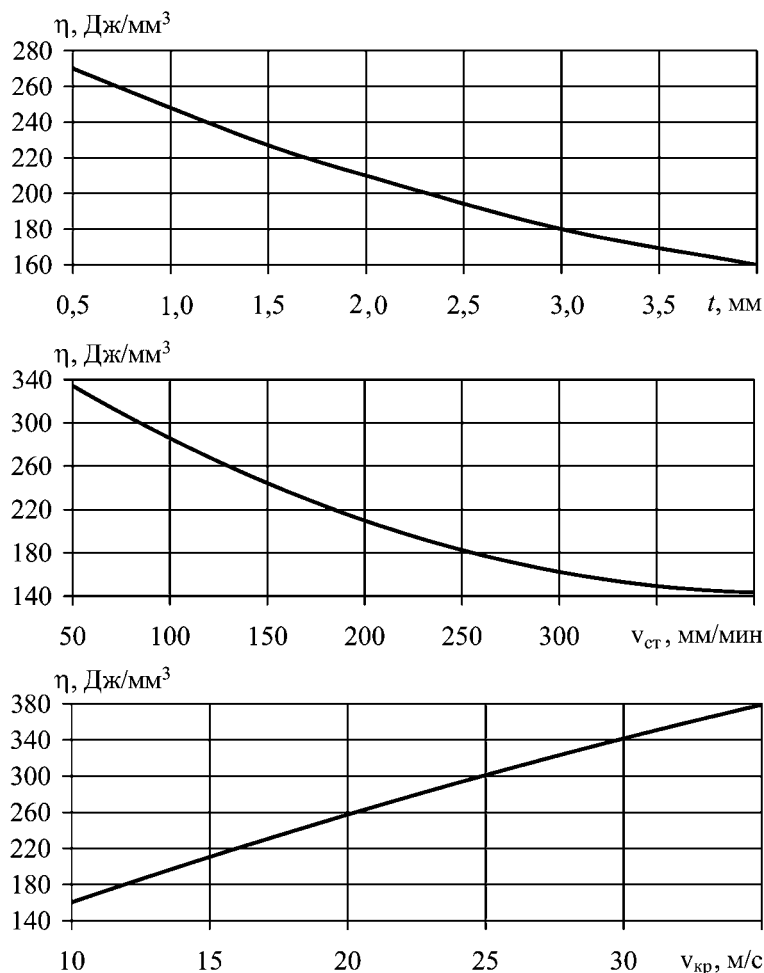


Рис. 11.20. Влияние параметров режима глубинного шлифования сплава ЮНДК35Т5 на энергоёмкость процесса

Увеличение скорости круга благоприятно влияет на интенсивность его изнашивания. При увеличении скорости круга происходит постепенное и равномерное снижение скорости изнашивания круга, составляющих силы резания, что ведет к снижению отжима шпинделя станка от детали с увеличением коэффициента шлифования.

Влияние на шероховатость обработанной поверхности. Благоприятное влияние на шероховатость оказывает окружная скорость шлифовального круга. С

увеличением окружной скорости круга шероховатость шлифованной поверхности существенно снижается. Это объясняется как уменьшением толщины слоя, снимаемого одним абразивным зерном, так и возрастанием количества зерен, контактирующих с обрабатываемой поверхностью в единицу времени.

В табл. 11.7 представлены параметры статистических моделей шероховатости обработанной поверхности в зависимости от параметров режима глубинного шлифования сплава ЮНДК35Т5.

**11.7. Параметры статистических моделей Ra обработанной поверхности
в зависимости от параметров режима глубинного шлифования
сплава ЮНДК35Т5**

Члены моделей	Коэффициенты парной корреляции	Коэффициенты статистической модели
A_0	—	0,391
$\ln v_{кр}$	–0,782	–0,471
$\ln v_{ст}$	0,314	0,148
$\ln t$	0,244	0,128

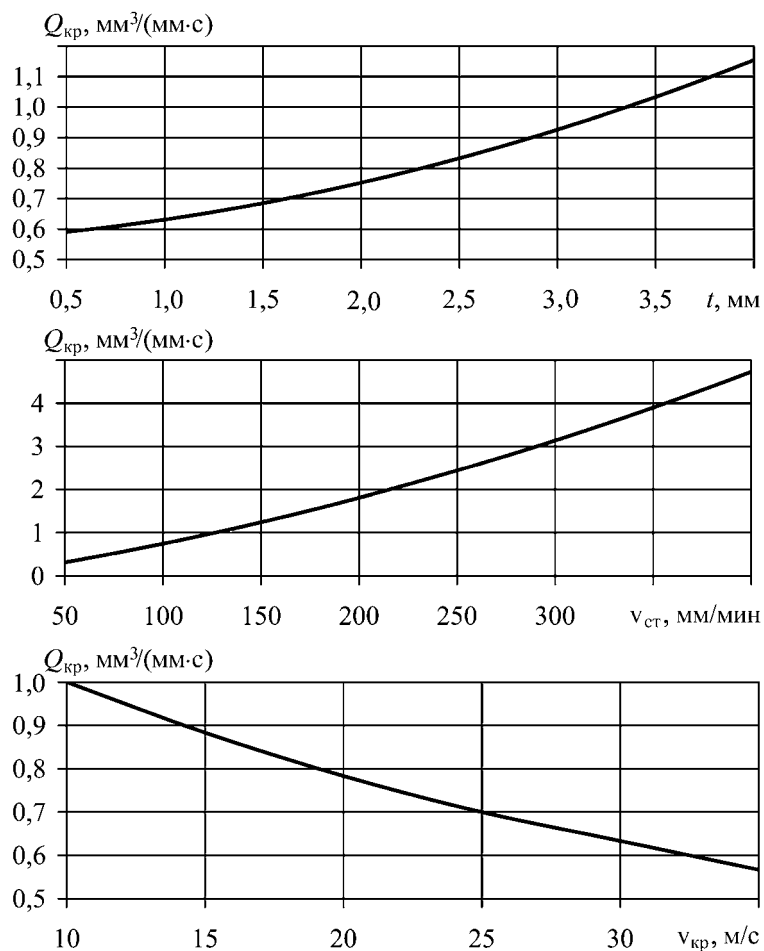


Рис. 11.21. Влияние параметров режима глубинного шлифования сплава ЮНДК35Т5 на скорость изнашивания высокопористого круга

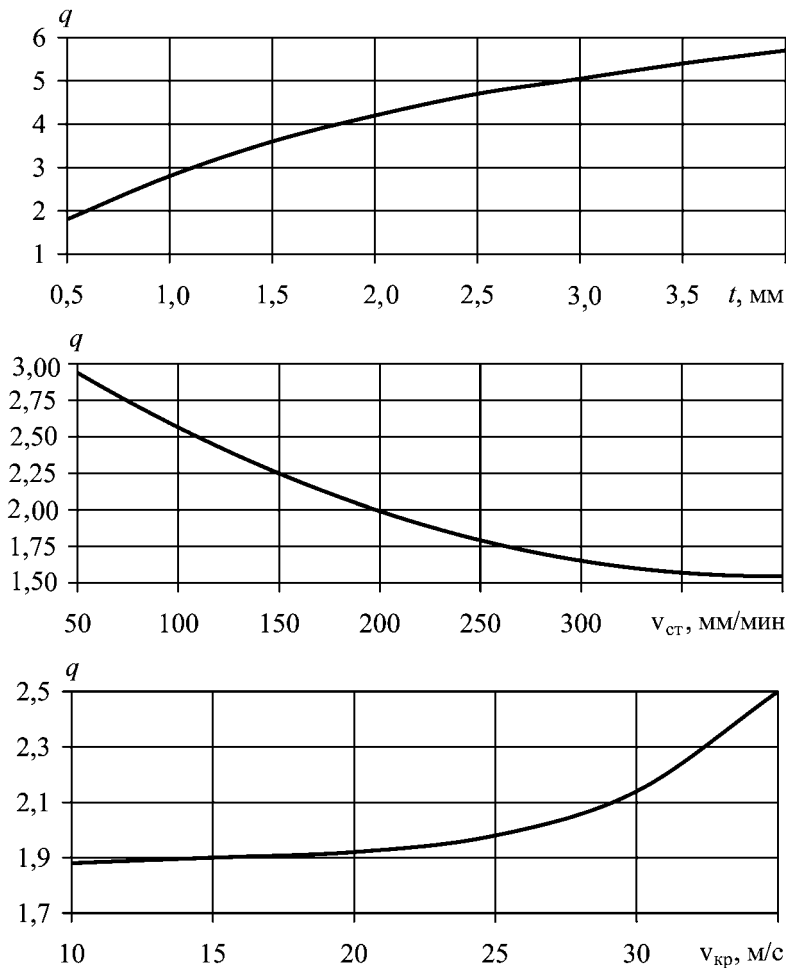


Рис. 11.22. Влияние параметров режима глубинного шлифования сплава ЮДНК35Т5 на коэффициент шлифования

На рис. 11.23 показаны графики зависимости шероховатости поверхности от параметров режима шлифования. Из графиков видно, что с ростом скорости круга происходит существенное снижение шероховатости поверхности. Увеличение скорости стола $v_{\text{ст}}$ и глубины резания t приводит к росту шероховатости поверхности.

Таким образом, экспериментальными исследованиями установлено, что с уве-

личением скорости круга уменьшаются составляющие силы резания, уменьшается скорость изнашивания круга, возрастает коэффициент шлифования и существенно улучшается шероховатость обработанной поверхности. При этом энергоемкость процесса глубинного шлифования магнитных материалов (на примере сплава ЮДНК35Т5) увеличивается.

Увеличение глубины резания приводит к превалирующему росту радиальной

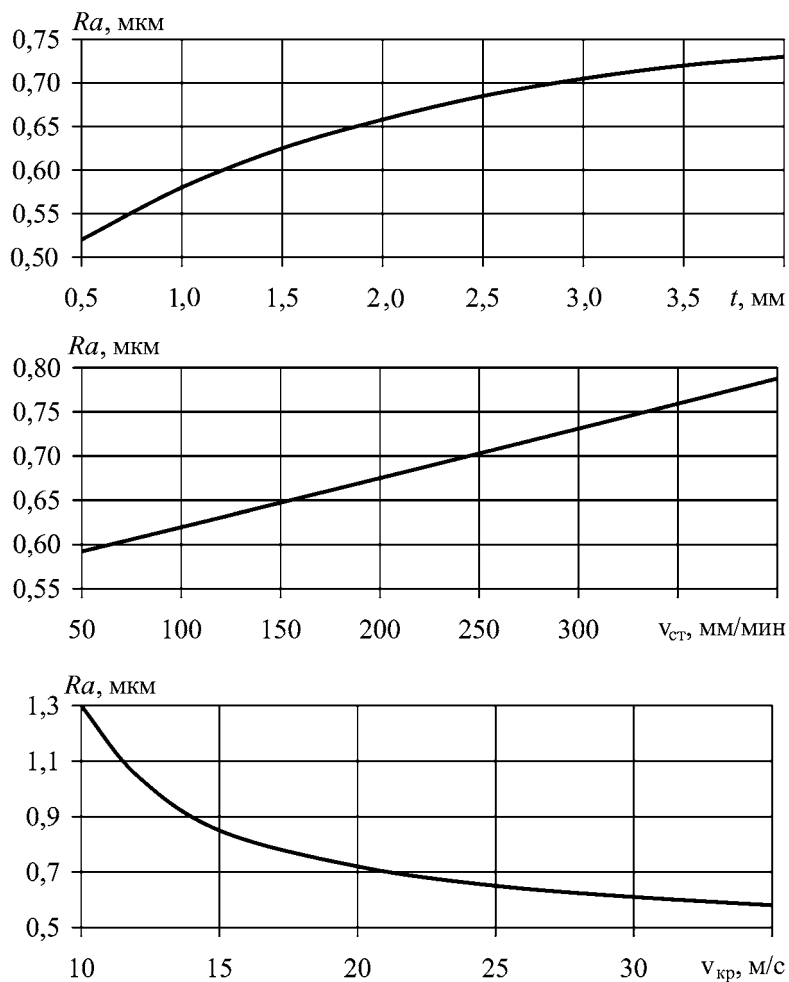


Рис. 11.23. Влияние параметров режима глубинного шлифования сплава ЮНДК35Т5 на шероховатость обработанной поверхности

составляющей силы резания, что приводит к росту деформаций и вибраций в технологической системе станок–инструмент–деталь, что, в свою очередь, способствует ухудшению качества обработанной поверхности. Соответственно возрастает скорость изнашивания круга. Более быстрый рост минутного съема материала способствует увеличению коэффициента шлифования.

С ростом скорости стола происходит рост составляющих силы резания, которая

способствует увеличению скорости изнашивания круга. Большой износ круга способствует тому, что хотя при увеличении скорости стола увеличивается минутный съем материала, коэффициент шлифования постепенно снижается. Увеличение скорости стола приводит к ухудшению качества обработанной поверхности.

При обработке магнитотвердого материала методом глубинного шлифования оптимальными режимами шлифования, исходя из качества обработанной поверх-

ности, размерной точности и экономичности процесса, являются: $v_{\text{ст}} = 200 \dots 250$ мм/мин; глубина резания $t = 2,5 \dots 3$ мм; скорость круга $v_{\text{кр}} = 35$ м/с.

11.5. РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ И ИХ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Результаты исследования, а также производственных испытаний глубинного шлифования магнитотвердых материалов высокопористыми кругами позволили установить рациональные характеристики абразивного инструмента, а также режимов шлифования для различных марок магнитотвердых материалов. Разработаны технологические рекомендации глубинного профильного шлифования деталей вентиляльных электродвигателей из редкоземельных магнитов (Nd–Fe–B) и плоского глубинного шлифования магнито-твердых материалов: ЮНДК, ЮНДКБА, ЮНДКЗ5Т5, ЮНДКТ5БА, ЮНДКТ8, КС-25, КС-37, Nd–Fe–B, 25Х15КА, 30Х23КА.

Результаты производственных испытаний. В результате проведенных производственных испытаний различных схем глубинного шлифования (профильного и плоского) удалось повысить не только производительность, но и улучшить качество обработки.

При обработке деталей вентиляльных электродвигателей (рис. 11.24) из спеченного магнитотвердого материала системы

Nd–Fe–B применялась операция плоского маятникового шлифования. Операция шлифования производилась на плоскошлифовальных станках мод. 3Г71 и 3Е711В. В качестве режущего инструмента использовали шлифовальные круги типоразмера 1 250×25×76 предложенной автором характеристики 24А 25П МЗ 12К5. Шлифование выполняли с охлаждением эмульсией из 5...10%-ного водного раствора эмульсола ЭГТ.

Детали вентиляльных электродвигателей шлифовали на следующих режимах: $v_{\text{кр}} = 30 \dots 33$ м/с; $v_{\text{ст}} = 20 \dots 24$ м/мин; $t = 0,03$ мм. Круг правили алмазным карандашом.

Недостатком данной схемы обработки является низкая производительность и наличие большого процента брака в виде сколов, трещин и прижогов на обработанной поверхности готовой детали. На рис. 11.25, а представлена используемая схема маятникового плоского шлифования. По этой схеме каждая поверхность заготовки обрабатывается отдельно по 10 деталей за одну установку. Обработка ведется за несколько проходов круга для снятия припуска, получение симметричной и высокоточной детали затруднено. Из-за сильного засаливания рабочей поверхности абразивных кругов в процессе шлифования, производится частая правка шлифовального круга. Шероховатость поверхности, получаемая по этой схеме обработки, достигает $Ra = 1,25$ мкм.

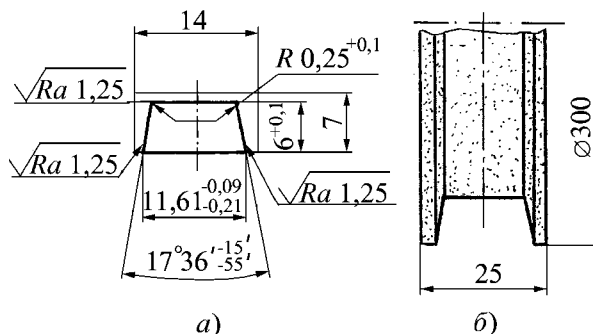


Рис. 11.24. Эскизы обрабатываемой детали (а) и шлифовального круга (б)

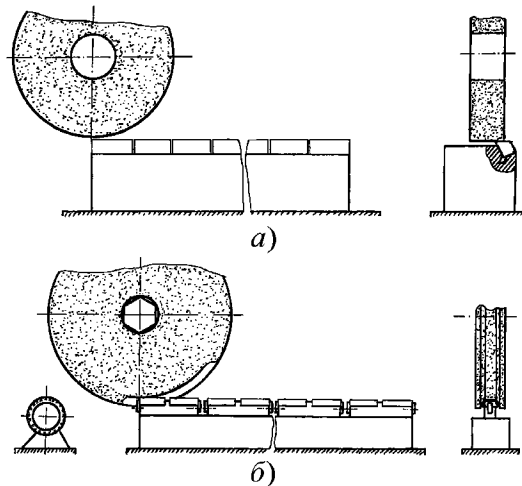


Рис. 11.25. Схема плоского маятникового (а) и профильного глубинного (б) шлифования деталей вентильных электродвигателей

Профильное же шлифование фасонными кругами рис. 1.25, б по схеме маятникового врезного шлифования является невозможным. При такой схеме шлифования происходит неравномерный износ шлифовального круга по высоте. При подаче на врезание 0,03 мм шлифовальный круг внедряется в обрабатываемую деталь постепенно. Поэтому абразивные зерна, находящиеся ближе к периферии рабочей поверхности шлифовального круга, начинают участвовать в резании раньше, в результате чего происходит не только искажение рабочей поверхности шлифовального круга из-за его неравномерного износа по высоте, но и вследствие более быстрого затупления абразивных зерен, находящихся ближе к периферии шлифовального круга, его режущая способность на этом участке резко снижается. В результате этого после внедрения шлифовального круга в деталь, примерно на глубину $t = 1 \dots 1,5$ мм, на обработанной поверхности появляются прижоги, а затем сколы и трещины.

Высокая трудоемкость обработки детали, показанной на рис. 11.24, обусловлена необходимостью последовательного

шлифования каждой стороны заготовки с ее переустановками на рабочем столе станка.

Для снижения трудоемкости и улучшения качества обработки была предложена и реализована схема профильного глубинного шлифования заготовки одновременно с трех сторон за один проход круга и на всю ее высоту (см. рис. 11.25, б).

Заготовки в количестве 10 штук устанавливались в специальное приспособление (кассету). Выбор числа заготовок ограничивался размером рабочей поверхности стола, а также стойкостью шлифовального круга. Правка инструмента осуществлялась фасонным правящим алмазным роликом. Толщина слоя, снимаемого за одну правку, достигала 0,05 мм. Скорость стола при профилировании заготовки достигала $v_{ст} = 200$ мм/мин, а скорость круга $v_{кр} = 27$ м/с. В качестве СОТС использовали "Аквол-10М". Расход СОТС для очистки пор периферии круга составлял 24,3 л/мин, в зоне шлифования — 88 л/мин с давлением 0,23 МПа.

В результате проведенных испытаний установлено, что при обработке образцов методом глубинного шлифования,

на обработанных деталях не наблюдалось дефектов в виде сколов, трещин и прижогов, которые присущи обработке методом маятникового шлифования абразивными кругами из электрокорунда. Шероховатость обработанной поверхности составляла $Ra = 0,63$ мкм. При этом точность профиля соответствовала техническим требованиям.

Также было освоено глубинное плоское шлифование призматических деталей из магнитотвердого материала ЮНДК35Т5 при следующих режимах: $v_{кр} = 27$ м/с, $v_{ст} = 250$ мм/мин, $t = 3$ мм, $S_{поп} = 10$ мм/ход. В качестве СОТС использовался "Аквол-10М". Расход и давление подаваемой смазочно-охлаждающей жидкости соответствовал тем же параметрам, что и при глубинном профильном шлифовании. Правка осуществлялось алмазным карандашом. В результате испытаний установлено, что шероховатость обработанной поверхности призматических магнитов из ЮНДК35Т5 соответствует $Ra = 0,8$ мкм. На обработанных поверхностях также отсутствовали сколы, трещины и прижоги. Качество обработанной поверхности и размерная точность готовых деталей соответствовали техническим требованиям.

Технико-экономические показатели внедрения глубинного шлифования. Время, затрачиваемое при обработке магнитотвердых материалов по маятниковой схеме шлифования, можно записать в виде:

$$\tau^м = \frac{l b z n}{v_{ст}^м S_{поп}^м t^м}, \quad (11.4)$$

где l и b – соответственно длина и ширина заготовки, мм; n – число деталей, устанавливаемых на магнитную плиту, шт; z – припуск на обработку, мм; $v_{ст}^м$ – скорость стола при маятниковом шлифовании, мм/мин; $S_{поп}^м$ – поперечная подача стола при маятниковом шлифовании, мм/дв.ход; $t^м$ – глубина резания при маятниковом шлифовании, мм.

При глубинном шлифовании машинное время определяется по формуле

$$\tau^г = \frac{l b z n}{v_{ст}^г S_{поп}^г t^г}, \quad (11.5)$$

где $v_{ст}^г$ – скорость стола при глубинном шлифовании; $S_{поп}^г$ – поперечная подача при глубинном шлифовании; $t^г$ – глубина резания при глубинном шлифовании.

Существующие в настоящее время режимы маятникового шлифования деталей вентильных электродвигателей из магнитотвердого материала Nd-Fe-B составляют: $v_{ст}^м = 24$ м/мин, $t^м = 0,03$ мм,

$$S_{поп}^м = 2,5 \text{ мм/дв.ход.}$$

Припуск на обработку по трем поверхностям составляет 5,6 мм ($2 \times 2,3$ мм – припуск на боковые поверхности; 1 мм – припуск по высоте). Число деталей, обрабатываемых за одну установку, по этой схеме составляет 10 шт. Размеры заготовки: длина заготовки – 50 мм, ширина – 14 мм, высота – 7 мм. Тогда общая ширина обработки по трем сторонам будет составлять 26 мм. Подставляя эти значения в формулу (11.4), получим машинное время при маятниковой схеме шлифования:

$$\tau^м = \frac{l b z n}{v_{ст}^м S_{поп}^м t^м} = 40,44 \text{ мин.}$$

Профильное глубинное шлифование деталей вентильных электродвигателей осуществляется за один проход. При этом шлифование производится на всю глубину с формированием сразу всего профиля детали. Тогда формула (11.5) будет иметь следующий вид:

$$\tau^г = \frac{l n}{v_{ст}^г}. \quad (11.6)$$

Глубинное профильное шлифование осуществлялось при скорости стола $v_{ст}^г = 200$ мм/мин. Число деталей, обрабатываемых за одну установку, составляло

10 шт. Подставляя эти значения в формулу (11.6), получим $\tau^r = 2,5$ мин.

Разделив значения, полученные по формуле (11.4), на значения, полученные по формуле (11.6), определим, что соотношение машинного времени при глубинной и маятниковой схемах шлифования равно 16,2. Таким образом, машинное время при маятниковом шлифовании в 16,2 раза больше, чем при глубинном шлифовании.

При шлифовании призматических магнитов из ЮНДК35Т5 были получены следующие результаты:

- Режимы маятникового шлифования: $v_{ст}^m = 15$ м/мин, $t^m = 0,03$ мм, $S_{поп}^m = 2,5$ мм/дв.ход.

- Режимы плоского глубинного шлифования: $v_{ст}^r = 250$ мм/мин; $t^r = 3$ мм; $S_{поп}^r = 10$ мм/ход.

Сравнив расчетные значения по формулам (11.4) и (11.5), получим соотношение машинного времени при глубинной и маятниковой схемах шлифования:

$$\frac{\tau^m}{\tau^r} = 6,66.$$

Технологические рекомендации по шлифованию магнитотвердых материалов высокопористыми кругами. Рекомендации составлены по результатам лабораторных и производственных испытаний и содержат основные технологические условия и режимы глубинного профильного шлифования деталей вентильных электродвигателей применительно к модернизированному и специализированному оборудованию. Область распространения рекомендаций – детали электромашин из редкоземельных магнитов.

Заготовками могут служить бруски из редкоземельных магнитов (не намагниченные), рассчитанные на одну или несколько деталей. Припуск на обработку может составлять до 2 мм на сторону.

Операция глубинного шлифования выполняется за один или два прохода.

При обработке за два прохода припуск удаляется в следующей последовательности: черновое шлифование, правка, чистовое шлифование. Припуск разбивается на две части.

Рекомендуется следующая характеристика высокопористого инструмента: абразивный материал – электрокорунд белый 24А или 25А; зернистость – 10П; твердость – ВМ2...М1; структура – 12; связка керамическая – К5; класс точности – АА; класс неуравновешенности масс – 1.

При профильном глубинном шлифовании целесообразно применять шлифовальные круги только твердости ВМ2. Применение более твердых шлифовальных кругов может явиться причиной появления прижогов и трещин на обработанных поверхностях деталей.

Профилирование высокопористого шлифовального круга осуществляется алмазным правящим роликом, имеющим профиль детали. Существенное влияние на стойкость круга оказывает соотношение скоростей вращения ролика и круга. Для кругов твердости ВМ2...М1 отношение должно быть $v_{кр}/v_p = 0,6...0,9$.

Шлифовальный круг характеристики 24А 10П ВМ2 12 К5 работает в режиме частичного самозатачивания, при этом изменение его профиля незначительное. Как показали экспериментальные исследования, величина слоя, равная 0,05 мм и удаляемая при правке, достаточна для восстановления профиля и режущей способности шлифовального круга.

Режимы профилирования и правки: направление вращения шлифовального круга и алмазного правящего ролика – попутное; скорость круга 20...30 м/с; скорость ролика 18 м/с; величина слоя абразива, удаляемого при правке 0,05 мм (на сторону).

Правку выполнять с охлаждением во избежание преждевременной потери алмазным роликом своего профиля.

Назначаемые режимы шлифования должны обеспечивать в процессе обработки требуемые точность и качество по-

верхностного слоя детали. Оптимальное соотношение скорости резания, подачи заготовки и глубины резания для каждого обрабатываемого материала находятся в строгом соотношении между собой и определяется экспериментально для каждого конкретного случая.

Проведенные экспериментальные исследования позволили установить следующие режимы профильного глубинного шлифования: $v_{кр} = 20...30$ м/с; $v_{ст} = 200$ мм/мин; $t = 0,5...2,0$ мм. Шлифование необходимо выполнять с охлаждением.

В качестве смазочно-охлаждающей жидкости может применяться 1,5...2,52%-ный раствор "Аквол-10М".

Применение СОТС на основе "Аквол-10М" по сравнению с жидкостями на других основах в одинаковых условиях обработки и техники подачи обеспечивает снижение параметров шероховатости на 30...50 %, сил резания на 10...20 %.

Для достижения требуемой точности и качества обработки важен не только выбор состава охлаждения, но и эффективное его использование, которое определяется способом его транспортирования в зону шлифования. Техника подачи СОТС должна обеспечивать высокие моющие свойства жидкости, полностью отводить шлам из зоны обработки, доставляться непосредственно в зону контакта круга с заготовкой. Подача должна осуществляться с давлением не менее 0,4 МПа и расходом 150 л/мин (10 л/мин на 1 мм ширины шлифования). Система подачи должна иметь тонкую очистку от

шлама и масел и иметь автоматическую выгрузку шлама.

При глубинном плоском шлифовании требования, предъявляемые к оборудованию, шлифовальному кругу, а также к системе подачи СОТС и способу его подвода в зону резания те же, что и при профильном глубинном шлифовании.

Ниже приведены режимы плоского глубинного шлифования, полученные экспериментальным путем при обработке деформируемых, литых, а также спеченных магнитотвердых материалов:

Для материалов магнитотвердых, спеченных состава Nd-Fe-B: $v_{кр} = 27...30$ м/с; $v_{ст} = 180...210$ мм/мин; $t = 1,8...2,2$ мм.

Для материалов магнитотвердых, спеченных марок КС-25, КС-37: $v_{кр} = 27...30$ м/с; $v_{ст} = 370...390$ мм/мин; $t = 3,8...4,2$ мм.

Для материалов магнитотвердых, литых марок ЮНДК, ЮНДКБА, ЮНДК35Т5, ЮНДКТ8: $v_{кр} = 27...30$ м/с; $v_{ст} = 270...290$ мм/мин; $t = 2,8...3,2$ мм.

Для материалов магнитотвердых деформируемых, марок 25Х15КА, 30Х23КА: $v_{кр} = 27...30$ м/с; $v_{ст} = 380...420$ мм/мин; $t = 3,8...4,2$ мм.

Проведенные исследования показали, что при шлифовании магнитных материалов использование высокопористых кругов из электрокорунда белого дает возможность повысить производительность их обработки до 16 раз и снизить себестоимость до 5 раз.

Наибольший эффект достигается при глубинной схеме обработки.

Глава 12

ВЫСОКОПОРИСТЫЕ ШЛИФОВАЛЬНЫЕ КРУГИ ИЗ СВЕРХТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ

Этот класс абразивных материалов, как известно, включает в себя природные и синтетические алмазы и кубический нитрид бора. К отличительным особенностям инструментов из сверхтвердых материалов относятся не только наивысшая твердость, возможность изготовления острых лезвийных и высокоэффективных абразивных инструментов. Этим материалам свойственны высокие износостойкость, теплопроводность, коррозионная устойчивость, низкий коэффициент трения, а следовательно, малый износ, надежность, долговечность, большой рабочий ресурс, повышенная стойкость инструмента. Инструменты из сверхтвердых материалов незаменимы при производстве изделий из стекла, полупроводников (германия и кремния), технической керамики с поверхностью, близкой к абсолютно гладкой, при получении прецизионных по размерам и геометрии изделий. В настоящее время шлифовальные круги из сверхтвердых материалов широко внедряются при обработке ответственных деталей из высоколегированных сталей, титановых и жаропрочных никелевых сплавов и др. Их использование позволило значительно повысить производительность труда в механообработке, получить высокое качество обрабатываемой поверхности, улучшить структуру поверхностного слоя материала деталей.

На рис. 12.1 приведены данные о твердости и трещиностойкости сверхтвердых материалов и керамики. Существует закономерная корреляция – наблюдается рост трещиностойкости при снижении твердости [26]. Твердость определяет износостойкость абразива, а прочность и трещиностойкость – вероятность его разрушения. Таким образом, выбор материала

для абразивного инструмента – всегда компромисс между его износостойкостью и трещиностойкостью. При этом также необходимо учитывать условия работы инструмента, вид обработки, характер химического взаимодействия инструментального и обрабатываемого материалов.

12.1. АЛМАЗНЫЕ ВЫСОКОПОРИСТЫЕ КРУГИ

Круги на металлических связках.

Первые опыты с алмазными высокопористыми кругами были проведены автором в 1985–1986 гг. совместно с Институтом сверхтвердых материалов (ныне ИСМ НАН Украины). По оригинальным рецептурным составам, разработанным автором, были изготовлены круги на металлических связках марок М1 и М016, в которые в качестве порообразователя вводились корундовые микросферы.

Режущие свойства алмазных зерен как абразивного материала наиболее полно используются в кругах на металлических связках, которые обеспечивают более прочное крепление зерен в сравнении с органическими и керамическими связками. Работоспособность металлических связок зависит от их физико-механических свойств (прежде всего, прочности, ударной вязкости и твердости) и химической активности по отношению к обрабатываемому материалу.

Известные технологии изготовления алмазных кругов на металлических связках прессованием обеспечивают получение прочных брикетов-заготовок с пористостью не выше 15...20 %. В процессе спекания брикета происходит уменьшение пористости за счет уплотнения и усадки, обусловленных явлениями диффузии,

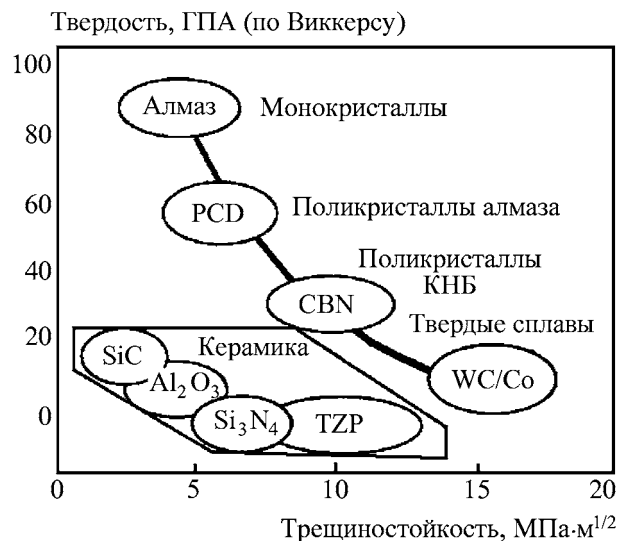


Рис. 12.1. Механические свойства наиболее твердых инструментальных материалов

рекристаллизации, ползучести, восстановления поверхностных окислов, ликвации при затвердевании и т.п.

На свойства связки и, как следствие, на ее работоспособность при шлифовании большое влияние оказывают состав металлической основы и наполнители. Связка M1 имеет медно-оловянную основу и может рассматриваться в сравнении со связкой M016 как относительно мягкая и пластичная. В состав металлической связки M016 входят медь, олово, сурьма и кобальт, она является более хрупкой и твердой, чем связка M1.

На металлических связках M1 и M016 были изготовлены чашечные конические круги профиля 12A2 с углом 45° и размерами $125 \times 5 \times 3 \times 32$ из синтетических алмазов AC15 315/250 с концентрацией 75 %. Искусственная объемная пористость круга в 10 % обеспечивалась введением корундовых микросфер со средним диаметром 60 мкм.

Прочность металлических связок на порядок превосходит аналогичные показатели керамических связок по пределам прочности при изгибе и сжатии. Давление брикетирования для большинства метал-

лических связок составляет 200...400 МПа, что также значительно превосходит усилия прессования шлифовальных кругов на керамических связках. Несмотря на неблагоприятное сочетание указанных факторов корундовые микросферы в изготовленном инструменте не разрушились, сохранили свою форму и функциональное назначение (рис. 12.2).

При сравнении со стандартным кругом на связке M016 аналогичной характеристики оказалось, что пористый круг при шлифовании титанового сплава BT3-1 имел на 10 % меньше удельный расход алмазов (1,44 и 1,58 мг/г соответственно) и обеспечивал менее напряженный процесс съема металла — по мощности до 50 %. Обработка стали 1X12HBMФ пористым кругом также проходит менее напряженно, чем стандартным кругом (снижение мощности резания — до 30 %), но с повышенным — до 60 % расходом алмазов. Шероховатость шлифованной поверхности во всех случаях обработки пористым кругом была выше (по параметру Ra на 20...26 %), чем стандартным кругом, но всегда в пределах одного класса.



Рис. 12.2. Рабочая поверхность алмазного круга на металлической связке с корундовыми микросферами

Пористые алмазные круги на металлической связке М1 при шлифовании титанового сплава ВТ3-1 и легированных сталей 1Х12НВМФ и Р6М5 оказались менее экономичными: расход алмазов увеличился в 3...4 раза в сравнении с кругами на связке М016.

В табл. 12.1 приведены результаты шлифования при скорости 26 м/с, продольной подаче 2 м/мин и с подачей на глубину 0,05 мм/дв.ход при обработке с охлаждением. При постоянном режиме шлифования фактическая скорость съема

металла Q_m , удельный расход алмазов q_a и мощность процесса N заметно различаются.

При испытаниях была зафиксирована важная особенность использования пористых кругов: процесс шлифования исследованных сталей и титанового сплава ВТ3-1 протекает в режиме самозатачивания с постоянным обновлением рабочей поверхности круга. Стандартные круги на металлической связке М1 при шлифовании указанных материалов работают только при постоянной электроправке инструмента.

12.1. Результаты шлифования алмазным пористым кругом на металлической связке М1

Обрабатываемый материал	Q_m , мм ³ /мин	q_a , мг/г	N , кВт
ВТ3-1	600	4,60	0,25
1Х12НВМФ	800	6,43	1,45
Р6М5	600	5,49	1,60

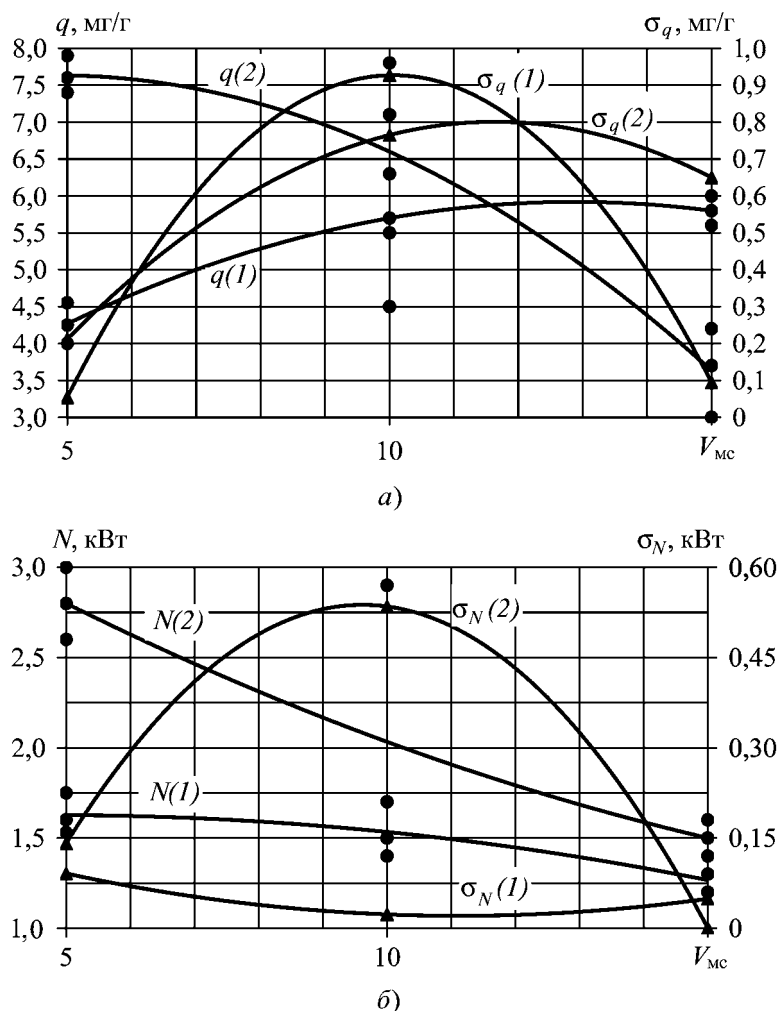


Рис. 12.3. Влияние объемного содержания корундовых микросфер на удельный расход алмазов (а) и мощность (б) шлифования твердого сплава ТТ10К8 при подаче на глубину 0,1 (1) и 0,25 (2) мм/дв.ход

Обработка алмазными кругами сталей и титановых сплавов не является показательной из-за химического родства алмаза с указанными материалами. Известен, правда, процесс алмазного шлифования кругами на металлических связках пера компрессорных лопаток из титановых сплавов, внедренный на одном из заводов. Но его эффективность достигается за счет умеренного самозатачивания инструмента сбалансированным назначе-

нием марки, зернистости алмазов и специальным составом связки [71].

В описанных выше исследованиях объемное содержание порообразователя в виде корундовых микросфер в алмазном слое кругов сохранялось постоянным. Более подробно было изучено влияние искусственной пористости при ее увеличении от 5 до 15 % на показатели алмазного шлифования твердого сплава ТТ10К8.

Были испытаны круги формы 12A2×45 размером 125×5×3×32 с алмазным порошком AC20 зернистостью 160/125 100%-ной концентрации на связке M1, у которых изменялось объемное содержание корундовых микросфер с размером 100/80 мкм. Для сравнительных испытаний был изготовлен также круг на связке M016 с 5%-ным содержанием микросфер.

Образец твердого сплава TT10K8 размером 6×15×30 мм обрабатывался при скорости круга 25 м/с, продольной подаче стола 0,5 м/мин и с подачей на глубину 0,1 и 0,25 мм/дв.ход, имитируя схему глубинного шлифования. Результаты испытаний с измерением удельного расхода алмазов, мощности шлифования и их среднеквадратичных отклонений σ_q , σ_N приведены на рис. 12.3.

Полученные результаты показывают, что искусственное увеличение пористости алмазоносного слоя на металлических связках до 15 % благоприятно сказывается на процессе шлифования твердого сплава: расход алмазов и мощность резания снижаются, процесс съема материала по этим показателям стабилизируется. В этом случае обработанная поверхность практически не имеет визуально наблюдаемых микротрещин, ее шероховатость по параметру Ra зависит только от подачи на глубину: при $S = 0,1$ мм/дв.ход $Ra = 0,4...0,64$ мкм, при $S = 0,25$ мм/дв.ход $Ra = 0,8...0,81$ мкм.

Наиболее высокие показатели алмазного шлифования твердого сплава TT10K8 достигаются при использовании мягких металлических связок (типа M1) с 15%-ным объемным содержанием корундовых микросфер и хрупких связок (типа M016) при 5%-ном содержании порообразователя. Указанными кругами при шлифовании карбидокремниевой керамики при подаче 0,1 мм/дв.ход получено: удельный расход алмазов в пределах 9...12 мг/г, мощность резания 1,2 кВт и параметр шероховатости шлифованной поверхности $Ra = 0,45...0,63$ мкм.

Введение в состав круга тугоплавких корундовых микросфер не может привести к изменению химического состава алмазоносного слоя и, в частности, металлической связки и соответственно повлиять на ее прочностные свойства. Причину улучшения свойств круга во взаимосвязи с количеством микросфер и прочностью связки необходимо увязать с механической прочностью алмазоносного слоя.

В результате ликвации остывающего металла вокруг микросфер с правильной геометрической формой формируется конгруэнтное поле сжимающих напряжений, величина которых уменьшается по мере удаления от их центра. Когда расстояние между соседними микросферами небольшое, то происходит суперпозиция полей напряжений и металл упрочняется по всему объему. При больших расстояниях между соседями упрочнение носит локальный, не взаимосвязанный характер.

Если ввести небольшое количество микросфер (например, 5 % объема алмазоносного слоя) в хрупкую связку, то, как показали испытания, малое количество микросфер достаточно, чтобы исчерпать лимит пластичности связки и привести ее прочность в состояние, оптимальное для шлифования.

В мягких пластичных связках запас пластичности больше, чем у хрупких металлических связок, и для оптимального упрочнения необходимо вводить больше микросфер (например, 15 % объема слоя).

Круги на органических связках. Алмазные круги на органических связках широкое распространение в промышленности получили на операциях обработки твердых сплавов, включая их заточку на режущем инструменте вместе со стальной державкой.

Основным показателем эффективности применения алмазного инструмента является удельный расход алмазов на единицу объема или массы удаленного материала. Поэтому совершенствование составов алмазных кругов, в первую оче-

редь, направлено на снижение этого показателя экономичности.

Применительно к кругам на органической связке предложен состав высокопористой массы, который позволяет заметно уменьшить расход алмазов при шлифовании твердых сплавов [145]. Рецептурный состав сводится к тому, что в массу, содержащую алмазные зерна и органическую связку, вводятся корундовые микросферы, выполняющие роль порообразователя и абразивного наполнителя одновременно. При этом должны выполняться оптимальные соотношения по размерам и составам компонентов: целесообразно, чтобы размеры вводимых корундовых микросфер составляли 0,66...1,0 размера алмазных зерен, а органической связки в круге должно быть в 2...6 раз больше, чем количество микросфер.

Правильная форма микросфер перераспределяет концентрацию напряжений в готовой массе и повышает ее прочность. Во время работы инструмента микросферы, выходящие на рабочую поверхность, вскрываются даже при незначительных нагрузках и не образуют дополнительных площадок трения. Поэтому теплонапряженность процесса шлифования снижается, а внедрение режущих зерен в обрабатываемый материал облегчается (нет дополнительной опоры поверхности инструмента на обрабатываемую деталь, как в случае обычного абразивного наполнителя). Кромки же вскрывшихся микросфер образуют дополнительные режущие элементы, которые зачищают обработанную поверхность, понижая ее шероховатость.

Так как введение корундовых микросфер снижает тепловыделение в зоне шлифования, то в составе связки может быть понижено процентное содержание металлов, которые вводятся для увеличения теплопроводности абразивной массы. За счет этого может быть повышено содержание в связке поверхностно-активных металлов, таких, как олово, висмут и другие, что увеличивает эффект облегчения диспергирования обрабатываемого

материала за счет его поверхностной активации. Создается возможность увеличить, если необходимо, в связке количество связующего (термореактивной или термопластичной смолы), что приводит к увеличению прочности удержания зерен в абразивной массе. Соблюдение определенного отношения между объемными долями связки и полых сферических частиц вызвано тем, что при соотношении меньше 2 количества связки недостаточно для образования прочных связей между абразивными зернами и частицами наполнителя. Это приводит к чрезмерно интенсивному износу круга в процессе работы. При соотношении больше 6 положительный эффект от введения микросфер сводится на нет из-за их недостаточного количества и чрезмерно большого объема связки. В этом случае возрастает площадь контакта связки с обрабатываемым материалом, что вызывает увеличение тепловыделения в зоне шлифования и одновременно затрудняет внедрение режущих зерен в обрабатываемый материал, а значит, снижается интенсивность съема и повышается теплонапряженность процесса.

Приведенное соотношение объемных долей связки и микросфер обеспечивает достижение поставленной цели. Размеры микросфер также должны быть в определенных пределах. При размере меньше 0,66 в каждом мостике связки между соседними абразивными зернами располагается слишком большое количество микросфер, что приводит к чрезмерному снижению прочности связи между абразивными зернами, а значит, и снижению прочности удержания в круге. Такой же эффект вызывает введение микросфер, размеры которых превышают размеры абразивных зерен. В этом случае микросферы могут занять весь объем между соседними абразивными зернами. Каждые два соседних абразивных зерна разделены одной микросферой, находящейся в непосредственном контакте с ними или через слишком тонкий слой связки. Прочность такой связки недостаточна для обеспечения не-

обходимой прочности удержания режущих зерен в круге.

На рис. 12.4 приведена зависимость удельного расхода алмазов при плоском шлифовании твердого сплава ВК8 кругом 1А1 200×3×10×75 АСР 100/80 100 % на постоянном режиме: скорость круга 30 м/с, продольная подача 12 м/мин, поперечная подача 1 мм/ход и глубина резания 0,025 мм. Испытывались круги с алмазоносным слоем объемного состава: медь – 30 %, олово – 20 %, фенолформальдегидная смола (пудрбакелит) – 50 %. Количество вводимых корундовых микросфер соотносилось с количеством связки в пропорции $v_{св}:v_{мс} = 1; 2; 4; 6$ и 7. Размер микросфер был равен 0,88 среднего размера алмазных зерен [145].

Штриховой линией показан удельный расход алмазов, достигнутый стандартным кругом.

Экспериментальные данные подтверждают, что при использовании корундовых микросфер в алмазных кругах на органических связках необходимо выдерживать оптимальные соотношения между размерами алмазных зерен и микросфер, а также между их количеством и объемным содержанием связки.

Введение корундовых микросфер в структуру алмазоносного слоя шлифовального круга обеспечивает также улучшение качества обработки.

Шлифование неметаллических материалов, в том числе алмазными кругами, часто приводит к формированию дефектного слоя со скрытыми микротрещинами под обработанной поверхностью детали, и, как следствие, к снижению ее прочностных свойств.

Теория обработки неметаллических материалов базируется на предложенном Гриффитсом механизме хрупкого разрушения [22, 77]. Количество, соотношение трещин по видам и интенсивность их развития зависит от скорости и значений составляющих силы шлифования. Чем больше нагрузка, тем более интенсивно

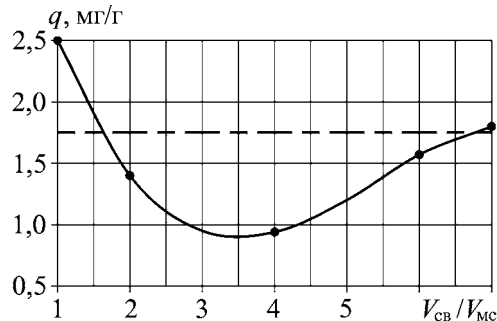


Рис. 12.4. Влияние соотношения объемного содержания связки и микросфер в круге на удельный расход алмазов

протекает трещинообразование и формируется поверхностный слой с развитой морфологической структурой трещин и с большей глубиной их проникновения.

Из-за особой физической природы удаления материала абразивными зёрнами у твердых неметаллических материалов избежать образование дефектного слоя с микротрещинами практически невозможно. Съем материала в данном случае обработки протекает как результат микрокалывания частиц поверхностного слоя, который подвергается многократному динамическому воздействию. В результате такого воздействия в обрабатываемом материале формируются и накапливаются в большом количестве дефекты строения – дислокации и двойниковые структуры, которые инициируют зарождение и распространение трещин. Продольные трещины развиваются в направлении шлифования, а поперечные – в направлении, перпендикулярном к движению круга. Часть трещин сливается в магистральную трещину, ответственную за скалывание обрабатываемого материала, а некоторая часть трещин сохраняется в нем после снятия нагрузки.

Применяются различные технологические решения для повышения качества обработки неметаллических материалов, включая использование алмазных кругов оптимальных характеристик, подбор рациональных режимов шлифования, введе-

ние дополнительных финишных операций и т.д.

Наши исследования при шлифовании нитридокремниевой керамики показали, что применение пористых алмазных кругов на органических связках также является эффективным средством снижения дефектности поверхностного слоя детали.

Было испытано два алмазных круга с характеристикой АСВ 250/200 МА-Б11-4, один из которых был стандартного состава, а в состав алмазного слоя другого были введены корундовые микросферы. На режиме плоского шлифования образцов из керамики на основе нитрида кремния $v_{кр} = 25$ м/с, $v_{ст} = 10$ м/мин, $S_{поп} = 1$ мм/дв.ход и $t = 0,03$ мм их прочность в сравнении с исходным образцом уменьшилась с 552 до 434 МПа или на 27 % после обработки стандартным кругом. Рассеяние значений прочности 15 обработанных образцов по среднеквадратичному отклонению увеличилось до 28,8 МПа (в исходном образце – 22,3 МПа).

Алмазный круг с корундовым порообразователем обеспечил более высокую прочность – 475 МПа (почти на 10 %) при меньшем рассеянии ее значений – 25,5 МПа.

На более форсированном режиме шлифования ($v_{кр} = 25$ м/с, $v_{ст} = 12$ м/мин, $S_{поп} = 1,5$ мм/дв.ход и $t = 0,05$ мм) с увеличением скорости съема материала от 300 до 900 мм³/мин наблюдается еще большее снижение прочности керамических образцов – до 354 МПа для стандартного круга и до 395 МПа для пористого алмазного круга при сохранении тенденции к более стабильным ее значениям по СКО – 36,8 и 31,1 МПа соответственно.

В одинаковых условиях шлифования пористый алмазный круг способствует достижению более высокой прочности керамических образцов – на 10...12 % больше, чем круг стандартной характеристики, с повышением стабильности ее значений на 13...18 %.

Объяснить полученный эффект повышения прочности можно следующим образом. Введение корундовых микросфер позволяет улучшить режущую способность шлифовального круга и соответственно уменьшить нагрузку, действующую на обрабатываемую поверхность. При этом тангенциальная составляющая силы резания растет, а нормальная составляющая – снижается. Создаются благоприятные предпосылки для развития продольных трещин и, в меньшей степени, – для трещин, которые распространяются в глубь поверхностного слоя. Глубина дефектного слоя после шлифования алмазным пористым кругом становится меньше в сравнении с обработкой алмазным кругом стандартной характеристики.

Круги на металлоорганической связке. При совмещенном шлифовании твердого сплава и стали высокую эффективность работы показывают алмазные круги на металлоорганических связках.

В работе [39] приведены результаты испытаний алмазных кругов из зерна АС4 125/100 100%-ной концентрации различных составов на основе связующего ЯФП-012А с наполнителем из олова (15 % объема), меди (25 %), магния (20...25 %), карбида бора (10 %) и микросфер (20 %).

Было установлено, что для металлоорганических связок соотношение объемов связки и микросфер должно находиться в пределах от 2,5 до 3,5, а размеров микросфер и алмазных зерен от 0,8 до 1,0, т.е. в более узком диапазоне, чем предложено в предыдущем разделе для органических связок.

Алмазными кругами различных составов обрабатывались без охлаждения одновременно твердый сплав ВК8 и сталь 45Х с соотношением их обрабатываемых поверхностей 1 : 1. При постоянных значениях скорости круга 30 м/с и продольной подачи 2 м/мин производительность шлифования от 300 до 1800 мм³/мин варьировалась путем изменения поперечной подачи.

Предварительные испытания показали, что алмазные круги на основе серийной связки В1-02 (медь, олово, карбид бора) интенсивно засаливаются при шлифовании только твердого сплава ВК8 уже при глубине 0,01 мм или скорости съема металла, равной 300 мм³/мин. Высокопористый алмазный круг (олово, магний, микросферы) обеспечил производительность бездефектного совмещенного шлифования в 1800 мм³/мин. Выше этого уровня резко возрастает расход алмазов. В сравнении с кругами других испытанных составов высокопористый круг обеспечил не только отсутствие сколов и трещин на обработанной поверхности, но и снижение ее шероховатости по параметру *Ra* в среднем на 0,2 мкм.

Испытания в производственных условиях показали, что повышение качества шлифования кругами оптимальной пористой структуры привело к увеличению стойкости обработанного металлорежущего инструмента в 1,25 раза. Их внедрение дало возможность повысить режимы резания и, как следствие, производительность заточки (переточки) инструмента в 2 раза; уменьшить расход алмазных кругов в среднем в 1,8 раза.

12.2. ВЫСОКОПОРИСТЫЕ ШЛИФОВАЛЬНЫЕ КРУГИ ИЗ КУБИЧЕСКОГО НИТРИДА БОРА

Сочетание уникальных физико-механических и химических свойств у кубического нитрида бора (КНБ) обеспечивает ему репутацию лучшего из известных абразивных материалов. Его твердость немного уступает твердости алмаза – самого твердого химического элемента. Высокая твердость, малые радиусы округления и углы при вершинах зерен КНБ обеспечивают при шлифовании легкое их внедрение в твердые и хрупкие обрабатываемые материалы с возможностью удаления очень тонких стружек.

Химическая инертность КНБ к большинству конструкционных материа-

лов способствует эффективной обработке деталей из сталей, чугунов, сплавов на основе никеля, титана и др. Близкая к оптимальной комбинация теплофизических свойств: более высокая теплопроводность и меньший коэффициент линейного расширения, чем у электрокорунда и карбида кремния, при высокой теплоустойчивости позволяет успешно применять КНБ при повышенных скоростях шлифования.

Круги из КНБ на керамических связках обеспечивают самые высокие показатели по производительности, качеству и точности обработки деталей из конструкционных сталей и сплавов, чем все известные модификации корунда и карбида кремния в основном на операциях получистового и чистового шлифования. Это объясняется тем, что зерна кубического нитрида бора, особенно больших размеров, имеют предел прочности на сжатие в 3...6 раз более низкий, чем у известных абразивных материалов. Промышленная практика их применения свидетельствует о том, что круги из КНБ особенно эффективны при шлифовании труднообрабатываемых материалов, поверхностей деталей с повышенной твердостью и профильной обработке с большими площадями контакта круга с обрабатываемой поверхностью. Использование кругов из КНБ как правило, исключает риск появления дефектов шлифовочного характера.

Два важных обстоятельства ограничивают в настоящее время расширение областей и объемов внедрения шлифовальных кругов из КНБ в машиностроении и других производственных отраслях. Первое – это высокая стоимость. На мировом рынке круги из КНБ с различными торговыми марками – эльбор, кубонит, боразон и другие стоят на два-три порядка выше, чем круги на основе корунда или карбида кремния. Второе обстоятельство заключается в том, что по причине высокой режущей способности круги из КНБ очень плохо правятся даже алмазным правящим инструментом (карандаши, ролики, бруски и т.д.). Если учесть высокую

стоимость КНБ, то профилирование эльборовых шлифовальных кругов становится экономически невыгодной и технологически трудновыполнимой операцией [104, 119].

В этой связи была поставлена задача найти технологические принципы создания эльборовых шлифовальных кругов на керамических связках, которые бы легко правились на заданный профиль доступными средствами при сохранении на высоком уровне их режущих свойств и снижении затрат на изготовление.

Решение этой противоречивой по своему замыслу задачи возможно двумя способами. Можно уменьшить твердость круга, что позволит улучшить условия его правки и сократить расход правящего инструмента. Но этот способ неприемлем, так как при улучшении условий правки круга одновременно снижается его износостойкость при шлифовании и точность обработки.

Была изучена возможность создания правящихся кругов из КНБ другим способом – за счет повышения номера структуры и пористости инструмента или, другими словами, путем создания высокопористых шлифовальных кругов.

Создание высокопористых кругов из КНБ. Абразивные инструменты из КНБ на керамических связках характеризуются маркой, зернистостью и относительной концентрацией эльбора, а также твердостью, структурой и маркой связки. В состав инструмента всегда входит наполнитель, в качестве которого обычно используются абразивные зерна из электрокорунда белого или карбида кремния различной зернистости.

Назначение относительной концентрации эльбора и номера структуры круга взаимосвязано. Например, для эталонного варианта эльборовых кругов на керамических связках принята концентрация в 100 % или содержание 25 % эльбора в объеме рабочего слоя инструмента и 8-я структура, которая обеспечивается добавлением 21 % (по объему) наполнителя в виде абразивных зерен.

При создании и изучении высокопористых кругов были изготовлены композиции с номерами структуры в диапазоне 8...19, что соответствовало суммарному объемному содержанию КНБ и абразивных зерен в качестве наполнителя от 46 до 25 %. Составы композиций и технологические принципы изготовления высокопористого инструмента из КНБ были аналогичны изложенным в работе [76], а рекомендации по выбору и применению наполнителя из абразивных зерен описаны в работе [63].

В дальнейшем изложении приведены результаты исследований свойств эльборовых кругов нормальной структуры и высокопористых кругов по рецептурным составам, разработанным автором, а также результаты шлифования с их применением.

Обычно в состав рабочего слоя, который представляет собой композицию КНБ–абразивный наполнитель–керамическая связка, вводят в технологических целях наполнитель – зерна карбида кремния или электрокорунда в количестве, близком к содержанию КНБ. Чтобы уменьшить долю участия абразивного наполнителя в шлифовании, рекомендуется существенно уменьшить его зернистость – на 6–4 номеров меньше зернистости КНБ [63].

Чтобы увеличить номер структуры и соответственно пористость рабочего слоя кругов из КНБ, в его состав вводились различные порообразователи как выгорающие (молотые фруктовые косточки), так и невыгорающие в виде полых сферических частиц различного химического состава и размеров.

Для испытаний были изготовлены круги типоразмера 1A1 50×8×16 с высотой рабочего слоя 5 мм из высокопрочного эльбора марки ЛКВ зернистостью 160/125 на керамической связке К27. Корпус круга состоял из абразивной смеси электрокорунда белого марки 24А зернистостью 6 и карбида кремния зеленого марки 63С зернистостью 8 на аналогич-

12.2. Состав, твердость и стоимость рабочего слоя высокопористых эльборовых кругов

Твердость/ структура	Объемная доля, %			Твердость, HRC			Стоимость 1 мм ³ , руб
	эльбора	связки	пор	Диапазон изменения	Сред- нее	СКО	
СМ2/8	25,0	6,5	47	38...47	44	4,24	70,13
СМ1/11	12,5	7,0	55	26...32	29	2,52	36,38
СМ1/12	18,75	7,0	56	29...34	32	3,51	55,77
М3/16	15,0	7,0	62	18...20	19	5,83	42,12
М3/19	25,0	7,0	68	20...21	20	11,09	70,10
СМ1/12	12,5	8,0	54	30...36	33	6,81	36,39
СМ1/13	18,75	8,0	58	18...25	24	2,08	55,76
СМ1/12	15,0	8,0	55	30...31	30	5,80	42,15

ной связке. Технология изготовления кругов была одинаковой для всех составов и соответствовала общепринятой для эльборовых кругов на керамических связках. Твердость рабочего слоя после спекания определялась на твердомере "Роквелл" методом вдавливания шарика по ГОСТ 19202–80.

Было исследовано большое количество составов высокопористых эльборовых композиций, в том числе и без применения абразивных зерен в качестве наполнителя. Расчетная пористость кругов была увеличена с 47 % для эльборового круга 8-й структуры до 54...68 % у нового инструмента. Стоимость кругов удалось уменьшить до 2 раз. В табл. 12.2 приведен состав, твердость, включая ее среднеквадратичное отклонение, и стоимость рабочего слоя высокопористых эльборовых кругов.

Анализ разработанных и изготовленных высокопористых композиций на основе эльбора показал, что выходные параметры инструмента – твердость и номер структуры – зависят не только от содержания эльбора и керамической связки. Существенную роль играют также химический состав, размеры и содержание порообразователей в сочетании с материа-

лом абразива, который используется в качестве наполнителя, его размерами и объемным содержанием в шлифовальном круге. Несмотря на то что объемное содержание керамической связки в высокопористых композициях кругов из КНБ было на 8...23 % больше, чем в эталонном составе ЛКВ 160/125 СМ2 8 К, их степень твердости во всех случаях была меньше и составила М3...СМ1.

Компоненты состава высокопористых композиций эльборовых кругов оказывают неодинаковое влияние на их твердость. Корреляционным анализом установлено, что, вопреки ожиданиям, формирование твердости эльборового круга в большей степени зависит от объемного содержания порообразователей $V_{\text{п}}$ ($R = 0,818$) и абразивного наполнителя $V_{\text{а.н}}$ ($R = 0,562$), чем от содержания связки $V_{\text{св}}$ ($R = -0,139$) и эльборовых зерен $V_{\text{эл}}$ ($R = 0,040$). Причем с увеличением содержания керамической связки и абразивного наполнителя твердость круга возрастает, а более высокое содержание эльборовых зерен и порообразователей шлифовальный круг разупрочняют:

$$H_R = 36,066 V_{\text{эл}}^{-0,256} V_{\text{а.н}}^{0,119} V_{\text{п}}^{-0,275} V_{\text{св}}^{0,564}. \quad (12.1)$$

Анализируя возможные варианты идентификации разработанных кругов с помощью какой-либо обобщенной характеристики, можно прийти к выводу, что такой характеристикой является отношение объемного содержания эльбора $V_{эл}$ к объемному содержанию абразивного наполнителя $V_{а.н}$ в рабочем слое круга. С одной стороны, содержание эльбора является определяющим фактором режущей способности шлифовального круга. Очевидно, что чем больше эльборовых зерен в рабочем слое инструмента, тем выше будет его режущая способность. С другой стороны, введение абразивного наполнителя в оптимальных количествах улучшает не только технологические свойства инструмента, но и повышает его режущие свойства. Последующий анализ полученных экспериментальных данных подтвердил целесообразность применения предложенной характеристики $V_{эл}/V_{а.н}$ для оценки эффективности процесса шлифования и его моделирования. Другой характеристикой кругов была принята твердость.

Твердость высокопористых эльборовых кругов H_R в единицах HRC в свою очередь также коррелируется с отношением $V_{эл}/V_{а.н}$ и связана с ним и относительным содержанием керамической связки в объеме круга $V_{св}$ следующей зависимостью:

$$H_R = 0,724 \frac{V_{эл}^{-0,078}}{V_{а.н}} V_{св}^{1,812}. \quad (12.2)$$

Модели твердости (12.1) и (12.2) разработаны для кругов из зерна ЛКВ 160/125 на керамической связке для диапазона твердости от М3 до СМ2 (для средних значений по HRC от 19 до 44).

Исследования режущих свойств.

Испытания высокопористых эльборовых кругов с целью изучения их режущих свойств проводились при внутреннем шлифовании на станке мод. TST 250-4R фирмы Tripet. Обрабатывались втулки из закаленной стали ХВГ (60 HRC) с наружным диаметром 120 мм, шириной 24,8 мм

с исходным диаметром отверстия 56,3 мм. Обработка по схеме маятникового шлифования с охлаждением масляной эмульсией проводилась на постоянном режиме: скорость круга 30 м/с, скорость вращения детали 25 м/мин, скорость продольного перемещения круга 400 мм/мин. Характеристики процесса фиксировались при двух значениях глубины резания на 1 ход круга – 0,002 и 0,005 мм.

С каждой втулки кругом одной характеристики при постоянной глубине шлифования автоматической настройкой удалялся припуск, равный 1 мм на диаметр. Фактически удаленный припуск в зависимости от режущих свойств круга изменялся от 0,824 до 1,004 мм. Минимальный съем металла соответствовал наибольшему размерному износу шлифовального круга.

Правка кругов перед обработкой втулки осуществлялась алмазным обкатным роликом со скоростью вращения 20 м/с и продольного перемещения 600 мм/мин за 2 прохода.

В процессе испытаний внутренний диаметр кольца измерялся с помощью нутромера с цифровой индикацией Imicsto Tesa type 61.30011, диаметр шлифовального круга фиксировался при помощи микрометра с ценой деления 1 мкм в двух взаимно перпендикулярных направлениях и определялся как среднее из двух значений. Величина износа круга по изменению его диаметра в одном опыте колебалась от 0,003 до 0,115 мм.

Эффективность процесса шлифования оценивалась по изменению скорости съема металла Q_m и изнашивания инструмента Q_n , а также шероховатости обработанной поверхности по параметру Ra . В качестве обобщенных характеристик процесса шлифования были приняты удельная производительность q , которая рассчитывалась как отношение скоростей съема металла к скорости изнашивания круга; и стоимость съема единицы объема металла – с учетом изнашивания рабочего слоя инструмента.

Исследования процесса шлифования разработанными эльборовыми кругами показали, что состав инструмента и его твердость оказывают большое влияние на все выходные характеристики процесса обработки. Причем на эффективность процесса влияет не только содержание эльборовых зерен в рабочем слое шлифовального круга, но и наличие абразивных зерен в качестве наполнителя.

Режущая способность эльборового круга определяется состоянием его рабочей поверхности, на которой одновременно находятся твердые и хрупкие зерна эльбора и более мелкие абразивные зерна. Размеры абразивных зерен значительно меньше размеров эльборовых зерен, поэтому на рабочей поверхности их может находиться от 3 до 10 раз больше в зависимости от объемного содержания. Из-за малых размеров абразивные зерна имеют более высокую прочность и более острые режущие кромки, чем зерна эльбора. В этой связи различие в морфологических и физико-механических свойствах двух абразивных составляющих рабочей поверхности эльборовых кругов предопределяет и различную степень их влияния на исследованные характеристики процесса шлифования.

Наличие эльборовых зерен, например, оказывает более сильное влияние (по коэффициенту парной корреляции), чем абразивный наполнитель на скорость съема материала Q_m и шероховатость обработанной поверхности детали. Абразивные зерна, в свою очередь, более активную роль играют при изнашивании инструмента и влияют на удельную производительность шлифования. Физический смысл предложенного критерия в виде отношения $V_{эл}/V_{а.н}$ заключается в том, что он учитывает различную степень влияния эльборовых и абразивных зерен на процесс шлифования.

Экспериментальные данные по исследованным характеристикам процесса внутреннего шлифования втулки из закаленной стали ХВГ высокопористыми эль-

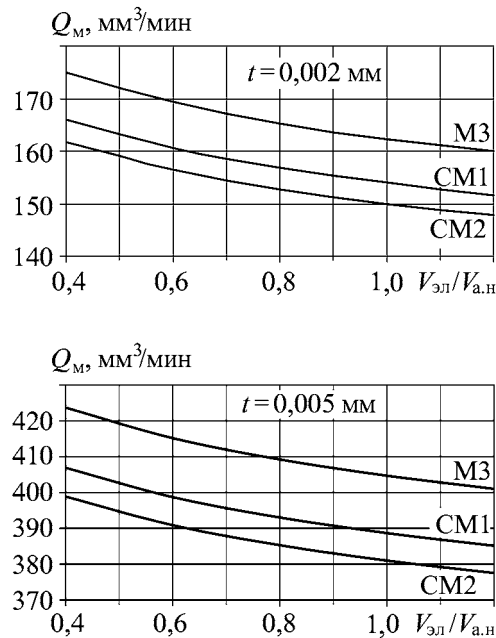


Рис. 12.5. Влияние отношения $V_{эл}/V_{а.н}$, твердости высокопористых эльборовых кругов и глубины обработки на скорость съема материала при внутреннем шлифовании стали ХВГ

боровыми кругами были статистически обработаны для двух глубин резания 0,002 и 0,005 мм и представлены в табл. 12.3 логарифмическими полиномами в виде математических моделей. В табл. 12.3 также даны значения коэффициентов парной корреляции и критерии адекватности рассчитанных значений опытным данным. В качестве критериев использованы коэффициент множественной корреляции R , остаточная дисперсия ОД, F-отношение и удельный вес неучтенных факторов $1 - R^2$.

Графическая интерпретация разработанных математических моделей показана на рис. 12.5–12.8. Анализируя представленные данные, можно констатировать, что на процесс шлифования высокопористыми эльборовыми кругами влияют и их твердость, и отношение $V_{эл}/V_{а.н}$, а также глубина обработки.

**12.3. Математические модели связи характеристик процесса внутреннего шлифования
высокопористыми эльборовыми кругами от их состава и твердости**

Математические модели связи	Коэффициенты парной корреляции		Оценка адекватности			
	$V_{\text{эл}}/V_{\text{а.н}}$	H_R	R	ОД	F-отн.	$1 - R^2$

Глубина шлифования 0,002 мм						
$\ln Q_M = 5,442 - 0,082 \ln \frac{V_{\text{эл}}}{V_{\text{а.н}}} - 0,114 \ln H_R$	-0,385	-0,382	0,552	0,834	1,098	0,695
$\ln Q_H = 3,969 + 0,206 \ln \frac{V_{\text{эл}}}{V_{\text{а.н}}} - 1,437 \ln H_R$	0,206	-0,880	0,897	0,234	10,315	0,195
$\ln q = 1,473 - 0,287 \ln \frac{V_{\text{эл}}}{V_{\text{а.н}}} + 1,323 \ln H_R$	-0,272	0,812	0,847	0,338	6,372	0,283
$\ln C = 1,118 + 0,882 \ln \frac{V_{\text{эл}}}{V_{\text{а.н}}} - 0,907 \ln H_R$	0,739	-0,554	0,908	0,210	11,755	0,175
$\ln Ra = 3,535 - 0,470 \ln \frac{V_{\text{эл}}}{V_{\text{а.н}}} - 1,278 \ln H_R$	-0,420	-0,858	0,969	0,074	38,042	0,061

Глубина шлифования 0,005 мм						
$\ln Q_M = 6,272 - 0,050 \ln \frac{V_{\text{эл}}}{V_{\text{а.н}}} - 0,087 \ln H_R$	-0,217	-0,275	0,356	1,047	0,364	0,873
$\ln Q_H = 5,719 + 0,743 \ln \frac{V_{\text{эл}}}{V_{\text{а.н}}} - 1,805 \ln H_R$	0,432	-0,721	0,828	0,377	5,456	0,314
$\ln q = 2,073 \ln H_R - 0,892 \ln \frac{V_{\text{эл}}}{V_{\text{а.н}}} - 0,719$	-0,423	0,678	0,787	0,457	4,059	0,381
$\ln C = 3,367 + 1,499 \ln \frac{V_{\text{эл}}}{V_{\text{а.н}}} - 1,672 \ln H_R$	0,665	-0,538	0,842	0,350	6,068	0,291
$\ln Ra = 3,837 - 0,402 \ln \frac{V_{\text{эл}}}{V_{\text{а.н}}} - 1,290 \ln H_R$	-0,333	-0,816	0,892	0,245	9,737	0,204

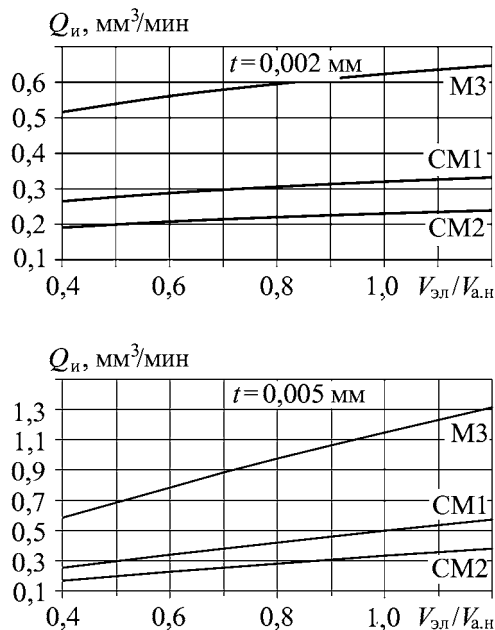


Рис. 12.6. Влияние отношения $V_{эл}/V_{ан}$, твердости высокопористых эльборовых кругов и глубины обработки на скорость изнашивания инструмента

Интенсивность съема металла эльборовыми высокопористыми кругами больше для мягкого инструмента, чем для более твердого. Объясняется это тем, что у мягких кругов демпфирование связки позволяет более полно использовать режущие свойства абразива на рабочей поверхности инструмента. У более твердых кругов, естественно, более высокая износостойкость, что, в конечном итоге, способствует повышению удельной производительности процесса шлифования и минимизации затрат на удаление 1 мм^3 металла с поверхности детали. Несмотря на то, что твердость исследованных высокопористых кругов была на 1...2 степень мягче, чем у эталонного круга твердостью CM2, наиболее удачные составы обеспечили снижение затрат до 2,3 раз при глубине обработки 0,002 мм и до 3,4 раз при 0,005 мм.

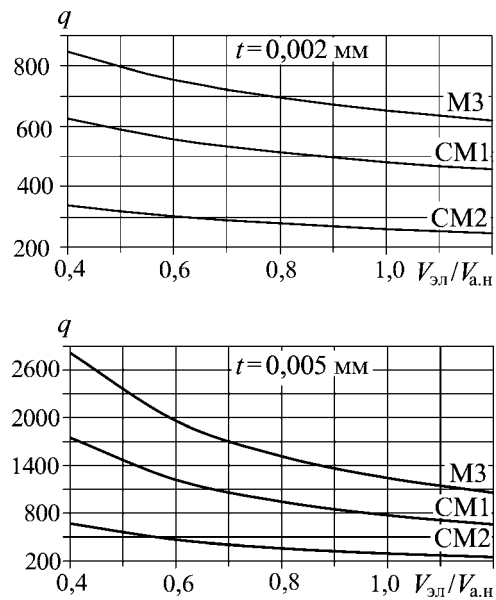


Рис. 12.7. Влияние отношения $V_{эл}/V_{ан}$, твердости высокопористых эльборовых кругов и глубины обработки на удельную производительность процесса

Показатели шлифования по скорости съема материала, удельной производительности процесса и стоимости обработки при глубине 0,005 мм/ход выше, чем при глубине 0,002 мм/ход. Это свидетельствует о том, что высокие номера структуры позволяют расширить область эффективного применения эльборовых шлифовальных кругов за счет больших глубин обработки.

Использование обычных эльборовых кругов, как уже подчеркивалось выше, целесообразно на чистовых операциях шлифования. Поэтому наряду с необходимостью обеспечить высокую точность обработки за счет повышенной износостойкости, они должны также гарантировать и минимальную шероховатость обработанной поверхности.

Формирование шероховатости обработанной поверхности при внутреннем

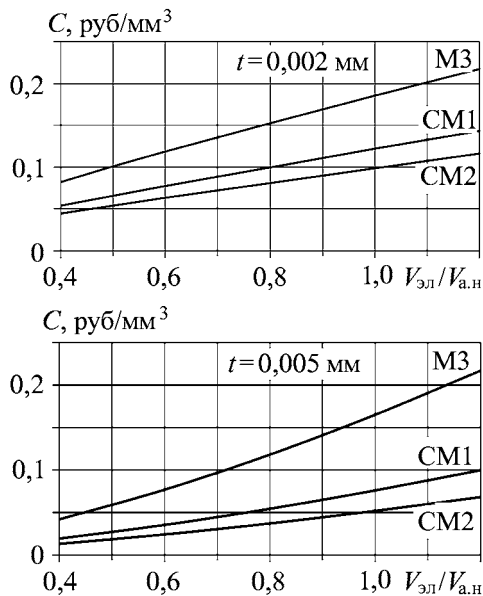


Рис. 12.8. Влияние отношения $V_{\text{эл}}/V_{\text{а.н}}$, твердости высокопористых эльборовых кругов и глубины обработки на стоимость удаления 1 мм^3 металла

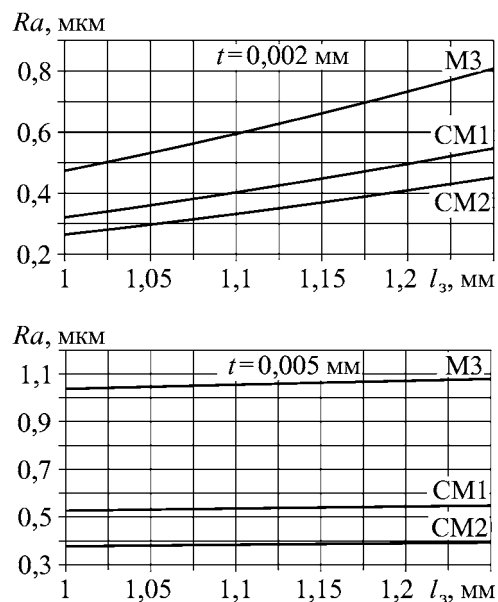


Рис. 12.9. Влияние величины l_3 , твердости высокопористых эльборовых кругов и глубины обработки на шероховатость обработанной поверхности

шлифовании высокопористыми эльборовыми кругами, как показали проведенные исследования, также зависит от отношения $V_{\text{эл}}/V_{\text{а.н}}$ и твердости (см. табл. 12.3). Чем больше отношение $V_{\text{эл}}/V_{\text{а.н}}$ и твердость круга, тем меньше высота микронеровностей на обработанной поверхности детали.

В процессе проведения испытаний обратил на себя внимание факт, что все новые круги на одинаковых режимах обработки показали худшие показатели по шероховатости обработанной поверхности, чем эталонный круг с характеристикой ЛКВ 160/125 CM2 8 K. Причиной такого результата стала не только более низкая твердость исследованных кругов, хотя ее влияние, как и в случае скорости изнашивания инструмента, является определяющей в сравнении с другими факторами процесса. Другим, не менее важным фактором, оказалось содержание эльбора

в шлифовальном круге. Из проведенного корреляционного анализа причин ухудшения шероховатости обработанной поверхности следует, что коэффициент парной корреляции параметра Ra в зависимости от глубины шлифования составляет с твердостью круга – 0,816...0,858, с объемным содержанием эльборовых зерен в нем – 0,664...0,780, а с содержанием абразивного наполнителя – только 0,207...0,228 или в 3 раза меньше.

Результаты корреляционного анализа подтвердили экспериментально наблюдаемый механизм формирования шероховатости обработанной поверхности детали при шлифовании эльборовыми кругами. Микронеровности на поверхности образуются за счет выступающих над связкой круга эльборовых зерен, высота выступания которых существенно больше, чем у зерен абразивного наполнителя. Поэтому именно эльборовые зерна, как наиболее

твердые и наиболее выступающие, формируют микрорельеф обработанной поверхности.

В соответствии с кинематикой взаимодействия режущего рельефа рабочей поверхности шлифовального круга с обрабатываемой поверхностью детали высота образующихся на ней микронеровностей будет определяться средним расстоянием l_3 между эльборовыми зернами. При повышении номера структуры круга от 8 до 19 это расстояние возрастает на 25 % и становится вместе с твердостью причиной увеличения параметра Ra . При глубине шлифования 0,002 мм/ход степень влияния l_3 на шероховатость обработанной поверхности практически одинакова с твердостью круга (0,595 и –0,675 соответственно). С увеличением глубины обработки до 0,005 мм/ход в формировании микрорельефа начинают принимать участие и абразивные зерна наполнителя, что приводит к уменьшению коэффициента парной корреляции между Ra и l_3 до 0,058 при сильном влиянии твердости круга ($R = -0,781$).

Для принятых условий внутреннего шлифования закаленной стали ХВГ эльборовыми кругами математические модели связи шероховатости обработанной поверхности Ra с расстоянием между эльборовыми зернами на рабочей поверхности круга l_3 и его твердостью H_R имеют следующий вид (рис. 12.9):

– для глубины шлифования 0,002 мм/ход

$$Ra = 6,387 l_3^{2,401} H_R^{-0,842}; \quad (12.3)$$

– для глубины шлифования 0,005 мм/ход

$$Ra = 94,245 l_3^{0,179} H_R^{-1,459}. \quad (12.4)$$

Содержание эльборовых зерен в круге и его твердость взаимосвязанно влияют на высоту микронеровностей на обработанной поверхности детали. Корреляционный анализ показал, что коэффициент корреляции парного члена $l_3 H_R$ с величиной Ra имеет значение 0,446 при глубине

шлифования 0,002 мм/ход и 0,753 при глубине 0,005 мм/ход.

Поэтому для повышения адекватности расчетной модели экспериментальным данным разработаны уточненные математические зависимости:

– для глубины шлифования 0,002 мм/ход

$$Ra = 5,494 l_3^{4,448} H_R^{-0,798} (l_3 H_R)^{-0,605}; \quad (12.5)$$

– для глубины шлифования 0,005 мм/ход

$$Ra = 1024,03 l_3^{-32,217} H_R^{-2,154} (l_3 H_R)^{9,576}. \quad (12.6)$$

При чистовой обработке необходимо обеспечить заданные требования по точности формы и размеров детали, а также шероховатости ее обрабатываемых поверхностей. Из представленных моделей Ra (12.3) и (12.4) следует, что в случае применения эльборовых кругов с высокими номерами структур и соответственно с большими значениями l_3 , высота микронеровностей на поверхности детали после обработки возрастает. Увеличение Ra можно компенсировать повышением твердости инструмента или снижением его зернистости, как это практикуется при шлифовании высокопористыми абразивными кругами. Увеличение твердости, кроме того, повышает износостойкость инструмента и, следовательно, точность обработки. Повышение твердости должно обязательно сопровождаться пропорциональным увеличением номера структуры и пористости круга, тогда, как показывает промышленный опыт, гарантируется бездефектное шлифование с высокими показателями его эффективности.

Анализ полученных результатов шлифования в зависимости от номера структуры эльборовых кругов, т.е. от суммарного объемного содержания эльборовых и абразивных зерен, показал, что критерий $V_{эл} + V_{аб}$ также имеет высокий уровень корреляции со всеми исследованными характеристиками процесса, как и твердость

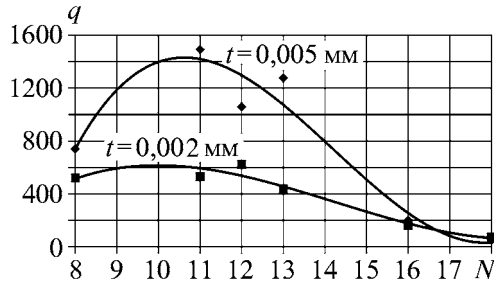


Рис. 12.10. Зависимость удельной производительности шлифования от номера структуры эльборовых кругов

инструмента. Например, коэффициент парной корреляции $V_{эл} + V_{ан}$ и H_R с удельной производительностью шлифования q равен соответственно 0,879 и 0,880 при глубине обработки 0,002 мм/ход и 0,934 и 0,940 – при 0,005 мм/ход.

Экспериментальная зависимость q от номера структуры эльборовых кругов (рис. 12.10) имеет экстремальный характер для двух глубин шлифования. Небольшое смещение экстремума функции $q(N)$ при глубине 0,005 мм/ход относительно 0,002 мм/ход в сторону увеличения номера структуры объясняется особенностями применения высокопористых шлифовальных кругов: высокие номера структуры более эффективны при увеличении глубины шлифования. В наших исследованиях применение высокопористых кругов из эльбора при глубине 0,005 мм/ход позволило увеличить, например, удельную производительность шлифования в 2 раза, а при глубине 0,002 мм/ход – на 20 % в сравнении с эталонным эльборовым кругом 8-й структуры. А если привести затраты C на удаление 1 мм³ металла к единице удельной производительности q , то по критерию $\frac{C}{q}$ эффективность

внутреннего шлифования закаленной стали ХВГ высокопористыми эльборовыми кругами оказывается в 3,4...6,8 раз выше, чем у применяемых в настоящее время.

Приведенные данные получены при шлифовании высокопористыми кругами, у которых твердость была на 1...2 степени ниже, чем у эталонного эльборового круга. Если бы анализ проводился по шлифовальным кругам одной твердости, то в соответствии с разработанными моделями (см. табл. 12.3) показатели эффективности шлифования высокопористым эльборовым инструментом были бы еще выше.

Во всех случаях обработки эталонным и высокопористыми эльборовыми кругами дефектов шлифовочного характера на обработанных поверхностях деталей не наблюдалось.

По результатам исследований были скорректированы рецептуры и изготовлены высокопористые круги 12-й структуры из эльборового зерна марки ЛКВ зернистостью 100/80, 125/100 и 200/160 твердостью от СМ1 до СТ2 на керамической связке К27. Круги 17 наименований различных типоразмеров и характеристик диаметром от 16 до 100 мм в настоящее время используются для профильного шлифования протяжек из быстрорежущей стали Р12Ф2К5М3-МП (66...68 HRC), внутреннего шлифования калибров из стали 20Х после цементации и закалки (58...64 HRC), а также других операций шлифования инструментального и основного производств. После обработки высокопористыми кругами на режимах шлифования, принятых для эльборовых кругов нормальной структуры, производительность процесса, точность и шероховатость обработанной поверхности деталей соответствовали техническим требованиям.

Опыт правки высокопористых эльборовых кругов алмазным правящим инструментом свидетельствует, что время профилирования нового инструмента, например, с размерами 100×20×51 на сложный профиль сокращается в 2 раза в сравнении с эльборовыми шлифовальными кругами нормальной структуры.

12.3. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ ИЗ КУБИЧЕСКОГО НИТРИДА БОРА С НОРМАЛЬНОЙ И ВЫСОКОПОРИСТОЙ СТРУКТУРАМИ

Применение кругов из КНБ для профильного шлифования фасонных поверхностей деталей осложняется их низкой правящей способностью алмазным инструментом. Как показали предварительные производственные испытания, повысить эффективность профилирования и улучшить технико-экономические показатели процесса шлифования в значительной мере удалось за счет использования высокопористых кругов из кубического нитрида бора.

На исследовательской базе института Fraunhofer – IWU (Германия) были проведены сравнительные испытания новых высокопористых кругов из кубического нитрида бора и кругов с нормальной структурой. В ходе испытаний в одинаковых условиях проводили сравнительный анализ свойств двух типов инструмента из КНБ при их правке алмазным инструментом и при шлифовании закаленной стали. Сравнение проводили по следующим показателям: усилию, действующему на алмазный инструмент при правке кругов из КНБ; составляющим силы резания и эффективной мощности при шлифовании; уровню звуковых колебаний (акустической эмиссии) и шероховатости обработанной поверхности заготовки, в зависимости от характеристики круга, параметров режима правки и шлифования.

Условия проведения испытаний. Испытания проводились на координатно-шлифовальном станке мод. 4S (SKOE 400) фирмы Mikromat с ЧПУ "Sinumerik 840", оснащенном высокоскоростным шпинделем с мощностью привода $N = 0,8$ кВт.

В качестве обрабатываемой заготовки был выбран образец из закаленной быстрорежущей стали марки P6M5K5-МП (63...66 HRC) с габаритными размерами

70×40×20 мм. Образец в приспособлении был установлен таким образом, что ширина шлифования за один проход круга составляла 20 мм на длине 70 мм.

По результатам предварительных испытаний были определены наиболее рациональные для детального сравнения характеристики высокопористого круга и круга с нормальной структурой. С учетом технических возможностей координатно-шлифовального станка были изготовлены круги типоразмера 1A1 90×25×5×13 из кубического нитрида бора марки ЛКВ40, зернистостью 125/100, твердостью C1, с номерами структуры 7 (нормальная структура) и 12 (высокопористая структура).

Отличительной особенностью этих шлифовальных кругов являлось то, что объемное содержание зерен КНБ + абразивный наполнитель в рабочем слое круга стандартной характеристики со структурой 7 составляло 48 %, при этом зерно кубического нитрида бора занимало 25 % объема (100 % концентрация). В высокопористых кругах со структурой 12 абразивная смесь КНБ + абразивный наполнитель занимала 38 % объема рабочего слоя, из них объемное содержание зерна кубического нитрида бора составляло всего 15 %, что соответствовало его 60%-ной концентрации в круге.

Правка кругов из кубического нитрида бора производилась с помощью специального алмазного инструмента, разработанного и изготовленного на фирме Dr. Kaiser Diamantwerkzeuge. Указанный инструмент представлял собой алмазную чашку с габаритными размерами 15×13×13×5 мм с рабочим алмазонасным слоем на спекаемой высокопрочной металлической связке. Особенностью данного типа инструмента в отличие, например, от однослойного алмазного правящего инструмента на гальванической связке, является наличие большого по высоте рабочего слоя, что в сочетании с высокой прочностью металлической связки существенно увеличивает срок его службы

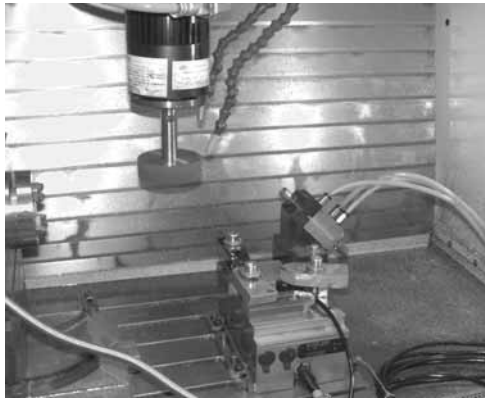


Рис. 12.11. Наладка оборудования

даже в условиях правки кругов из кубического нитрида бора.

Приводом вращения алмазной чашки на станке служило правочное устройство (пневматическая турбина) производства фирмы Joisten and Kettenbaum GmbH and Co ("Joke KG"). Частота вращения шпинделя турбины на холостом ходе составляла $63\,000\text{ мин}^{-1}$. Правочное устройство было установлено таким образом, что ось вращения алмазной чашки располагалась под углом 45° к оси вращения шлифовального круга.

Измерение составляющих силы резания при шлифовании и правке круга выполнялось с помощью динамометрической платформы мод. 9443 фирмы Kistler Instrumente AG, на рабочей поверхности которой были установлены обрабатываемая заготовка и правочное устройство. Для приема и обработки сигнала от "Kistler-платформы" служил прибор "Charge Amplifier" мод. 5011. Общий вид наладки оборудования показан на рис. 12.11.

Эффективная мощность при шлифовании определялась с помощью электронного ваттметра мод. WT 130 фирмы Yokogawa.

Контроль акустической эмиссии при обработке на станке осуществлялся встроенной системой контроля звуковых колебаний мод. "System 100" фирмы Pro-

metek GmbH. Измерение всех параметров выполнялось с интервалом $1 \cdot 10^{-3}\text{ с}$. Электрические сигналы, поступающие от измерительных приборов, регистрировались при помощи специальной электронной системы IMC R7 Musyscs.

Методика проведения испытаний.

В ходе испытаний правка шлифовальных кругов производилась по встречной схеме с радиальной подачей на врезание алмазной чашки $a_d = 0,005, 0,01$ и $0,02\text{ мм/ход}$ при ее начальной частоте вращения $n_d = 63\,000\text{ мин}^{-1}$ (рис. 12.12).

Скорость шлифовального круга при правке была аналогична его скорости при шлифовании и составляла $v_{кр} = 23, 33$ и 43 м/с , что соответствовало числу оборотов шпинделя, равных $5000, 7000$ и 9000 мин^{-1} .

Скорость продольного перемещения правящего инструмента определялась по формуле:

$$v_{fd} = \frac{n_s b_d}{U_d}, \quad (12.7)$$

где b_d — эффективная ширина рабочей части правящего инструмента; U_d — коэффициент перекрытия при правке.



Рис. 12.12. Процесс правки шлифовального круга

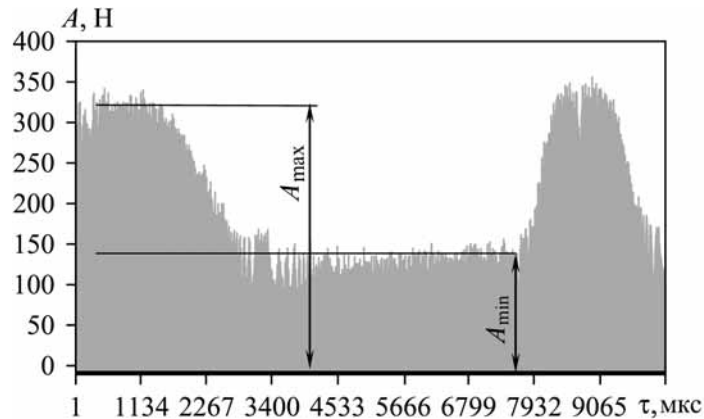


Рис. 12.13. Фрагмент осциллограммы колебаний правочного устройства

Принимая во внимание то, что ось шпинделя правящего устройства расположена под углом 45° , эффективная ширина рабочей части алмазной чашки при толщине стенки 1 мм составляла $1/\cos 45^\circ$ или $b_d = 1,4$ мм. В исследованиях были приняты следующие значения коэффициента перекрытия $U_d = 8, 16, 32$ и 64 .

В качестве критерия, характеризующего усилие правки, было принято приращение амплитуды вынужденных динамических колебаний правочного устройства. На рис. 12.13 в качестве примера показан фрагмент осциллограммы колебаний, зафиксированных при помощи динамометрической платформы на одном из режимов правки. Рассматриваемые колебания вызваны действием силы инерции от вращения шпинделя правочного устройства с алмазной чашкой. При этом максимальные значения амплитуды колебаний $A_{\max}$ на осциллограмме соответствовали периоду работы правочного устройства на холостом ходу с постоянной частотой вращения $63\,000\text{ мин}^{-1}$, а минимальные $A_{\min}$ – процессу правки шлифовального круга.

Составляющие амплитуды колебаний измерялись в трех координатных направлениях, а результирующая рассчитывалась по формуле

$$A = \sqrt{A_X^2 + A_Y^2 + A_Z^2}. \quad (12.8)$$

В ходе испытаний было отмечено, что значение $A_{\min}$ закономерно изменяется в зависимости от режима правки и характеристики шлифовального круга, т.е. от тех параметров, которые влияют на усилие правки. В этой связи при анализе результатов испытаний было принято, что приращение амплитуды $\Delta A = A_{\max} - A_{\min}$ колебаний правочного устройства пропорционально увеличению усилия правки.

После правки круга на заданном режиме производилось шлифование поверхности заготовки (рис. 12.14) по маятниковой схеме с подачей на глубину $t = 0,005, 0,01$ и $0,02$ мм/ход. Скорость продольного перемещения заготовки составляла $v_{\text{ст}} = 500, 1000$ и 2000 мм/мин. Мак-



Рис. 12.14. Процесс шлифования заготовки

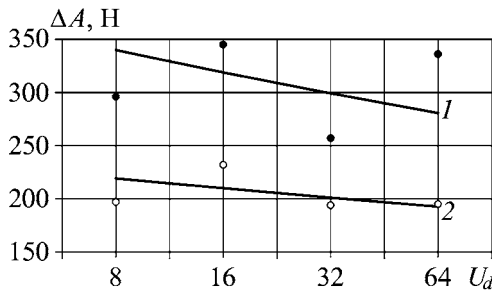


Рис. 12.15. Влияние коэффициента перекрытия на приращение амплитуды динамических колебаний правящего устройства при правке кругов из кубического нитрида бора:

1 – ЛКВ40 125/100 С1 7 К (нормальная структура); 2 – ЛКВ40 125/100 С1 12 К (высокопористая структура)

симальная скорость продольного перемещения была ограничена техническими возможностями станка. Шлифование выполнялось с охлаждением эмульсией на основе индустриального масла.

В ходе обработки на станке определялись активная мощность N , составляющие силы резания (нормальная – P_y и тангенциальная – P_z), а также уровень звуковых колебаний (акустической эмиссии, AE), сопровождающих процесс шлифования. После шлифования производилось измерение шероховатости обработанной поверхности (параметры Ra и Rz).

Результаты испытаний и их анализ. Полученные в результате испытаний экспериментальные данные были систематизированы и табулированы. Их статистический анализ был выполнен с помощью специальной компьютерной программы многофакторного регрессионного и корреляционного анализа.

В результате анализа полученных экспериментальных данных установлены закономерности и выявлены зависимости усилий правки по приращению амплитуды собственных колебаний правящего устройства от выбранного режима и характеристики шлифовальных кругов из кубического нитрида бора. Так, например, установлено, что при правке круга со

стандартной структурой наиболее сильное влияние на усилие правки оказывает скорость вращения круга (коэффициент парной корреляции 0,679), в меньшей степени – глубина врезания (0,268) и коэффициент перекрытия (–0,235). При правке высокопористого круга, судя по коэффициенту корреляции, равного 0,257, степень влияния скорости вращения ниже, чем у круга стандартной характеристики, а влияние глубины врезания и коэффициента перекрытия остается практически неизменным (коэффициенты корреляции 0,285 и –0,211 соответственно).

Разработаны математические модели связи величины приращения амплитуды колебаний со скоростью вращения круга, глубиной врезания алмазного инструмента и коэффициентом перекрытия, которые выражаются следующими зависимостями:

– для круга с нормальной структурой

$$\ln \Delta A = -1,725 + 0,997 \ln v_{кр} + 0,235 \ln a_d - 0,092 \ln U_d; \quad (12.9)$$

– для высокопористого круга

$$\ln \Delta A = 3,166 + 0,363 \ln v_{кр} + 0,187 \ln a_d - 0,062 \ln U_d. \quad (12.10)$$

В качестве примера на рис. 12.15 представлено графическое отображение зависимости приращения амплитуды динамических колебаний от коэффициента перекрытия при правке с $v_{кр} = 33$ м/с и $a_d = 0,01$ мм. На графике показаны зависимости, рассчитанные по формулам (12.9) и (12.10), и фактические значения, полученные в ходе эксперимента.

Как видно из графика, процесс правки высокопористого круга из кубического нитрида бора сопровождается меньшим (до 30...40 %) приращением амплитуды колебаний правящего устройства по сравнению с правкой круга нормальной структуры, что также может свидетельствовать о меньшем усилии правки высокопористого круга.

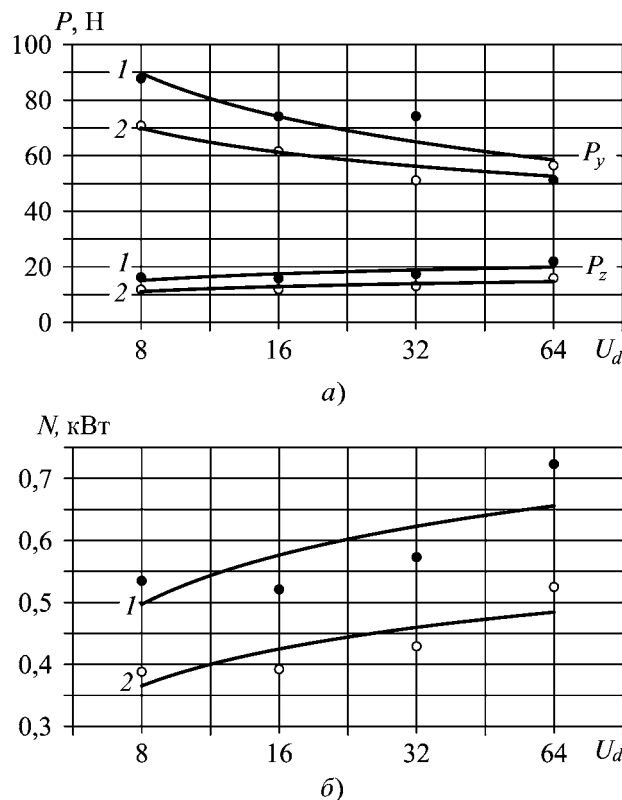


Рис. 12.16. Зависимости составляющих силы резания (а) и мощности шлифования (б) закаленной быстрорежущей стали Р6М5К5-МП (63...66 HRC) при $v_{кр} = 33$ м/с, $t = 0,01$ мм, $v_{ст} = 2000$ мм/мин от коэффициента перекрытия при правке с $a_d = 0,01$ мм для кругов:
 1 – ЛКВ40 125/100 С1 7 К (нормальная структура); 2 – ЛКВ40 125/100 С1 12 К (высокопористая структура)

В ходе проведения длительных экспериментов по правке кругов из кубического нитрида бора одной алмазной чашкой на различных режимах было совершено 38 циклов правки круга с нормальной структурой и 55 циклов правки высокопористого круга. За это время было удалено около 14 см^3 рабочего слоя круга со 100%-ной концентрацией КНБ и около 20 см^3 высокопористого слоя с концентрацией 60 %. При этом износа рабочего слоя алмазной чашки с помощью электронного измерительного микроскопа зафиксировать не удалось, что свидетельствует о ее высокой работоспособности.

По результатам испытаний также получены зависимости составляющих силы резания, потребляемой мощности, амплитуды звуковых колебаний при шлифовании и параметров шероховатости обработанной поверхности образца из закаленной быстрорежущей стали кругами из кубического нитрида бора.

На рис. 12.16–12.18 в качестве примера приведены экспериментально полученные зависимости этих параметров от коэффициента перекрытия при правке с подачей на врезание алмазной чашки $a_d = 0,01$ мм/ход для режима шлифования: $v_{кр} = 33$ м/с, $t = 0,01$ мм/ход, $v_{ст} = 2000$ мм/мин.

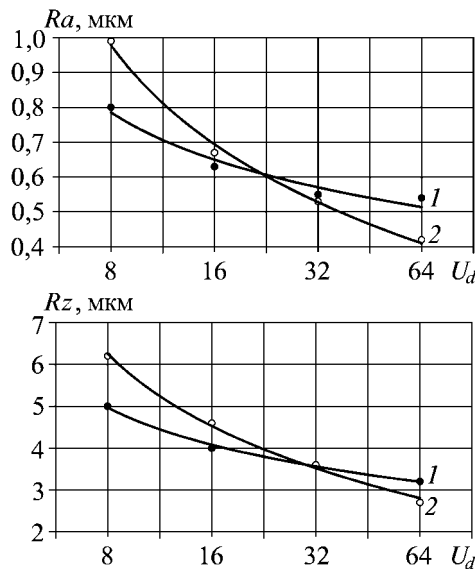


Рис. 12.17. Зависимости параметров шероховатости поверхности образца из закаленной быстрорежущей стали Р6М5К5-МП после шлифования с $v_{кр} = 33$ м/с, $t = 0,01$ мм, $v_{ст} = 2000$ мм/мин от коэффициента перекрытия при правке с $a_d = 0,01$ мм для кругов:
 1 – ЛКВ40 125/100 С1 7 К (нормальная структура); 2 – ЛКВ40 125/100 С1 12 К (высокопористая структура)

Как видно из графиков на рис. 12.16, высокопористый круг из КНБ в одинаковых условиях обеспечивает меньшие значения составляющих силы резания и потребляемой мощности, чем круг с нормальной структурой. Наибольшее различие между двумя кругами по силе резания отмечено при шлифовании после правки с коэффициентом $U_d = 8$. В этом случае нормальная составляющая силы резания для круга с характеристикой ЛКВ40 125/100 С1 12 К составляла около 71 Н, а для круга ЛКВ40 125/100 С1 7 К – 88 Н. Значение тангенциальной составляющей силы резания при шлифовании высокопористым кругом в данном случае составило около 12 Н, а для круга с нормальной структурой 17 Н. Соответствующее отличие наблюдалось также по мощности шлифования.

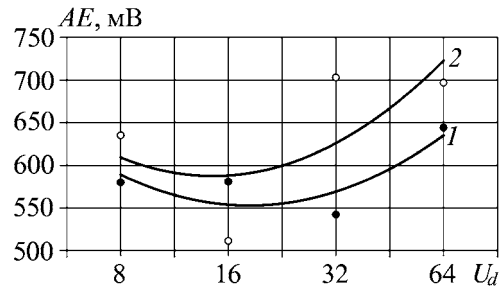


Рис. 12.18. Зависимость амплитуды звуковых колебаний при шлифовании закаленной быстрорежущей стали Р6М5К5-МП с $v_{кр} = 33$ м/с, $t = 0,01$ мм, $v_{ст} = 2000$ мм/мин от коэффициента перекрытия при правке с $a_d = 0,01$ мм для кругов:
 1 – ЛКВ40 125/100 С1 7 К (нормальная структура); 2 – ЛКВ40 125/100 С1 12 К (высокопористая структура)

Параметры шероховатости поверхности, обработанной высокопористым кругом и кругом с нормальной структурой после правки с коэффициентом перекрытия в диапазоне от 16 до 32, имеют близкие между собой значения (рис. 12.17). Кроме того, после правки с коэффициентом перекрытия больше 32 высокопористый круг обеспечивает лучшие показатели по шероховатости шлифованной поверхности. Бóльшая, чем для круга с нормальной структурой, шероховатость наблюдается после шлифования высокопористым кругом с коэффициентом перекрытия $U_d < 16$.

Аналогичные закономерности наблюдались во всем исследованном диапазоне режима шлифования.

На рис. 12.18 представлены сглаженные методом среднеквадратичных отклонений экспериментальные зависимости амплитуды звуковых колебаний при шлифовании от коэффициента перекрытия U_d . Установлен экстремальный характер связи между этими параметрами с минимумом величины звукового сигнала при U_d в диапазоне от 16 до 32.

Более высокий уровень звукового сигнала AE при шлифовании высокопо-

ристым кругом из КНБ объясняется более активным самозатачиванием рабочей поверхности инструмента, что обеспечивает наблюдаемое снижение усилия шлифования.

По результатам исследований можно сделать следующее заключение. Проведенные испытания позволили в одинаковых технологических условиях сравнить эксплуатационные свойства нового высокопористого (структура 12) и традиционного инструмента с нормальной структурой из кубического нитрида бора марки ЛКВ40 зернистостью 125/100 и твердостью С1.

В результате испытаний установлено, что высокопористая структура шлифовального круга из кубического нитрида бора обеспечивает его работу в режиме умеренного самозатачивания и более активное восстановление режущих свойств, что в свою очередь отражается на меньшей динамической напряженности процесса шлифования.

Усилия, возникающие при правке высокопористого круга, до 30...40 % меньше, чем усилия правки круга с нормальной структурой. При шлифовании закаленной быстрорежущей стали высокопористый круг обеспечил уменьшение значения нормальной составляющей силы резания порядка 25 %, а тангенциальной составляющей и мощности шлифования до 40 % ниже, чем традиционный круг из КНБ. Полученные результаты дают основание сделать вывод, что новый высокопористый круг из кубического нитрида бора легче профилируется при правке и обеспечивает более благоприятные условия шлифования, чем инструмент с аналогичной характеристикой по зернистости и твердости с нормальной структурой.

По качеству обработанной поверхности оба шлифовальных круга обеспечивают близкие между собой значения шероховатости.

Из-за высокой работоспособности алмазной правящей чашки, представленной фирмой Dr. Kaiser Diamantwerkzeuge,

не удалось зафиксировать ее износ и выявить закономерности изнашивания от условий правки.

Проведенные испытания позволили рекомендовать для внедрения в производство оптимальные характеристики высокопористых шлифовальных кругов из КНБ.

12.4. ШЛИФОВАНИЕ ВЫСОКОПОРИСТЫМИ ЭЛЬБОРОВЫМИ КРУГАМИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ

Опыт шлифования кругами из КНБ. Несмотря на благоприятные режущие свойства шлифовальных кругов из КНБ, их применение обуславливается не только технической целесообразностью, но, прежде всего, экономикой операции, включая себестоимость обработки деталей и условий правки инструмента.

В этом плане большой опыт накоплен за рубежом, где освоение нового инструмента скрупулезно просчитывается с экономической точки зрения.

По результатам исследований были сформулированы технологические принципы для круглого бесцентрового шлифования кругами из КНБ [120]. Несмотря на достаточно высокие затраты, по сравнению с традиционными методами шлифования, применение кругов на основе КНБ является более экономически выгодным. Например, при обработке клапанов двигателей при оптимальных режимах резания и условиях правки время обработки сократилось приблизительно на 65 %. Другим примером использования кругов на основе КНБ является шлифование за один проход поршневых пальцев, что обеспечивает снижение временных затрат на 50 %.

Применение шлифовальных кругов на основе КНБ практически во всех случаях значительно снижает время на обработку деталей. Это связано с их более высокой стойкостью и меньшим количеством правок по сравнению с кругами на



**Рис. 12.19. Обработка кулачков
распределительного вала кругом из
кубического нитрида бора
(фото фирмы Krebs&Riedel)**

основе традиционных абразивных материалов. Однако не во всех случаях можно однозначно установить преимущества кубического нитрида бора в сравнении с традиционными абразивами.

К. Weihert, сравнив применение шлифовальных кругов из электрокорунда и КНБ при профильном, в том числе глубинном, шлифовании высоколегированных сталей, показал, что несмотря на более высокую износостойкость кругов из КНБ, электрокорундовые круги не уступают им по экономичности даже с учетом значительно большего числа правок [147].

Безусловные преимущества кругов из КНБ достигаются тогда, когда высокая износостойкость инструмента сочетается с увеличением производительности шлифования.

Как отмечено в работе [134], использование кругов из КНБ на керамической связке при предварительном и оконча-

тельном шлифовании посадочных мест под подшипники кулачкового вала из серого чугуна на бесцентрово-шлифовальных станках Kronos фирмы Mikrosa Werkzeugmaschinen GmbH при скорости резания 90 м/с привело к снижению продолжительности обработки на 40 %. Это соответствует удельной производительности 20 мм³/(мм·с) или 170 мм³/мм на один вал. В связи со снижением сил резания стойкость подающего круга повышается до пяти раз. Уменьшение частоты смены инструмента, обусловленное высокой стойкостью шлифовальных кругов из КНБ (до 500 000 деталей) и подающих кругов, позволяет экономить до 200 рабочих часов.

При чистовом шлифовании коленчатого вала компрессора кругом из КНБ на керамической связке время обработки тоже уменьшается по сравнению с применением кругов из традиционного абразива. При этом выполняются требования по точности и качеству обработки – допуск на отклонение диаметра 3 мкм, допуск по круглости 1,2 мкм и шероховатость по R_z 1,6 мкм. Стойкость круга между двумя правками составила более 1000 деталей.

В автомобилестроении операция шлифования кулачков распределительного и коленчатого валов абразивными кругами заменяется на обработку кругами из кубического нитрида бора (рис. 12.19). Данная замена эффективна и с точки зрения повышения производительности процесса съема материала, и с точки зрения улучшения точности и качества обработки. При такой замене полностью изменяются технологические условия шлифования по характеристике инструмента, режимам обработки и особенно – условиям правки шлифовального круга.

Фирма Dr. Kaiser Diamantwerkzeuge рекомендует, например, для правки традиционных абразивных кругов на этих операциях ролик из природных алмазов, размещенных на рабочей поверхности вручную. Круги из кубического нитрида бора на керамических связках должны

правиться алмазными роликами с гальваническим спекаемым покрытием с так называемым "стачиваемым слоем". Оба типа правящих инструментов имеют относительно большое количество алмазных зерен, произвольным образом расположенных на их рабочей поверхности. Структура "стачиваемого слоя" обеспечивает умеренный износ правящего ролика с постоянным обновлением новых режущих кромок алмазов. Правка шлифовального круга из КНБ осуществляется посредством поперечной подачи алмазного ролика.

В работе [144] исследовали возможность применения абразивных кругов из КНБ при шлифовании сплавов на основе никеля и титана на плоскошлифовальном станке с ЧПУ мод. FS 635-Z фирмы Geibel&Hotz по маятниковой. Для испытаний использовали образцы из двухфазного аустенитного и мартенситного сплава. Для сравнения параметров шлифования осуществлялась также обработка кругами из микрокристаллического корунда (SG-EK 100) и карбида кремния (C80).

Исследования проводились в следующих диапазонах: скорость резания 10...120 м/с, продольная подача 5...35 м/мин и глубина резания 0,001...0,01 мм. Шлифование выполнялось с охлаждением эмульсией. Для оценки параметров шлифования были измерены силы резания, шероховатость обработанной поверхности по R_z , а также износ кругов в радиальном направлении.

В ходе исследования составляющих силы резания было выявлено, что при шлифовании с продольной подачей 10 м/мин и глубиной резания 0,003 мм кругом из КНБ повышение скорости резания до 30 м/с приводит к снижению тангенциальной и нормальной составляющих силы резания. При дальнейшем увеличении скорости резания тангенциальная составляющая остается на постоянном низком уровне, а нормальная – постепенно возрастает. Для кругов из традиционных абразивов – микрокристаллического корунда и карбида кремния – на тех же режимах тангенци-

альная составляющая силы резания постоянна, а нормальная составляющая снижается линейно.

С повышением продольной подачи при скорости резания 10 м/с и глубине 0,003 мм у кругов из карбида кремния и кубического нитрида бора тангенциальная составляющая возрастает с увеличением подачи до 10 м/мин, далее ее значение находится на постоянном высоком уровне. Нормальная составляющая силы резания имеет похожую тенденцию с переходом на постоянный уровень значений при подаче 20 м/мин. У всех трех представленных кругов с повышением глубины обработки силы резания возрастают.

Результаты исследования шероховатости обработанных поверхностей образцов в зависимости от скорости резания при продольной подаче 10 м/мин и глубине резания 0,003 мм показали, что у традиционных кругов максимальные значения R_z (для SG-EK 100 приблизительно 1,75 мкм; для C80 – 2,25 мкм) достигаются при скорости резания 20 м/с, а у круга из кубического нитрида бора – при 30 м/с ($R_z \approx 2,5$ мкм). Наименьший радиальный износ Δr показал круг из КНБ при скорости шлифования 30 м/с. По достижении значения производительности 350 мм³/мм величина Δr составила 0,007 мм, а у электрокорундового круга при скорости обработки 10 м/с $\Delta r = 0,443$ мм.

Из приведенных результатов видно, что применение шлифовальных кругов на основе КНБ при обработке титановых и никелевых сплавов обеспечивает лучшие показатели процесса по силе резания, шероховатости обработанной поверхности и износу круга по сравнению с абразивными кругами на основе микрокристаллической модификации корунда и карбида кремния.

Применение кругов из КНБ при обработке деталей из никелевых сплавов в авиакосмической промышленности является одним из перспективных направлений, но, в то же время, и наиболее обсуждаемой проблемой среди специалистов.

Р. Redington, например, обосновывает свои возражения о нецелесообразности шлифования кругами из КНБ деталей из никелевых сплавов экономическими соображениями [135]. Другие исследователи, напротив, не видят альтернативы для использования инструментов из КНБ на операциях высокоскоростного глубинного шлифования, включая процесс с непрерывной правкой круга [130, 138].

Итогом исследований в Кренфилдском университете (Великобритания) стали рекомендации по глубинному шлифованию никелевого сплава Inconel 718 кругами из КНБ с электролитическим покрытием при скорости круга 50...150 м/с, скорости детали 0,05...55 мм/с и глубине резания 0,05...1,5 мм.

Шлифование жаропрочных сплавов обычными кругами из эльбора, как показал З.И. Кремень, вследствие плотной структуры возможно только на "легких" режимах, когда съем металла незначителен. В ходе обработки никелевого сплава при скорости вращения круга 35 м/с, скорости подачи 0,5...1,5 м/мин и глубине резания 0,04...0,2 мм был использован опытный круг типоразмера 1А1 150×10×32×5. Предложенный пористый инструмент осуществляет свободное резание, о чем свидетельствует низкая мощность при шлифовании. Поверхность круга не покрывается металлом. Шероховатость обработанной поверхности $Ra = 0,45...0,70$ мкм удовлетворяет требованиям, предъявляемым к изготавливаемым деталям.

При профильном шлифовании винтов пар качения, изготовленных из сложнотермически упрочненных сталей 20ХН3А и 40ХМФН, попадание СОТС в зону шлифования затруднено. Вследствие этого во впадинах профиля винта могут возникать прижоги, что снижает надежность и срок эксплуатации винтовой пары. Применение эльборовых кругов с повышенным количеством пор позволяет уменьшить время шлифования в 1,5...1,7 раза, по сравнению с традиционным кругом из эльбора, и в 10...12 раз по сравнению с

кругом из электрокорунда. Число правок по сравнению с использованием круга из электрокорунда значительно сокращается.

При производстве режущих инструментов в ряде случаев выполнение операций шлифования и заточки осуществляется без использования СОТС. Роль охлаждающего агента при этом выполняет воздух. Применение пористых кругов на операциях изготовления режущего инструмента позволило полностью ликвидировать прижоги, часто образующиеся при использовании традиционных кругов из эльбора. Это дало возможность увеличить срок эксплуатации режущих инструментов до двух раз. Использование пористых эльборовых кругов на операциях шлифования червячной фрезы из быстрорежущей стали Р6М5Ф3 позволило на 38 % сократить время шлифования и в 2,5 раза уменьшить число правок.

Высокопористые круги на основе КНБ обеспечивают хорошую механическую обработку пластичных материалов, высокую точность при профильном шлифовании; круги легко профилируются и обладают хорошей самозатачиваемостью. При создании таких кругов их твердость может иметь различные значения, которые достигаются за счет регулирования количества естественных и искусственных пор, обеспечивая равномерное распределение абразивного материала в круге. Ниже приведены примеры шлифования разработанными кругами на основе КНБ.

При обработке закаленного кулачкового вала, изготовленного из стали 41MoCr4 твердостью 55...58 HRC, применялся круг типоразмера 1А1 24,8×18×8 мм из КНБ марки АВN800, размер зерна В91, концентрация 224, связка – керамическая. Припуск на обработку составлял 0,4 мм. Обработка проводилась со скоростью круга 60 м/с за три прохода с охлаждением эмульсией.

Черновую обработку вели с глубиной резания 0,3 мм, продольной подачей 0,15 м/мин; чистовую обработку – с глу-

биной 0,05 мм и продольной подачей 0,3 м/мин; финишную – с глубиной 0,01 мм и продольной подачей 0,6 м/мин.

Правка круга осуществлялась алмазной чашкой Ø 15 мм, размещенной на высокоскоростном шпинделе, за два прохода с глубиной 3 мкм после шлифования 40 деталей.

Наиболее значительным результатом процесса обработки было снижение затрат на 60...70 % по сравнению с ранее применяемыми кругами, а также было отмечено значительное снижение количества бракованных деталей. Шероховатость обработанной поверхности по R_z составила 2,8...3,1 мкм. При обработке кругами на основе КНБ со скоростью свыше 63 м/с можно обеспечить высокую геометрическую точность и качество поверхности детали. Однако высокая относительная концентрация КНБ в рассматриваемых кругах может значительно затруднить создание абразивного инструмента с высокими номерами структур.

Шлифовальные круги из КНБ марки ABN800 также используются для внутреннего шлифования сквозных и глухих отверстий при изготовлении инструмента из высоколегированных инструментальных сталей. Шлифовальные круги различных модификаций работают как с охлаждением, так и без него. Например, при шлифовании с охлаждением выбор размера зерна (B126, B91 и B64) зависит от характеристик обрабатываемого материала. Для "сухого" шлифования применяются круги на керамической связке с зерном B151 или B181 с концентрацией 150 %.

При обработке штампа шириной 20 мм, толщиной 2 мм и длиной 70 мм из высоколегированной стали X155CrVMo твердостью 60...62 HRC, необходимо было прошлифовать пазы шириной 8 мм на глубину 0,7 мм с двух сторон. Максимально допустимое отклонение размеров 2 мкм. Типоразмер применяемого круга 1A1 200×15×51, абразивный материал

КНБ марки ABN800, толщина абразивного слоя 3 мм, размер зерна B64, концентрация 125 %. Обработка проводилась на станке "Jung CNC" со скоростью круга 45 м/с и продольной подачей 24 м/мин. При черновой обработке снималось 0,02 мм, при чистовой – 2 мкм. Правка круга осуществлялась после обработки 240 пазов в два прохода на глубину 3 мкм за проход. Шероховатость обработанной поверхности по R_z составила 1,4 мкм. Несмотря на небольшую толщину обрабатываемых деталей, данные высокопористые круги, по мнению авторов, обеспечивают высокую точность и качество обрабатываемых деталей.

Производственная практика шлифования высокопористыми эльборовыми кругами. Эльборовый инструмент все более широко внедряется в практику шлифования деталей из различных конструкционных материалов и особенно – труднообрабатываемых.

Наибольшее распространение получили круги на керамических связках. Эльборовые круги на керамических связках изготавливают различной твердости и с большим диапазоном прочности материала зерна, его размеров и концентрации, что имеет большое значение при выборе характеристики инструмента для обработки деталей из материалов с различными физико-механическими свойствами. Сдерживающим фактором широкого внедрения данного типа инструмента остаются его высокая стоимость и трудоемкая правка. Трудоемкость и стоимость профилирования и правки эльборовых кругов, как уже подчеркивалось, в десятки раз превосходит аналогичные показатели для инструмента из традиционных абразивных материалов – электрокорунда и карбида кремния различных модификаций. Указанные недостатки в значительной степени удалось устранить при использовании оригинальных высокопористых кругов из кубического нитрида бора на керамических связках.

12.4. Механические свойства и износостойкость различных абразивных материалов

Абразивный материал	Микрохрупкость, Н	Микротвердость, ГПа	Износостойкость, м/мкм		
			BT22	BT8	12X18H9T
Электрокорунд	0,65...0,95	23,2...25,4	0,008...0,01	0,012...0,018	0,19...0,39
Карбид кремния	0,25...0,35	30...32	0,07...0,08	0,14...0,17	0,11
Алмаз	—	85...100	3,2	5...8	6,1
Эльбор	0,75...0,85	69...95	0,92...2,8	1,45...5,6	15,7

Кубический нитрид бора как инструментальный материал широко и эффективно используется при лезвийной и абразивной обработке конструкционных сталей. Мало сведений о его применении при шлифовании других, особенно труднообрабатываемых материалов, например, титановых и жаропрочных никелевых сплавов.

В.А. Носенко в своей работе [52] подробно рассмотрел особенности шлифования, так называемых d-переходных адгезионно-активных металлов, к которым относятся титан и никель. Указанные металлы, особенно титан, среди конструкционных материалов выделяются своей повышенной химической активностью: химические реакции, которые протекают в зоне резания между абразивным, обрабатываемым материалом и технологической средой оказывают существенное влияние на износ инструмента и, как следствие, на все выходные параметры шлифования.

Кубический нитрид бора как абразивный материал выгодно отличается в этой связи от других абразивов, включая алмаз (см. табл. 1.2). При сравнении износостойкости эльбора, электрокорунда, карбида кремния и алмаза при микроцарапании титановых сплавов BT8, BT22 и стали 12X18H9T выявилось заметное пре-

восходство сверхтвердых материалов (особенно эльбора): их износостойкость на три порядка выше, чем у традиционных абразивов (табл. 12.4).

В табл. 12.4 обобщены данные по различным модификациям электрокорунда (15A, 25A, 34A, 44A, 95A), карбида кремния (54C, 63C), алмаза (АСК, САМ) и эльбора (ЛО, КНБМ) [51].

Данные табл. 12.4 свидетельствуют, что прочностные характеристики абразивных материалов не всегда коррелированы с их износостойкостью при обработке. Сочетание в эльборе соизмеримой с корундами микрохрупкости и более высокой микротвердости при достаточной инертности к титану и железу является определяющим фактором в высоких показателях износостойкости. Аналогичные выводы можно сделать и относительно шлифования сплавов на основе никеля, так как эльбор характеризуется более высокой химической инертностью к никелю в сравнении с титаном.

Несмотря на то что никель относится к d-переходным металлам, сплавы на его основе имеют структурное строение, в котором определяющая роль в обрабатываемости резанием связана не с химической активностью никеля, а с наличием упрочняющей γ' -фазы. Никелевые сплавы представляют собой дисперсионно-твер-

деющие материалы, у которых при искусственном старении выделяются в коагулированном виде включения интерметаллидной γ' -фазы $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$, а также другие избыточные фазы (TiC , TiN , Me_{23}C_6 , Cr_5V_3). Содержание упрочняющей γ' -фазы зависит от степени легированности сплава и может изменяться от 8 до 50 % и более.

Включения γ' -фазы, гомогенно распределенные по объему материала и обладающие повышенной твердостью и прочностью, являются релевантными элементами структурного строения никелевых сплавов (рис. 12.20). Их физико-механические и морфологические свойства, характер распределения в большей степени, чем матричный никель, определяют жаропрочность материала и коррелированно с ней их обрабатываемость резанием. Чтобы получить качественную поверхность деталей из жаропрочных никелевых сплавов, необходимо обеспечить срезание интерметаллидных включений без их вырыва из материала.

Применение твердых и прочных зерен химически инертного КНБ с более

острыми режущими кромками, чем у традиционных абразивов, позволяет интенсифицировать процесс шлифования при высоком качестве обработки. Практика промышленного применения высокопористых эльборовых кругов это подтверждает.

Для различных операций шлифования применительно к деталям, обрабатываемых на координатно-шлифовальных станках мод. 40, 50 и 55 фирмы Hauser, были изготовлены высокопористые круги с 12-й структурой типа 1A1 и A8 (ГОСТ 17123–79) диаметром от 16 до 100 мм. Исследованный диапазон характеристик эльборовых кругов составил по зернистости 80/63, 125/100 и 200/160, по твердости от СМ1 до СТ2.

Режимы шлифования на каждой операции назначались в соответствии с технологической картой по программе ЧПУ. Зона резания охлаждалась 1,5%-ным раствором кальцинированной соды (станки мод. 40 и 50) или эмульсией Avia Diamond 120 Superfinishoil (станок мод. 55).

Исследованный диапазон режимов шлифования высокопористыми эльборовыми кругами составил:

скорость круга $v_{кр}$	13,1...43,2 м/с
скорости планетарного движения шпинделя $v_{пл}$	0,01...5,82 м/с
подача на глубину t	0,002...0,02 мм
число проходов i	3...12

Новые эльборовые круги были испытаны на 48 операциях внутреннего, круглого наружного и плоского шлифования деталей из легированных сталей 14X17НЛ и 95X18, титанового сплава ВТ20Л и жаропрочных никелевых сплавов ХН62БМКТЮ-ИД и ХН73МБТЮ-ВД (табл. 12.5).

Ранее на указанных операциях использовались эльборовые круги 8-й структуры. Длительная эксплуатация высокопористого инструмента дала возможность сравнить режущую способность и особенности применения двух типов эль-

боровых кругов: с нормальной и высокопористой структурами.

Анализ использования высокопористых и традиционных эльборовых кругов показал, что высокопористые эльборовые круги значительно легче профилируются при установке на шпинделе станка для устранения биения, вскрытия режущих зерен на рабочей поверхности и точного формообразования, а также при промежуточных правках в процессе шлифования по сравнению с эльборовыми кругами нормальной структуры.

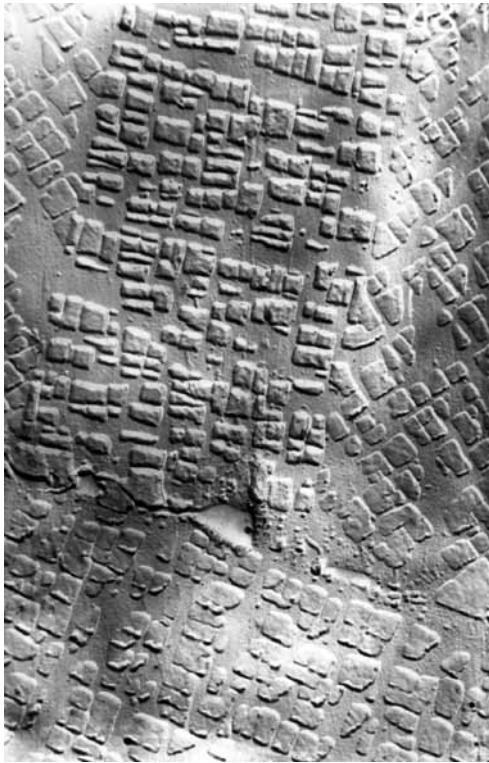


Рис. 12.20. Субструктура жаропрочного никелевого сплава

Процесс правки высокопористых эльборовых кругов по показаниям датчика акустической эмиссии протекает на 30...40 % менее напряженно, чем у обычных эльборовых кругов. Это свидетельствует о более благоприятных физических условиях формирования микрорельефа рабочей поверхности высокопористого эльборового инструмента и косвенно — о меньшем расходе алмазов правящего инструмента.

Сравнение двух типов эльборовых кругов в широком диапазоне характеристик по зернистости, твердости и типоразмерам в одинаковых условиях обработки деталей (по технологической операции и режимам шлифования) из представленных материалов показало, что высокопористые эльборовые круги во всех случаях обеспечивают требования точности, шероховатости обработанной по-

верхности и отсутствия прижогов, как и обычные эльборовые круги.

Так же, как и при правке, шлифование высокопористыми эльборовыми кругами по показаниям датчика акустической эмиссии и по оценкам операторов протекает менее напряженно, чем обработка обычным эльборовым инструментом.

Испытаниями также установлено, что высокопористые эльборовые круги позволяют форсировать режим шлифования без ущерба для точности и качества обработки. Новый инструмент исследованных характеристик может обеспечить качественное шлифование с глубиной до 0,03...0,05 мм/ход, что до 10 раз более производительней, чем обработка эльборовыми кругами нормальной структуры.

В табл. 12.5 приведены также примеры профильного шлифования высокопористыми эльборовыми кругами фасонных протяжек и резьбонакатного ролика.

При проектировании операций шлифования эльборовыми кругами необходимо учитывать особенности эльбора как режущего материала и связанные с этим эксплуатационные возможности инструмента. В эльборе удачно сочетаются показатели прочности, твердости, микрохрупкости и трещиностойкости с химической инертностью ко всем известным конструкционным материалам. По этой причине зерна КНБ в условиях шлифования сохраняют очень долго свою режущую способность, поддерживая ее за счет микросколов режущих кромок. Изнашивание эльборовых кругов происходит в основном в режиме частичного самозатачивания, без образования площадок износа.

Чтобы предотвратить преждевременное вырывание зерна из круга и повысить экономичность шлифования, эльборовый инструмент на керамических связках применяют по твердости на 2...4 степени выше, чем круги на основе корундов и карбида кремния.

Эльборовые круги трудно правятся, но зато они более длительный период, чем традиционный абразивный инструмент,

12.5. Технологические операции шлифования с применением высокопористых эльборовых кругов

№ п/п	Обрабатываемая деталь; материал	Типоразмер; характеристика круга	Модель станка	Содержание операции и требования к обработке	Режимы шлифования
1	Крышка; сталь 14X17НЛ с хромо- вым покрытием	A8 16×16×6; ЛКВ 200/160 CM1-2 12 K27	Координатно- шлифоваль- ный мод. 50 фирмы Hauser	Шлифование отверстий Ø 30...172 мм. Радиальное биение не более 0,005... 0,02 мм. Отклонение от круглости не более 0,003 мм. Ra не более 0,8 мкм	V _{кр} = 35 м/с; V _{пл} = 0,3...0,9 м/с; t = 0,002 мм; i = 8
		1A1 40×32×20×5; ЛКВ 125/100 CM1-2 12 K27; 40×34×20×5×27×18; ЛКВ 160/125 CM1-2 12 K27		Шлифование наружной поверхности Ø 78 мм. Шлифование торцов. Торцевое биение не более 0,01 мм. Ra не более 0,8 мкм	
2	Корпус редуктора с крышкой; сталь 14X17НЛ. Цементация и за- калка на твердость 56...58 HRC	1A1 60×32×20×5; ЛКВ 200/160 CT1-2 12 K27	Координатно- шлифоваль- ный мод. 55 фирмы Hauser	Шлифование отверстия Ø 72 мм. Радиальное биение не более 0,03 мм. Ra не более 0,8 мкм	V _{кр} = 35 м/с; V _{пл} = 1 м/с; t = 0,002 мм; i = 3
3	Крышка; сталь 14X17НЛ с хромо- вым покрытием	1A1 60×32×20×5; ЛКВ 200/160 CT1-2 12 K27	Координатно- шлифоваль- ный мод. 50 фирмы Hauser	Шлифование отверстия Ø 72 мм. Отклонение от круглости не более 0,02 мм. Шлифование торца. Радиальное и торцевое биение не более 0,01 мм. Ra не более 0,8 мкм	V _{кр} = 35 м/с; V _{пл} = 1 м/с; t = 0,002 мм; i = 10
4	Корпус фильтра; сталь 95X18	A8 10×16×3; ЛКВ 200/160 CM1-2 12 K27	Координатно- шлифовальный мод. 55 фирмы Hauser	Шлифование отверстия Ø 12 мм. Радиальное биение не более 0,05 мм. Отклонение от перпендикулярности не более 0,01 мм. Шлифование торца. Ra не более 0,8 мкм	V _{кр} = 22,5 м/с; V _{пл} = 0,01 м/с; t = 0,01 мм

Продолжение табл. 12.5

№ п/п	Обрабатываемая деталь; материал	Типоразмер; характеристика круга	Модель станка	Содержание операции и требования к обработке	Режимы шлифования
5	Обойма нижняя; титановый сплав BT-20Л с покрытием ЦВСП-3С	1А1 60×32×20×5; ЛКВ 200/160 СТ1-2 12 К27 63×34×20×5×40×16; ЛКВ 160/125 CM1-2 14 К27	Координатно-шлифовальный мод. 50 фир- мы Hauser	Шлифование отверстия Ø 80 мм. Радиальное биение не более 0,008 мм. Шлифование торца. Ra не более 1,6 мкм	$V_{кр} = 15,7$ м/с; $V_{ит} = 0,06$ м/с; $t = 0,004$ мм
		A8 16×16×6; ЛКВ 200/160 CM1-2 12 К27		Шлифование наружной поверхности Ø 56 мм. Радиальное биение не более 0,02 мм. Ra не более 0,8 мкм	$V_{кр} = 15,7$ м/с; $V_{ит} = 0,04$ м/с; $t = 0,004$ мм
				Шлифование отверстия в размер Ø 34,2 мм. Радиальное биение не более 0,008 мм. Ra не более 1,6 мкм	$V_{кр} = 13,1$ м/с; $V_{ит} = 0,02$ м/с; $t = 0,01$ мм
6	Переходник; титановый сплав BT20Л	1А1 32×32×10×5; ЛКВ 200/160 CM1-2 12 К27 40×34×20×5×27×18; ЛКВ 200/160 CM1-2 12 К27	Координатно-шлифовальный мод. 55 фир- мы Hauser	Шлифование отверстия Ø 55 мм. Шлифование торца. Радиальное и торцевое биение не более 0,02 мм. Ra не более 0,8 мкм	$V_{кр} = 43,2$ м/с; $V_{ит} = 0,03$ м/с; $t = 0,02$ мм; $i = 8$
		1А1 60×32×20×5; ЛКВ 200/160 CM1-2 12 К27 63×34×20×5×40×16; ЛКВ 200/160 CM1-2 12 К27		Шлифование отверстия Ø 95 мм. Шлифование торца. Радиальное и торцевое биение не более 0,02 мм. Ra не более 0,8 мкм	$V_{кр} = 30$ м/с; $V_{ит} = 0,08$ м/с; $t = 0,02$ мм; $i = 8$
7	Диск 1-й ступени турбины высоко-го давления; жаропрочный никелевый сплав ХН73МБТЮ-ВД	1А1 60×32×20×5; ЛКВ 125/100 CM1-2 12 К27 100×20×32×5×50×10; ЛКВ 160/125 CM1-2 12 К27	Координатно-шлифовальный мод. 55 фир- мы Hauser	Шлифование отверстий Ø266...535 мм. Радиальное биение не более 0,02...0,05 мм. Отклонение от круглости не более 0,03 мм. Отклонение от перпендикулярности не более 0,02 мм. Шлифование торцов. Отклонение от параллельности не более 0,03 мм. Отклонение от плоскостности не более 0,03 мм. Ra не более 0,4...0,8 мкм	$V_{кр} = 35$ м/с $V_{ит} = 2,3...5,6$ м/с $t = 0,008$ мм

Продолжение табл. 12.5

№ п/п	Обрабатываемая деталь; материал	Типоразмер; характеристика круга	Модель станка	Содержание операции и требования к обработке	Режимы шлифования
8	Диск турбины низкого давле- ния; жаропрочный ни- келевый сплав ХН62БМКТЮ-ИД	1А1 60×32×20×5; ЛКВ 125/100 СТ1-2 12 К27 63×34×20×5×40×16; ЛКВ 160/125 СТ1-2 12 К27	Координатно- шлифоваль- ный мод. 55 фирмы Haußer	Шлифование отверстия Ø 202 мм. Отклонение от перпендикулярности не более 0,02 мм. Отклонение от круглости не более 0,02 мм. Ra не более 0,4 мкм	$V_{кр} = 35$ м/с; $V_{пл} = 2,01$ м/с; $f = 0,003$ мм
		1А1 60×32×20×5; ЛКВ 125/100 СТ1-2 12 К27 63×34×20×5×40×16; ЛКВ 160/125 СТ1-2 12 К27	Координатно- шлифоваль- ный мод. 55 фирмы Haußer	Шлифование наружной поверхности Ø 556 мм. Ra не более 0,08 мкм. Шлифование торцов. Отклонение от параллельности не более 0,015 мм. Отклонение от плоскостности не более 0,02 мм. Ra не более 1,6 мкм	$V_{кр} = 35$ м/с; $V_{пл} = 5,82$ м/с; $f = 0,003$ мм
9	Кольцо устано- вочное; сталь ШХ15 (59...63 HRC)	А8 10×14×3,0; ЛКВ 63/50 СТ1 12 К27	Внутришли- фовальный мод. НТГ22 фирмы Tschudin	Шлифование отверстий Ø 13...20 мм. Ra не более 0,16 мкм	$V_{кр} = 30$ м/с; $V_{пл} = 10...18$ м/мин; $S_{пр} = 185$ мм/мин; $f = 0,002$ мм
		А8 12×16×3,0; ЛКВ 63/50 СТ1 12 К27 А8 14×16×5,0; ЛКВ 63/50 СТ1 12 К27 А8 16×5×8,0; ЛКВ 100/80 СТ1 12 К27		Шлифование отверстий Ø 15...25 мм. Ra не более 0,16 мкм	
10	Кольцо устано- вочное; сталь ХВГ (58...60 HRC)	А8 20×6×10; ЛКВ 63/50 СТ1 12 К27	Внутришли- фовальный мод. НТГ22 фирмы Tschudin	Шлифование отверстий Ø 22...30 мм. Отклонение от круглости не более 0,02 мм. Ra не более 0,16 мкм	$V_{кр} = 30$ м/с; $V_{пл} = 19...23$ м/мин; $S_{пр} = 200$ мм/мин; $f = 0,002$ мм
		А8 20×8×10; ЛКВ 50/40 СТ1 12 К27 А8 20×15×10; ЛКВ 100/80 СТ1 12 К27			

Продолжение табл. 12.5

№ п/п	Обрабатываемая деталь, материал	Типоразмер; характеристика круга	Модель станка	Содержание операции и требования к обработке	Режимы шлифования
11	Протяжка на- ружная с фасон- ным профилем; сталь P12M3Ф2K5-МП (66...68 HRC)	A8 100×25×51; ЛКВ 100/80 СТ1 12 K27	Профиле- шлифоваль- ный мод. 1250 CNC фирмы Brand	Шлифование фасонного профиля протяжки. <i>Ra</i> не более 0,2 мкм	$V_{кр} = 30$ м/с; $S_{кр} = 1,5$ м/мин; $t = 0,005 \dots 0,002$ мм
		A8 100×30×51; ЛКВ 100/80 СТ1 12 K27			
		A8 90×50×32; ЛКВ 100/80 СТ1 12 K27			
12	Протяжка шли- цевая с эволь- вентным профи- лем; сталь P12M3Ф2K5-МП (66...68 HRC)	1A1 200×10×32×15; ЛКВ 100/80 СТ1 12 K27	Специальный круглошли- фовальный фирмы Карр	Шлифование эвольвентного профиля зубьев. Накопленная погрешность окружного шага шлицевых выступов не более 0,03 мм. Биеение роликов во впадине зубьев не более 0,02 мм. <i>Ra</i> не более 0,32 мкм	$V_{кр} = 35$ м/с; $S_{кр} = 1,5$ м/мин; $t = 0,03 \dots 0,01$ мм
		1A1 200×15×32×15; ЛКВ 100/80 СТ1 12 K27			
		ЛКВ 100/80 СТ1 12 K27			
13	Ролик резбона- катной; сталь ХВГ (58...60 HRC)	1A1 350×20×160×10; ЛКВ 63/50 СТ1 12 K27	Резьбошли- фовальный, мод. RG 500 фирмы Rei- shauer	Шлифование резьбы с шагом 1,0...2,0 мм. Допустимая конусность и овальность по наружному диаметру 0,02 мм. <i>Ra</i> не более 0,63 мкм	$V_{кр} = 35$ м/с; $V_n = 0,8$ м/с; $t = 0,05 \dots 0,15$ мм
		1A1 350×25×160×10; ЛКВ 63/50 СТ1 12 K27			
		1A1 350×40×160×10; ЛКВ 63/50 СТ1 12 K27			

сохраняют режущий рельеф, сформированный при правке.

Выходные параметры шлифования очень чувствительны к назначению характеристик эльборового круга и, прежде всего, к размеру зерна, концентрации и твердости. Закономерности процесса обработки эльборовым кругом лучше прогнозируются в соответствии с теорией шлифования, чем это имеет место при обработке, например, корундовыми кругами, которые имеют склонность к более быстрой потере своих режущих свойств и непредсказуемости своего дальнейшего поведения.

Необходимость тщательного анализа при назначении характеристики эльборового круга иллюстрируется следующим образом.

В институте Fertigungstechnik Werkzeugmaschinen Ганноверского университета нами были проведены сравнительные испытания кругов из КНБ на керамических связках различных характеристик: ЛКВ30 160/125 CM1 12 K27 (60%-ная концентрация эльбора), ЛКВ30 160/125 MC2 8 K27 (100%-ная концентрация эльбора), 3В 151/9×26 V8120-125 (125%-ная концентрация КНБ) фирмы Krebs&Riedel и 30В 151 P8 V04 150 (150%-ная концентрация КНБ) фирмы Hermes. Для дальнейшего анализа введем условные обозначения К – для круга фирмы Krebs&Riedel и Н – для круга фирмы Hermes.

Сравнение кругов, изготовленных в России (МГТУ "Станкин") и Германии, проводилось в одинаковых условиях плоского шлифования по схемам маятниковой и глубинной обработки образца из закаленной стали 100Cr6. Во всех случаях круги из кубического нитрида бора правились алмазным роликом на одном режиме правки: $q_d = 0,9$; $U_D = 4$; с величиной врезания 3 мкм.

При маятниковом шлифовании на постоянном режиме $v_{кр} = 30$ м/с, $v_d = 6$ м/мин, $t = 0,01$ мм с удельной производительностью $1 \text{ мм}^3/(\text{мм} \cdot \text{с})$ выявился

большой разброс значений нормальной составляющей P_y силы резания: от 2 до 13,5 Н/мм, или почти в 7 раз. С увеличением времени шлифования и объема удаленного материала от 100 до 500 мм³ на 1 мм высоты круга для кругов К и Н наблюдается некоторое снижение P_y от 13,5 и 6 Н/мм до 12 и 5,3 Н/мм. Это свидетельствует об улучшении режущих свойств указанных кругов от времени шлифования.

При обработке отечественными эльборовыми кругами структур 8 и 12 нормальная составляющая силы резания оставалась практически независимой от времени шлифования и соответственно равнялась 2 и 2,1...2,2 Н/мм.

Также существенно изменялись после шлифования различными кругами параметры шероховатости обработанной поверхности: по Ra от 0,3 до 5,2 мкм, а по Rz от 2,1 до 25,1 мкм.

К сожалению, по представленным характеристикам кругов К и Н невозможно определить их твердость. Сопоставляя данные по усилию резания и шероховатости обработанной поверхности и учитывая, что все круги имеют примерно одинаковую зернистость, можно по степени уменьшения твердости расположить их в следующий ряд: К, Н, круги с 12-й и 8-й структурами. То, что такое расположение кругов по твердости отвечает действительности, подтверждают данные по их размерному износу: 6, 22, 30 и 33 мкм соответственно.

По величине размерного износа можно судить о том, что у мягких кругов происходит более интенсивное обновление режущего рельефа с рабочей поверхности инструмента, чем у более твердых (круги К и Н). Обычно высота выступания абразивных зерен над рабочей поверхностью составляет 0,1...0,15 их размеров (см. п. 2.1). Поэтому, очевидно, что у относительно мягких кругов структур 8 и 12 изнашивание инструмента происходит с преимущественным вырывом зерен кубического нитрида бора, которые еще не выработали свой ресурс.

Изнашивание круга с частичным самозатачиванием приводит к снижению силы резания и съему металла с минимальной энергоемкостью. Но одновременно возрастает разновысотность режущих зерен, что, в свою очередь, повышает высоту микронеровностей на обработанной поверхности.

На режиме, имитирующем глубинное шлифование: $v_{\text{кр}} = 30$ м/с, $v_{\text{д}} = 60$ мм/мин, $t = 0,5$ мм при удельной производительности $0,5$ мм³/(мм·с) заметно увеличилась нормальная составляющая силы резания до $6...21,5$ Н/мм при сохранении заметного разброса ее значений в зависимости от характеристики круга. Отечественные круги показали значение P_y в 2,7 раз (круг с 12-й структурой) и в 3,6 раз (круг с 8-й структурой) меньше, чем круг К. Шлифовальный круг из КНБ фирмы Hermes для условий глубинного шлифования оказался непригодным.

При глубинном шлифовании с увеличением времени обработки круги структур 8 и 12 постоянно улучшают свою режущую способность: составляющая P_y при увеличении съема металла от 150 до 450 мм³/мм уменьшалась соответственно на 50 и 33 %.

Во взаимосвязи с установленной твердостью испытанных кругов изменялись параметры шероховатости обработанной поверхности, но диапазон их изменения при глубинном шлифовании уменьшился: по Ra рассеяние значений составило от 0,5 до 4,5 мкм, по Rz от 2,8 до 21,9 мкм.

Проведенное сравнение продемонстрировало технологические возможности шлифовальных кругов из кубического нитрида бора в зависимости от их характеристики. Повышенные значения твердости и объемного содержания зерен КНБ способствуют достижению минимальной шероховатости обработанной поверхности, так как на рабочей поверхности правкой формируется режущий рельеф с минимальной разновысотностью зерен. По

этой же причине шлифование такими кругами нельзя проводить с большими глубинами резания, поскольку материал с детали удаляется с большими энергетическими затратами из-за активного взаимодействия связки круга с обрабатываемой поверхностью.

Назначение характеристики круга – прочности зерна, их размеров, твердости, концентрации и материала связки – это поиск компромисса в решении противоречивой задачи одновременного достижения максимальной производительности процесса и его экономичности при заданных требованиях по точности и качеству обработки.

Из полученных данных, а также опыта эльборового шлифования следует, что условия правки кругов из кубического нитрида бора необходимо оптимизировать не только в зависимости от их характеристики, но и с учетом предполагаемых условий обработки. Правка должна обеспечить оптимальное значение разновысотности режущих зерен для конкретной операции шлифования. В реальных условиях это обстоятельство не всегда учитывается.

Повышение эффективности правки эльборовых кругов. На указанных выше операциях эльборовые круги вытеснили ранее применявшийся абразивный инструмент на основе корунда и карбида кремния и позволили существенно повысить производительность и качество обработки. Однако узким местом оставалась правка эльборовых кругов, в частности, на координатно-шлифовальных станках мод. 40 и 50 фирмы Hauser. Конструкция этих станков предусматривает правку шлифовального круга алмазными карандашами. При использовании правящего карандаша расход дорогостоящего алмаза настолько велик, что применять такую схему правки экономически невыгодно. При этом точность получаемого профиля шлифовального круга и микрогеометрия его рабочей поверхности не всегда соответствовали технологическим требованиям операции.

Для повышения эффективности правки было предложено исключить применение алмазных карандашей с заменой на профилирование эльборовых кругов алмазными вращающимися правящими инструментами. Правка по программе алмазными вращающимися роликами обеспечивает повышение качества обработки деталей шлифованием за счет лучшей возможности для целенаправленного управления процессом правки. По сравнению с неподвижным инструментом наличие дополнительного движения вращения обеспечивает относительно более мягкий режим правки шлифовального круга алмазными роликами и их высокую долговечность. Различные варианты комплектации алмазными роликами, шпинделями и другими частями для программной правки могут быть реализованы практически для всех случаев обработки. Привод для правки может быть без труда смонтирован на шлифовальной станке, находящемся в эксплуатации.

После консультации с представителями фирмы Dr. Kaiser Diamantwerkzeuge, которая является ведущей фирмой по разработке и изготовлению правящего инструмента и систем правки, было принято решение модернизировать шлифовальные станки путем установки на их рабочем столе высокоскоростных правочных шпинделей.

Правочные шпиндели изготавливаются исходя из предполагаемого суммарного биения, динамической прочности, значения постоянной скорости, силы тока и характеристик датчика. Каждый шпиндель, проектируемый с учетом жестких требований и в стандартном исполнении, оснащен термодатчиком, а также скоростным и контактным датчиками. Чтобы обеспечить высокую долговечность шпинделей, в них предусмотрен конструктивный узел с лабиринтным уплотнением и средствами для воздушной очистки.

Диапазон возможных технических характеристик правочных шпинделей

фирмы Dr. Kaiser Diamantwerkzeuge следующий: диаметр шпинделя 33...100 мм; диаметр правящего ролика 20...200 мм; диапазон частоты вращения 1500...60 000 мин⁻¹; мощность 0,08... 1,3 кВт.

Из рекомендуемого перечня правочных шпинделей был выбран шпиндель типа C58F, который оптимально удовлетворял всем требованиям – по частоте вращения, выходной мощности, силе тока, габаритам и др. Данный тип шпинделей фирма Dr. Kaiser Diamantwerkzeuge комплектует либо правящим обтачивающим роликом, либо правящей алмазной чашкой. В комплект поставки правочного шпинделя типа C58F входят: термодатчик, преобразователь частоты SFU, установка очистки воздуха со шлангом, соединительные кабели, крепежные элементы и алмазный правочный инструмент.

Для правки кругов из КНБ и алмазных кругов, а также традиционных абразивных шлифовальных кругов на керамических связках предлагается на выбор несколько видов алмазных роликов. В зависимости от требований к операции правки и типа шлифовального круга имеется несколько вариантов: ролики с природными или с поликристаллическими искусственными алмазами, ролики с кромкодробящим действием и ролики с импрегнированной связкой.

Монтаж комплекта правочного шпинделя обусловлен особенностями конструкции каждого станка в отдельности, что отражается на конструкции установочных приспособлений. В состав поставленных комплектов входили только типовые элементы, предусмотренные номенклатурой фирмы Dr. Kaiser Diamantwerkzeuge. Дополнительно были спроектированы и изготовлены несложное установочное приспособление для крепления шпинделя на рабочем столе с Т-образными пазами, корпус для размещения преобразователя частоты и зажимное приспособление для крепления установки очистки воздуха. Пульт управления прав-

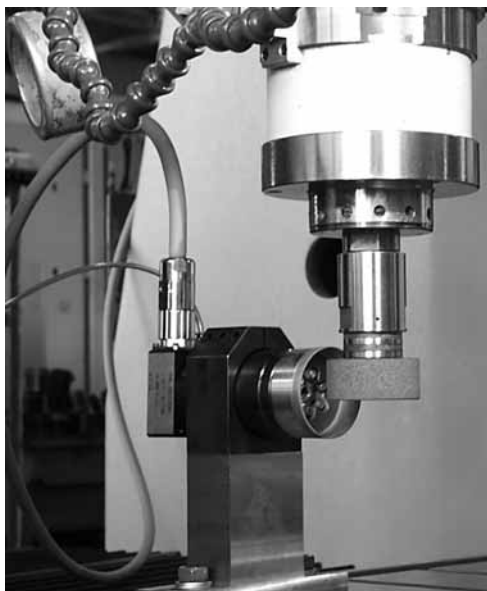


Рис. 12.21. Схема правки эльборового круга алмазной чашкой

кой был закреплен на одной стойке с пультом управления шлифовальным станком. После размещения и закрепления всех основных элементов комплекта их объединили между собой в рабочую сеть через установку очистки воздуха и подключили к энергосети станка.

Частота вращения шпинделя задается через преобразователь частоты, а прочие режимы правки (частота вращения круга, глубина резания, продольная подача и подача на врезание) осуществляются через органы управления станка вручную или автоматически при помощи ЧПУ. На рис. 12.21 показана правка эльборового круга алмазной правящей чашкой на координатно-шлифовальном станке.

Опыт применения новой системы правки показал, что процесс профилирования эльборовых кругов вращающейся алмазной чашкой позволяет сократить время правки до 10 раз в сравнении с правкой алмазным карандашом при высокой точности и качестве рабочей поверхности шлифовального круга. Новая система правки безусловно эффективна и для

профилирования обычных абразивных кругов на основе электрокорунда и карбида кремния различных модификаций, которые используются для предварительной обработки на координатно-шлифовальных станках мод. 40 и 50 фирмы Hauser или других типов станков.

12.5. ПРОФИЛЬНОЕ ШЛИФОВАНИЕ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ВЫСОКОПОРИСТЫМИ ЭЛЬБОРОВЫМИ КРУГАМИ

Опыт шлифования зубчатых колес кругами из КНБ. Шлифовальные круги из КНБ выпускают на различных связках, которые отличаются по физическим и химическим свойствам, что соответственно определяет область их применения. Для шлифования зубчатых колес используют часто, например, однослойные эльборовые круги, изготавливаемые методом гальванотехники. Инструмент представляет собой металлический корпус с формой рабочей поверхности, эквидистантной геометрии обрабатываемой поверхности детали. Зерна кубического нитрида бора удерживаются в слое осажденного гальваническим способом материала связки. Наиболее часто для этого применяют никелевую связку. Круги характеризуются большой разновысотностью зерен КНБ над уровнем связки и большим пространством для размещения срезаемой стружки. Круги можно использовать без предварительной операции правки. Они позволяют шлифовать с высокой скоростью резания и обеспечивают большую интенсивность съема материала. Например, данный тип инструмента применяют для чистовой обработки зубчатых колес по методу профильного шлифования [61].

Согласно исследованиям специалистов фирмы Карр, стойкость таких кругов в 3000...4000 раз выше, чем у кругов на основе электрокорунда. При правильной эксплуатации инструмента один круг можно многократно (до 20 раз и более) регенерировать. Однако недостатком про-

фильного шлифования непрямыми кругами является жесткая привязанность инструмента к геометрическим параметрам зубчатого венца. Процесс обработки является дорогостоящим ввиду высокой стоимости кругов. Область его применения – отрасли промышленности с крупносерийным производством.

Наиболее широкое применение при шлифовании зубчатых колес находят круги на керамических связках. Круги из КНБ на керамических связках изготавливают различной твердости и с большим диапазоном прочности материала зерна, его размеров и концентрации, что имеет большое значение при выборе характеристики инструмента для обработки зубчатых колес с различными физико-механическими и конструктивными характеристиками и по различным технологическим схемам шлифования. Например, с помощью кругов на керамических связках выполнены исследования по повышению эффективности зубошлифования [104].

Для испытаний использовали зубчатое колесо из закаленной стали 16MnCr5E с твердостью 61 HRC (глубина цементованного слоя 0,8 мм) со следующими геометрическими характеристиками: число зубьев – 44, модуль – 4,618 мм, угол зацепления – 20°, угол наклона – 11,3°, смещение исходного контура $x = 0,699766$, ширина зубчатого венца – 54 мм.

В ходе испытаний осуществлялось профильное шлифование только боковых поверхностей впадин. Обработку проводили шлифовальным кругом размером 200×25×125 на основе КНБ с характеристикой B181 VSS 3426 DE 8SC V180 (объемное содержание кубического нитрида бора 18 %) на скорости 50 м/с. Охлаждение зоны резания осуществлялось маслом, подаваемым под давлением в 6 бар. Отдельно изготовленные сегменты рабочего слоя круга были наклеены на стальной корпус.

Правку круга осуществляли алмазным обтачивающим роликом типа UZ

(природные алмазы закреплены на рабочей поверхности правящего ролика методом гальванотехники) по циклам ЧПУ на профильно-шлифовальном станке. Наружный диаметр ролика $D_a = 150$ мм, радиус профиля рабочей поверхности $\rho_R = 0,83$ мм.

Исследованиями установлена зависимость геометрической точности формы зубчатого профиля от режимов правки. Перед шлифованием правку круга осуществляли на следующем режиме: подача на врезание $a_d = 10$ мкм, соотношение скоростей $q_d = 0,8$ и коэффициент перекрытия $U_d = 8$. После правки эффективная высота микронеровностей рабочей поверхности круга R_z составила приблизительно 8,2 мкм. Шлифование проводили при скорости круга 50 м/с, продольная подача изменялась в диапазоне 0,7...4,3 м/мин, припуск на сторону зуба равнялся 0,1 мм. Удельная производительность по скорости съема материала составила 2,5...15 мм³/(мм·с). Контрольные измерения показали, что отклонение формы зубчатого профиля находится в пределах 3...4 мкм. Было выявлено, что повышение точности формы профиля можно достичь путем уменьшения базовой шероховатости рабочей поверхности круга. После правки с $a_d = 5$ мкм, $q_d = 0,4$ и $U_d = 8$ значение R_z составило 4,5 мкм. При этом отклонение формы профиля стало менее 3 мкм.

Проводились также исследования для получения зависимости параметров точности обработки от степени износа круга. Для этого осуществлялось шлифование с постоянной подачей 2,9 м/мин со скоростью 50 м/с. При черновой обработке припуск составил 0,09 мм на сторону зуба, при чистовой – 0,01 мм. По результатам измерения получено, что отклонение формы профиля в зависимости от стойкости шлифовального круга меняется от 3 мкм до 4,5 мкм, т.е. лежит в пределах 2-го и 4-го качества по DIN 3962. Для данного режима обработки при условии выполнения требований по точности, со-



Рис. 12.22. Профильное шлифование зубчатого колеса на станке модели КХ-1 фирмы Карр

ответствующих указанным квалитетам, стойкость круга ограничивается суммарной производительностью $9600 \text{ мм}^3/\text{мм}$ (объем металла, удаленный 1 мм высоты круга, за цикл обработки между правками).

Шлифовальные круги из КНБ марки АВN800 используются при обработке зубчатых колес с модулем от 1 до 5 мм из быстрорежущей стали марки S12-1-4 с твердостью 64...66 HRC по схеме обката с непрерывным делением со скоростью 63 м/с. При шлифовании кругом $300 \times 50 \times 160$ с размером абразивного зерна B64 и концентрацией 75% по указанной схеме обработки зафиксированы незначительные отклонения от заданной точности обрабатываемых колес.

Правка шлифовальных кругов из кубического нитрида бора, как уже отмечалось, представляет достаточно серьезную технологическую проблему, поэтому ведется постоянный поиск новых возможностей для повышения ее эффективности, в том числе за счет управления режимами правки.

Профилирование червячного круга из КНБ для обработки зубчатых колес методом непрерывного обката представляет особую трудность из-за сложности и точности формы режущей поверхности круга. В этом случае в качестве решения проблемы предлагается уменьшить соотношение скоростей круга и алмазного

ролика, чтобы повысить его правящую способность. Следствием таких условий правки становится снижение точности формируемого зубчатого профиля червячного круга.

Лабораторные исследования. В институте Fertigungstechnik Werkzeugmaschinen Ганновского университета были проведены исследования процесса профильного шлифования зубчатых колес правящимся высокопористым кругом из кубического нитрида бора.

Целью исследований было выявление технологических особенностей процесса и эксплуатационных свойств эльборового круга в условиях чистового профильного шлифования зубчатых колес.

Круг на металлическом корпусе специальной конструкции с размерами $200 \times 10/20 \times 127 \times 20$ имел характеристику ЛКВ30 125/100 CM2 12 K27. Для получения высокопористой структуры круга была использована композиция из различных по своим свойствам и размерам порообразователей и наполнителей, которые обеспечили оптимальное для условий зубошлифования сочетание открытой и закрытой пористости, необходимую прочность рабочего слоя и возможность его эффективной правки алмазным инструментом.

Шлифование косозубых цилиндрических зубчатых колес из стали 16MnCr6 после цементации и закалки на твердость 60 HRC производилось на зубошлифовальном станке с ЧПУ мод. КХ-1 фирмы Карр. Обрабатываемое колесо устанавливалось на оправке с горизонтальным консольным креплением (рис. 12.22).

Зубчатое колесо имело следующие характеристики: модуль 2 мм, число зубьев 37, ширина зубчатого венца 15 мм, углы профиля зуба и наклона зубьев 20° .

Колесо шлифовалось с охлаждением эмульсией с постоянной скоростью круга 35 м/с, со скоростью продольного перемещения круга относительно заготовки $200 \dots 4000 \text{ мм/мин}$, с удалением припуска

на обработку 0,1 мм (радиальная подача на врезание 0,29 мм) за один двойной ход.

Предварительное профилирование рабочей поверхности круга на эвольвенту с модулем 2 мм и промежуточные правки осуществлялись обтачивающим алмазным роликом типа NC7053 с помощью специального правочного устройства фирмы Dr. Kaiser Diamantwerkzeuge по программе от системы ЧПУ. Условия правки: величина правки 0,01 мм, коэффициент перекрытия 8 и отношение скоростей вращения алмазного ролика и эльборового круга 0,8 были постоянными во всех случаях обработки.

Таким образом, при постоянных условиях шлифования и правки изменялся только один параметр режима – скорость продольного перемещения круга относительно заготовки. За счет ее величины было обеспечено изменение удельной производительности шлифования Q_w – скорости съема металла, отнесенной к 1 мм ширины круга, в очень широком диапазоне, превышающем известные результаты применительно к шлифованию зубчатых колес: от 1 до 20 мм³/(мм·с).

Исследованные условия соответствуют производственной практике, когда стремятся припуск на обработку удалить за один проход за минимально возможное время с выполнением необходимых требований точности и качества обрабатываемого зубчатого колеса.

В процессе обработки с помощью установленного на станке динамометрического устройства фирмы Kistler Instrumente измерялись составляющие силы резания: P_x – осевая и P_y – нормальная. Для приема и обработки сигнала, поступающего от динамометрического устройства, использовался прибор "Charge Amplifier" типа 5011. Измерение эффективной мощности N на приводе главного движения станка производилось с помощью электронного ваттметра. После соответствующей обработки сигналы записывались на персональный компьютер. Измеренные сигналы были отфильтрованы с

частотой 1 Гц, отклонения сигналов усреднены. Для составляющих силы резания на печать выводилась разница между максимальным (процесс шлифования) и минимальным (холостой ход) значениями сигнала.

При обработке результатов экспериментов учитывалось также влияние давления струи смазочно-охлаждающей жидкости и холостого хода шпинделя.

В соответствии с принятой схемой шлифования косозубого зубчатого колеса (рис. 12.22) осевая составляющая P_x силы резания P направлена по оси оправки, а нормальная P_y – перпендикулярно ей по направлению к центру обрабатываемого колеса. Тангенциальная составляющая P_z по этой схеме действует вдоль образующей зуба в соответствии с движением продольной подачи круга, и ее значение связано с углом наклона зубьев β и осевой составляющей P_x соотношением:

$$P_z = \frac{P_x}{\cos \beta} = 1,064 P_x, \quad (12.11)$$

а силу резания можно определить по формуле

$$P = \sqrt{P_x^2 + P_y^2}. \quad (12.12)$$

Все указанные составляющие силы резания лежат в одной плоскости.

Составляющая P_z , ответственная за съем металла, по сути адекватна осевой составляющей P_x , которая аппаратурой фиксировалась в экспериментах по зубошлифованию. Наблюдаемые закономерности изменения P_x от условий обработки можно напрямую связывать с закономерностями изменения составляющей P_z силы резания, что подтверждается одинаковым характером изменения мощности шлифования N и соответствующей P_x .

Принципиальной особенностью данного исследования было стремление достичь максимальной производительности процесса по съему материала при схеме шлифования по всему периметру впадины между соседними зубьями.

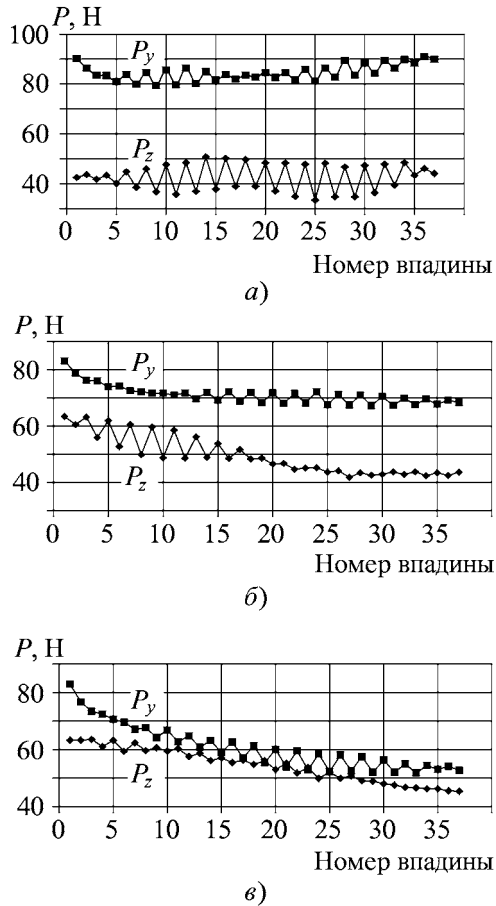


Рис. 12.23. Динамика изменения составляющих силы шлифования за цикл обработки зубчатого колеса эльборовым кругом с различной удельной производительностью:
 $a - 7,5 \text{ мм}^3/(\text{мм} \cdot \text{с})$; $б - 15 \text{ мм}^3/(\text{мм} \cdot \text{с})$;
 $в - 20 \text{ мм}^3/(\text{мм} \cdot \text{с})$

Такой вариант шлифования применительно к зубчатым колесам является крайне неблагоприятным из-за большой площади контакта круга с обрабатываемой поверхностью и недоступности зоны резания для охлаждения водными растворами. В результате даже на мягких режимах обработки высокопористыми абразивными кругами велик риск появления дефектов шлифовочного характера, особенно поверхностей после химико-термической обработки.

В существующих технологиях изготовления высокоточных зубчатых колес предусматриваются две операции шлифования: перед термической или химико-термической обработкой и после нее. Чтобы снизить риск появления прижогов и микротрещин на обрабатываемых поверхностях, применяют различные конструкции зубчатых колес по форме дна впадины [61]. Наиболее распространенным вариантом является подвнутрение основания зуба (выкружка). Выкружка формируется отдельной технологической операцией специальной червячной фрезой с протуберанцем.

Наличие выкружки уменьшает площадь обработки и способствует лучшему охлаждению зоны резания, но снижает изгибную прочность и сопротивление усталости зуба.

Поэтому, как правило, в процессе шлифования зубчатых колес обрабатываются только боковые поверхности зубьев. Например, в работе [104] проведено обстоятельное изучение процесса шлифования кругом из КНБ нормальной структуры прямозубой рейки с канавкой, имитирующей обработку зубчатого колеса с модулем 4 мм, имеющего подвнутрение ножки зуба.

Из-за отсутствия информации, полезной для планирования экспериментов, исследование проводилось с постепенной интенсификацией режима шлифования – увеличением продольной скорости $S_{пр}$. С ее повышением пропорционально возрастает удельная производительность

$$Q_w = \frac{t S_{пр}}{\sin \alpha}, \quad (12.13)$$

где t – глубина прохода, α – угол профиля зуба.

Последовательно увеличивая скорость продольной подачи от 200 до 4000 мм/мин, удалось достигнуть удельной производительности Q_w , равной $20 \text{ мм}^3/(\text{мм} \cdot \text{с})$. Дальнейшая интенсификация режима шлифования была признана

нецелесообразной из-за существенного изменения динамики протекания процесса.

На каждой исследованной подаче эльборовый круг правился однократно за весь цикл обработки зубчатого колеса. На протяжении цикла шлифования колеса фиксировались значения составляющих силы резания, динамика изменения которых для различных значений Q_w показана на рис. 12.23.

При обработке колеса с производительностью $Q_w = 7,5 \text{ мм}^3/(\text{мм} \cdot \text{с})$ средние значения составляющих P_z и P_y силы резания практически одинаковы за весь цикл шлифования, что свидетельствует о стабильном характере его протекания с сохранением тенденции к некоторым колебаниям от впадины к впадине. При увеличении удельной производительности до $15 \text{ мм}^3/(\text{мм} \cdot \text{с})$ намечается, а при $20 \text{ мм}^3/(\text{мм} \cdot \text{с})$ усиливается тенденция к снижению обеих составляющих силы резания за один оборот зубчатого колеса.

Если рассмотреть исследованные динамические характеристики процесса шлифования по их значениям, усредненным по зубчатому колесу, то оказывается, что их изменение в зависимости от Q_w тоже подчиняется определенной закономерности (рис. 12.24). До значения $Q_w = 12,5 \text{ мм}^3/(\text{мм} \cdot \text{с})$ нормальная составляющая P_y силы резания практически постоянна, а составляющая P_x (соответственно и P_z) вместе с мощностью N увеличиваются пропорционально увеличению удельной производительности. Затем значения составляющих силы резания и мощности заметно уменьшаются, несмотря на возрастание скорости съема материала.

Точность шлифованного зубчатого колеса контролировалась на измерительном приборе мод. РММ 866 фирмы Leits на боковых поверхностях 1, 12 и 27-го зубьев каждого колеса по отклонениям для угла профиля $f_{H\alpha}$ и формы профиля f_{fa} . Поля рассеяния и средние значения измеренных погрешностей показаны на рис. 12.25.

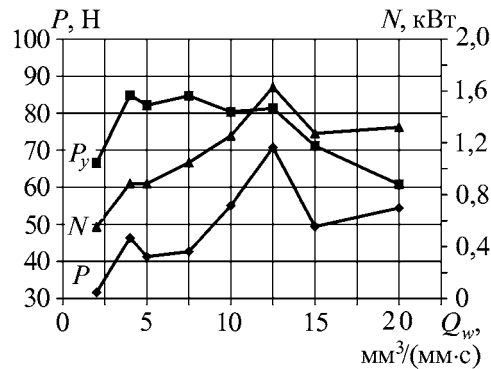


Рис. 12.24. Изменение динамических характеристик процесса профильного шлифования зубчатого колеса высокопокрытым эльборовым кругом в зависимости от удельной производительности

Отклонения от геометрической точности профиля с увеличением удельной производительности шлифования Q_w (рис. 12.26) возрастают так же, как и шероховатость обработанных поверхностей зубьев по параметрам R_z и R_a . Средняя высота микронеровностей R_z более чувствительна к условиям эльборового шлифования зубчатых колес, чем среднеквадратичное отклонение микронеровностей R_a : R_z в исследованном диапазоне условий шлифования увеличилось в 7 раз, а R_a – только на 18 %.

Несмотря на увеличение средней погрешности формы профиля зуба до $6,5 \dots 8,0 \text{ мкм}$ при $Q_w = 20 \text{ мм}^3/(\text{мм} \cdot \text{с})$, ее значение не превышает требований точности для данного типа косозубых цилиндрических колес. В целом измеренная погрешность точности зубьев во всем исследованном диапазоне продольных подач соответствовала степени IT4...IT7 по немецкому стандарту DIN 3962.

При изучении полученных результатов выявляется несоответствие кинетики изменения динамических характеристик процесса шлифования (см. рис. 12.24) закономерностям формирования точности и шероховатости шлифованных поверхностей (см. рис. 12.25 и 12.26). С одной стороны, при увеличении скорости съема

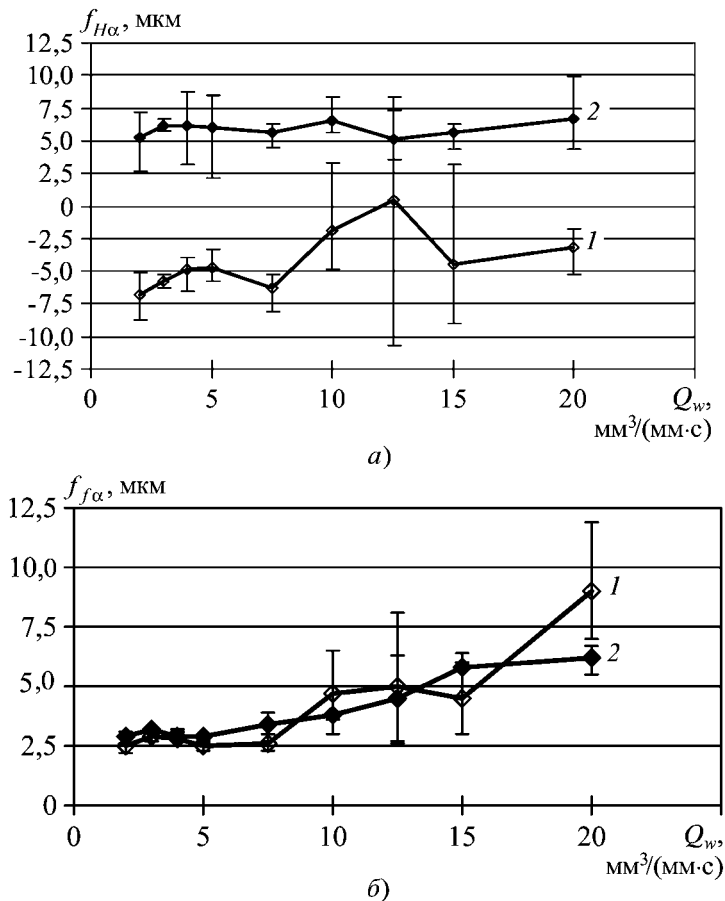


Рис. 12.25. Зависимость погрешностей угла (а) и формы зубчатого профиля (б) от удельной производительности процесса шлифования высокопористым эльборовым кругом:

1 – правая поверхность зуба; 2 – левая поверхность зуба

материала должно возрастать сопротивление резанию, но в реальных условиях шлифования, напротив, оно уменьшается. С другой стороны, все измеренные параметры точности угла и формы профиля, а также шероховатости поверхности обработанных зубьев имеют устойчивую тенденцию к увеличению с возрастанием Q_w при отсутствии корреляции с динамическими характеристиками процесса шлифования.

Поскольку поставленная в данном исследовании задача шлифования по все-

му периметру впадины между зубьями имеет большое значение для последующего внедрения в практику, то целесообразно выяснить причину вскрытой аномалии.

Если проанализировать связь условий шлифования с его результатами, то можно сделать вывод о том, что на закономерности динамики процесса, точности и качества обработки могло повлиять действие двух факторов.

К первому фактору можно отнести размерный износ шлифовального круга, величина которого, безусловно, должна

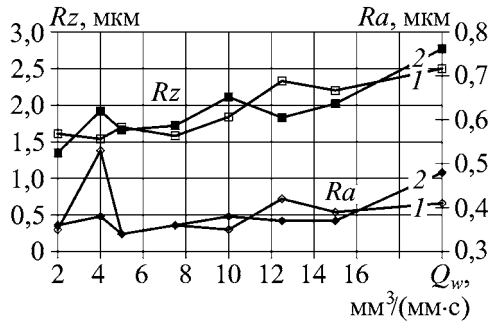


Рис. 12.26. Зависимость параметров шероховатости поверхности зубчатого профиля от удельной производительности процесса шлифования высокопористым эльборовым кругом

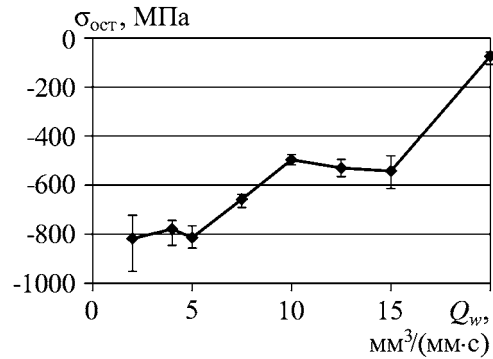


Рис. 12.27. Зависимость остаточных напряжений в поверхностном слое зубьев зубчатого колеса от удельной производительности профильного шлифования высокопористым эльборовым кругом

возрастать с увеличением его скорости продольного перемещения. При этом влияние износа должно проявиться в уменьшении фактической глубины резания и дополнительном искажении формируемого профиля зубьев. Обычно размерный износ проявляется в уменьшении точности обработки: его величина обуславливает увеличение погрешности предварительной настройки системы шлифовальный круг–зубчатое колесо на геометрию профиля зуба.

Второй фактор – это жесткость технологической системы резания (см. рис. 12.22). При консольном закреплении детали действие силы резания P вызывает ее отжатие δ , величина которого определяется модулем упругости E , моментом инерции поперечного сечения I и вылетом l оправки по формуле

$$\delta = \frac{Pl^3\mu}{3EI}, \quad (12.14)$$

где μ – динамический коэффициент, учитывающий неустойчивость нагружения.

В соответствии с формулой (12.14) отжатие увеличивается пропорционально действующей при шлифовании силе резания, которая, в свою очередь, возрастает

при увеличении скорости продольного перемещения круга $S_{\text{пр}}$.

Расчеты по (12.14) показывают, что для анализируемых условий шлифования с учетом действующих сил резания, величина статического отжатия δ не превышает 1 $\mu\text{м}$ и, следовательно, не может заметно повлиять на толщину удаляемого припуска. Этого и следовало ожидать, так как конструктивная жесткость станка не должна допускать отжатий, соизмеримых с допустимыми погрешностями на угол и профиля зуба при чистовом шлифовании.

Несмотря на динамическую податливость использованной схемы консольного горизонтального крепления в отличие от более жесткой вертикальной схемы закрепления зубчатого колеса в центрах, высокие режущие свойства эльборового круга не провоцируют упругих деформаций в системе резания, которые могли бы заметным образом уменьшить точность шлифованного профиля зубьев.

Другим возможным негативным проявлением консольного крепления зубчатого колеса являются благоприятные предпосылки для инициирования колебательного процесса – пульсирующая нагрузка и упругие перемещения детали от ее действия.

12.6. Стабильность динамических характеристик эльборового шлифования зубчатых колес

$Q_{\text{ш}}, \text{мм}^3/(\text{мм}\cdot\text{с})$	Колесо	N			P_x			P_y		
		$\bar{N}$, кВт	Рассеяние		$\bar{P}_x$, Н	Рассеяние		$\bar{P}_y$	Рассеяние	
			кВт	%		Н	%		Н	%
5	1	0,88	0,75...1,05	34,1	41,3	27,5...58,8	75,8	82,2	79,1...84,5	6,6
	15	1,18	1,04...1,29	21,2	49,4	43,1...65,1	44,5	111,4	106,2...114,2	7,2
15	1	1,27	1,09...1,56	37,0	49,4	41,8...63,4	49,4	71,1	67,9...82,6	20,7
	15	1,04	0,84...1,23	37,5	46,2	32,5...57,1	46,2	58,6	44,5...61,7	29,3

Чтобы сделать однозначный вывод о причинах отмеченного несоответствия динамики процесса его результатам по точности и качеству обработки, рассмотрим дополнительно статистические характеристики исследованных параметров.

В табл. 12.6 приведены результаты измерения мощности N , составляющих P_x и P_y силы резания при шлифовании зубчатого колеса на двух режимах, которые обеспечивают удельную производительность в 5 и 15 $\text{мм}^3/(\text{мм}\cdot\text{с})$. Статистические характеристики этих динамических параметров процесса показаны по результатам обработки 1-го и 15-го зубчатых колес. Они включают в себя среднее значение $\bar{N}$, $\bar{P}_x$ и $\bar{P}_y$, диапазон рассеяния в период шлифования одного колеса и степень рассеяния (%) как отношение диапазона изменения к средней величине. Каждый комплект из 15 зубчатых колес шлифовали на выбранном режиме после одной предварительной правки высокопористого эльборового круга алмазным роликом.

Процесс шлифования сопровождается изнашиванием шлифовального круга, интенсивность которого зависит от его характеристики и параметров режима обработки. При обработке эльборовыми кругами размерный износ их, как правило, настолько мал, что его не удастся зафик-

сировать в экспериментальных исследованиях. Наблюдаемые изменения выходных параметров процесса шлифования обусловлены чаще всего снижением режущей способности эльборовых кругов за счет притупления (изнашивания и микро-скалывания) зерен на рабочей поверхности.

Такой механизм изнашивания круга, по-видимому, имеет место при шлифовании с удельной производительностью 5 $\text{мм}^3/(\text{мм}\cdot\text{с})$. С увеличением объема удаленного металла после шлифования первого колеса, ориентировочно равного 624,9 мм^3 , до 9373,5 мм^3 (после обработки 15 зубчатых колес), средние значения мощности процесса и составляющих силы резания возросли от 20 до 35 % при заметной стабилизации динамики шлифования по степени рассеяния измеренных величин.

С форсированием режима шлифования до удельной производительности 15 $\text{мм}^3/(\text{мм}\cdot\text{с})$ возрастает сопротивление резанию и соответственно увеличиваются параметры его динамики. Но при увеличении количества обработанных зубчатых колес мощности и составляющие P_x и P_y силы резания уменьшаются на 7...22 %, что можно объяснить нарастанием размерного износа круга и, как следствие, уменьшением площади сечения металла,

**12.7. Стабильность формирования погрешности формы
зубчатого профиля при элборовом шлифовании**

$Q_w, \text{мм}^3/(\text{мм} \cdot \text{с})$	Колесо	Левая сторона зуба			Правая сторона зуба		
		$\bar{f}_{fa},$ мкм	Рассеяние		$\bar{f}_{fa},$ мкм	Рассеяние	
			мкм	%		мкм	%
5	1	2,9	2,8...3,0	6,9	2,5	2,3...2,7	16,0
	15	3,0	2,6...3,3	23,3	3,5	3,4...3,6	5,7
15	1	5,8	4,6...6,4	31,0	4,5	3,0...6,0	66,7
	15	4,2	2,6...5,3	64,3	3,6	2,7...5,1	66,7

удаляемого по профилю обрабатываемой поверхности впадины между соседними зубьями.

В табл. 12.7 и 12.8 представлены результаты измерения погрешности формы левой и правой сторон профиля зуба и шероховатости поверхностей зубчатых колес, динамика шлифования которых показана в табл. 12.6.

Сравнение данных табл. 12.7 и 12.6 показывает, что величина измеренной погрешности формы зубчатого профиля f_{fa} зависит от уровня приложенной нагрузки: чем большие значения мощности

и силы резания, тем больше погрешность формы зуба. Следовательно, размерный износ по боковым поверхностям шлифовального круга, который мог бы исказить погрешность формы зуба в сторону ее увеличения относительно настроечного размера, отсутствует.

По результатам измерения и оценки стабильности шероховатости обработанных поверхностей зубьев (см. табл. 12.8) можно также сделать вывод о том, что в обоих примерах шлифования изнашивание боковых поверхностей высокопористого элборового круга происходит в ре-

**12.8. Стабильность шероховатости обработанных поверхностей зубьев
после элборового шлифования**

$Q_w, \text{мм}^3/\text{мм} \cdot \text{с}$	Колесо	Ra			Rz		
		$\bar{Ra},$ мкм	Рассеяние		$\bar{Rz},$ мкм	Рассеяние	
			мкм	%		мкм	%
5	1	0,34	0,33...0,35	5,9	1,77	1,7...1,83	7,3
	15	0,33	0,32...0,34	6,1	1,73	1,7...1,75	2,9
15	1	0,39	0,38...0,4	5,1	2,2	2,1...2,4	13,6
	15	0,41	0,41...0,42	2,4	2,07	2,06...2,08	1,0

жиме затупления зерен КНБ, расположенных на его рабочей поверхности. В сравнении с обработанными поверхностями 1-го зубчатого колеса на боковых поверхностях 15-го колеса шероховатость по параметрам Ra и Rz и степень их рассеяния, как правило, меньше.

Данные табл. 12.7 и 12.8 также свидетельствуют о том, что вынужденные колебания системы резания, инициируемые пульсирующей нагрузкой, не оказывают значимого влияния на формирование точности и качества обработки.

Подводя итоги проведенного анализа условий шлифования, можно сделать вывод о том, что ни размерный износ высокопористого эльборового круга по боковым поверхностям, ни динамическая податливость использованной технологической схемы резания даже в условиях форсированной обработки не влияет на точность зубчатых колес и шероховатость их обработанных поверхностей.

Измерения погрешности точности формы профиля и шероховатости в данном исследовании производились только на боковых поверхностях обработанных зубьев, область основания (ножки) зуба по этим параметрам не изучалась. Поэтому причиной, которая привела к уменьшению нагрузки в зоне шлифования, могло стать изнашивание периферии круга. По расчетам, чтобы объяснить наблюдаемое в экспериментах уменьшение мощности и силы резания, размерный износ периферии рабочей поверхности эльборового круга должен составить 0,014 мм. Такая величина вполне реальна, учитывая неблагоприятные условия контактирования режущей поверхности круга, эквивалентной профилю впадины, с удаляемым припуском. При удельной производительности более 12,5 мм³/(мм·с) наиболее ослабленный участок шлифовального круга шириной 1,7 мм с радиусными участками подвергается возрастающим ударным нагрузкам в сочетании с высокочастотными колебаниями с расчетной амплитудой порядка 10⁻⁴ мм.

Были выполнены также измерения величины и знака остаточных напряжений на обработанной поверхности зуба в зависимости от условий шлифования. Остаточные напряжения определялись рентгенографическим методом на установке XRD3000P по методике, описанной в работе [106].

Из рис. 12.27, где представлены результаты измерений, следует, что увеличение удельной производительности шлифования сопровождается прогнозируемым снижением уровня наводимых остаточных напряжений. Такой характер изменения поверхностных напряжений обусловлен снижением интенсивности силового воздействия на обрабатываемую поверхность. Во всем исследованном диапазоне условий шлифования высокопористым эльборовым кругом на поверхностях зубьев наводились сжимающие напряжения, что является благоприятным фактором для эксплуатации зубчатых колес. Средний уровень поверхностных напряжений уменьшается от 810 до 90 МПа по мере увеличения скорости съема обрабатываемого материала.

Формирование сжимающих напряжений на обработанной поверхности является результатом преобладающего действия силового фактора. Для пластической деформации поверхностного слоя при шлифовании, если отсутствует его нагрев, необходимо зарождение в большом количестве новых дислокаций и их перемещение, что в итоге приводит к необратимому искажению кристаллической решетки. Чем больше действующее напряжение и время его действия, тем больше степень деформации и выше уровень наводимых остаточных напряжений.

Можно принять в качестве силового фактора произведение силы резания на время, в течение которого она действует на элементарный объем поверхностного слоя. Оказывается, что с увеличением Q_w от 2,0 до 20 мм³/(мм·с) произведение силы

резания на время ее действия уменьшаются с 0,181 до 0,02, или в 9,1 раз, что соответствует экспериментальным данным по снижению уровня остаточных напряжений.

В заключение можно отметить, что высокопористый эльборовый круг дает возможность обработать зубчатое колесо с модулем 2 мм после цементации и закалки по всему профилю впадины между зубьями, включая дно, с удалением припуска 0,1 мм за один проход с удельной производительностью до 20 мм³/(мм·с). Достигнутый уровень производительности на 50 % превышает известные результаты по эльборовому шлифованию зубчатых колес кругами нормальной структуры и для условий обработки только боковых поверхностей зубчатого колеса. Прижогов и микротрещин на обработанных поверхностях зубьев во всех случаях шлифования не наблюдалось.

Достоинством зубошлифования высокопористым эльборовым кругом является также формирование поверхностного слоя с остаточными напряжениями сжатия, что наряду с повышенной точностью и заданной шероховатостью обработанной поверхности гарантирует улучшение эксплуатационных свойств. Бездефектное изготовление зубчатых колес без их подвнутрения дает возможность также повысить прочность и сопротивление усталости зубчатых передач, исключить дополнительную операцию зубофрезерования для формирования выкружки и сократить номенклатуру применяемых червячных зуборезных фрез.

Производственные испытания проведены при профильном чистовом шлифовании цилиндрических зубчатых колес на профилешлифовальном станке мод. P600G фирмы Gleason-Pfauter.

Целью испытаний был анализ технологических возможностей эльборового инструмента в сравнении с используемыми на заводе на аналогичных операциях высокопористых кругов на основе электрокорунда белого.

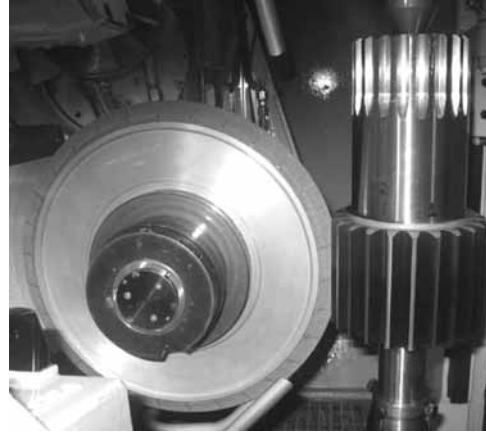


Рис. 12.28. Профильное шлифование высокопористым эльборовым кругом зубчатого колеса с $m = 6$ мм, $z = 23$, с шириной венца 110 мм на станке мод. P600G фирмы Gleason-Pfauter

Был разработан специальный рецептурный состав высокопористой абразивной массы со структурой 12 для характеристики круга ЛКВ 30 125/100 M2 12 K27, который был изготовлен в виде сегментной конструкции конического профиля с размерами 350×25×127×25 мм.

По своей характеристике – зернистости, твердости и номеру структуры – эльборовый круг представлял аналог высокопористого круга на основе электрокорунда белого, который используется для чистового бездефектного шлифования зубчатых колес на станке мод. P600G после химико-термической обработки.

Испытания проводились в два этапа. На первом этапе изучались условия профильного шлифования эльборовым кругом зубчатых колес после их цементации и азотирования по традиционной схеме чистового шлифования без обработки дна впадины (колеса имели подвнутрение ножек). На втором этапе шлифовалось цементованное зубчатое колесо с полным охватом контура впадины (рис. 12.28).

В ходе испытаний на первом этапе шлифовали прямозубые цилиндрические колеса из легированной стали марки

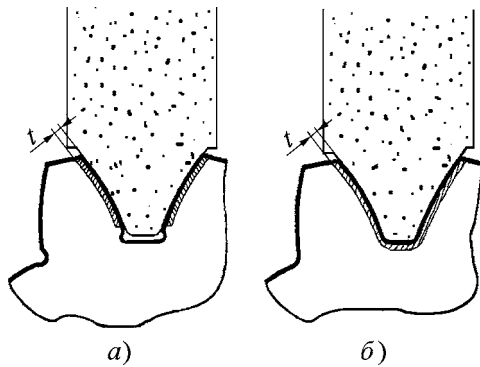


Рис. 12.29. Схема профильного шлифования зубчатых колес:
 а – с выкружкой; б – по всему профилю впадины

16ХНВФМБ-Ш после двух видов химико-термической обработки поверхностного слоя: зубчатое колесо с модулем $m = 3,5$ мм, числом зубьев $z = 22$ и шириной венца $b = 22$ мм с азотированной поверхностью и колесо с $m = 4$ мм, $z = 21$ и $b = 30$ мм после цементации и закалки. Обработка велась по встречной схеме шлифования с постоянной скоростью круга $v_{кр} = 30$ м/с. При шлифовании каждого зубчатого колеса было испытано по 5 вариантов различных комбинаций глубины врезания за проход t и скорости продольной подачи круга $S_{пр}$.

При каждом варианте обработки удалялся припуск, равный 0,2 мм, при шлифовании цементованного колеса, и 0,05 мм – при шлифовании зубчатого колеса после азотирования. Толщина удаленного слоя при испытаниях была значительно меньше толщины азотированного и цементованного слоев.

Профилирование рабочей поверхности круга на требуемый модуль зубчатого колеса и его периодическая правка между циклами обработки осуществлялась алмазным роликом типа NC80 производства фирмы Dr. Kaiser Diamantwerkzeuge с радиусом при вершине режущей кромки правящего алмаза $R = 1,0$ мм. Для обеспечения одинаковых начальных условий по состоянию рабочей поверхности шлифо-

вального круга его правка производилась перед началом обработки по каждому из испытанных вариантов с радиальной подачей ролика, равной 0,01 мм на сторону круга. При этом снимаемый объем эльбороносного слоя за цикл правки ориентировочно составлял 0,07...0,08 см³.

Расчет показал, что при шлифовании зубчатых колес с модулем 3,5...4 мм высокопористым эльборовым кругом с исходной высотой рабочего слоя 25 мм возможное число правок может составить 1600...1700 циклов. Для сравнения: правка высокопористых кругов из электрокорунда белого на керамической связке в аналогичных случаях обработки осуществляется с большей радиальной подачей, которая обычно составляет 0,05 мм на сторону, возможное число правок достигает 320...340 циклов (предельно – до 500 циклов).

Схема шлифования зубчатых колес высокопористым эльборовым кругом показана на рис. 12.29.

При зубошлифовании фиксировалась эффективная мощность N , в зависимости от параметров режима обработки, а также ее изменение в зависимости от времени шлифования зубчатого колеса. После обработки на зубоизмерительном центре мод. Р100 фирмы Klingelnberg измерялась геометрическая точность изготовления: по погрешности угла зацепления $f_{H\alpha}$ и накопленной погрешности шага F_p , а также шероховатость обработанных поверхностей зубьев по параметру Ra .

Для сравнительной оценки вариантов обработки рассчитывалось машинное время t и энергоемкость U шлифования зубчатого колеса по каждому из 5 предложенных вариантов удаления припуска.

Ввиду отсутствия рекомендаций по эльборовому профильному шлифованию цементованных и азотированных колес параметры режима обработки назначались с учетом опыта шлифования высокопористыми кругами на основе электрокорунда белого.

**12.9. Результаты шлифования высокопористым эльборовым кругом
зубчатого колеса $m = 3,5$ мм, $z = 22$ после цементации**

Вариант	Число проходов	Режим прохода		N , кВт	τ , с	U , кДж	Ra , мкм	F_p , мкм
		t , мм	$S_{пр}$, мм/мин					
1	1	0,2	300	2,51	96,8	243,0	0,32...0,37	1,1...6,8
2	2	0,1	600	2,18	96,8	211,0	0,34	1,1...1,9
3	2	0,15	400	2,37	87,1	206,2	0,36...0,37	0,2...1,2
		0,05	2000	2,35				
4	3	0,1	600	2,18	89,1	190,8	0,32...0,37	0,9...1,1
		0,08	1000	2,35				
		0,02	2500	1,47				
5	3	0,1	600	2,18	77,4	173,7	0,36	0,8...1,0
		0,05	2000	2,35				
		0,05	2000	2,35				

**12.10. Результаты шлифования высокопористым эльборовым кругом
зубчатого колеса $m = 4$ мм, $z = 21$ после азотирования**

Вариант	Число проходов	Режим прохода		N , кВт	τ , с	U , кДж	Ra , мкм	f_{Ha} , мкм	F_p , мкм
		t , мм	$S_{пр}$, мм/мин						
1	1	0,05	1000	2,22	37,8	83,9	0,28...0,30	4,0...5,5	0,5...2,1
2	1	0,05	2000	3,18	18,9	60,1	0,29...0,34	4,9...8,1	1,5...5,3
3	2	0,025	2500	2,29	30,2	69,2	0,32...0,33	2,1...3,2	0,9...1,2
4	3	0,02	2500	1,98	45,4	79,0	0,32...0,33	1,6...2,5	0,5...0,9
		0,02	2500	1,98					
		0,01	2500	1,27					
5	5	0,01	3500	1,52	54,0	82,1	0,32...0,35	2,2...3,2	0,3...2,1

Результаты шлифования, включая исследованные варианты удаления припуска за 1–5 проходов и параметры режима обработки, приведены в табл. 12.9 и 12.10.

Конструктивные параметры обработанных зубчатых колес практически близки друг другу. Расчетная скорость съема металла, учитывающая модуль зуба, например, при одинаковых параметрах режима обработки $t = 0,05$ мм и $S_{пр} = 2000$ мм/мин равна 27,94 и 31,93 мм³/с соответственно для зубчатого колеса после азотирования ($m = 3,5$ мм) и цементации ($m = 4$ мм).

Конструктивный фактор явился одной из причин повышения мощности эльборового шлифования азотированных колес. Но основная причина увеличения мощности в 1,2...1,4 раза в сравнении с обработкой цементованных поверхностей заключается в физико-механических и химических свойствах (прежде всего, повышенной твердости) азотированного слоя. Этим же объясняется и некоторое снижение – до 15 % – средней высоты микронеровностей на обработанных поверхностях и точности обработки азотированных зубчатых колес.

Подача на глубину t оказывает более сильное влияние на мощность шлифования, чем продольная подача круга $S_{пр}$. При $tS_{пр} = 60$ мм³/мин, мощность N на 15 % больше в случае, когда глубина резания больше (табл. 12.9, варианты 1 и 2). Соответственно меньше затраты энергии U на удаление припуска при постоянном времени обработки зубчатого колеса.

В этой связи большое значение приобретает процедура оптимальной разбивки припуска по переходам. Анализ возможных вариантов такой разбивки показал, что для эльборового круга исследованной характеристики наиболее предпочтительной является глубина резания не более 0,05...0,1 мм на проход при величине $tS_{пр} = 60...100$ мм²/мин.

Оптимальное сочетание значений t и $S_{пр}$ обеспечивают вариант 5 (см. табл.

12.9) и вариант 2 (см. табл. 12.10) соответственно для шлифования цементованных и азотированных зубчатых колес. Оба варианта требуют минимальных энергетических и временных затрат.

Важной особенностью эльборового шлифования зубчатых колес является слабая зависимость шероховатости обработанной поверхности от параметров режима обработки. В достаточно широком диапазоне изменения глубины t и продольной подачи $S_{пр}$ при шлифовании зубчатых колес среднее значение Ra после цементации изменялось в пределах 7 %, а после азотирования – в пределах 14 %. Все значения Ra находились, в основном, в пределах от 0,28 до 0,37 мкм.

Характеристика высокопористого эльборового круга определяет не только шероховатость обработанной поверхности, но и точность обработки. Высокая работоспособность инструмента и, прежде всего, повышенная его износостойкость способствует в полной мере реализации точностных возможностей зубошлифовального станка.

Во всех случаях обработки на рабочих поверхностях зубьев не обнаружено прижогов (определялись травлением) и микротрещин (магнитопорошковым контролем на конденсаторно-импульсном дефектоскопе).

На втором этапе испытаний определялись возможность обработки профиля впадины между двумя соседними зубьями по всему контуру и параметры режима максимально возможной производительности бездефектного шлифования.

Для испытаний было выбрано зубчатое колесо с конструктивными характеристиками: $m = 6$ мм, $z = 23$, с шириной венца 110 мм из стали 14ХГСН2МА, цементованной и заклеенной на твердость 62...64 HRC. Форма дна впадины соответствовала ГОСТ 13754–81 с переходными радиусными зонами от боковой поверхности ко дну впадины. При шлифовании такой формы дна наибольшие нагрузки испытывают радиусные кромки шли-

фовального круга, что приводит к быстрому снижению его размерной стойкости. Помимо потери геометрии профиля и точности зубьев, процесс шлифования, как правило, сопровождается прижогами и микротрещинами на обработанных поверхностях.

Кроме отмеченной особенности профилирования дна впадины, выбранное зубчатое колесо имело достаточно большой модуль и большую ширину венца. Это создавало дополнительные трудности из-за увеличения площади контакта и времени взаимодействия круга с поверхностью впадины между зубьями и соответственно термодинамической напряженности резания.

Во всех исследованных вариантах обработки припуск 0,2 мм удаляется по всему периметру впадины за один двойной ход круга относительно заготовки при скорости резания 35 м/с. Профилирование круга на модуль 6 мм и последующие правки осуществлялись так же, как и ранее, алмазным обкатным роликом типа NC80 с $R = 0,1$ мм. Радиальная подача круга ролика составляла 0,01 мм на сторону круга с коэффициентом перекрытия $U_d = 8$.

Первая попытка удалить припуск за один проход круга с продольной подачей 2500 мм/мин окончилась неудачей из-за автоматического отключения станка вследствие перегрузки. Повторная попытка снять припуск за двойной ход (по 0,1 мм за каждый ход круга "вниз-вверх") с продольной подачей 3000 мм/мин также не удалась из-за остановки станка. В обоих случаях мощность на шпинделе превысила 80 % допустимой нагрузки, на поверхностях зубьев видны были явные следы прижогов.

Таким образом, были установлены недопустимые граничные условия обработки цементованного зубчатого колеса с $m = 6$ мм эльборовым высокопористым кругом с характеристикой ЛКВ 160/125 M2 12 K. На основании этих данных были предложены и испытаны два режима эль-

борового шлифования, которые обеспечили выполнение поставленной задачи.

Припуск на обработку, равный 0,2 мм по всему периметру профиля впадины между соседними зубьями, удалялся за один двойной ход круга. По первому варианту при постоянной продольной подаче 1250 мм/мин черновая подача на глубину составила 0,15 мм, при чистовом обратном проходе – 0,05 мм. При втором варианте на черновом проходе металл толщиной 0,16 мм удалялся тоже при скорости 1250 мм/мин, а на чистовом проходе с глубиной 0,04 мм – при скорости в 2 раза большей. Обработке зубчатого колеса по каждому из этих вариантов предшествовала только одна правка.

Результаты шлифования представлены в табл. 12.11.

Для сравнения приведены также расчетные значения скорости съема металла F_c с учетом конфигурации обрабатываемого профиля, которая определялась по формуле

$$F_c = 5,63 m t S_{np}. \quad (12.15)$$

При обработке по второму варианту удельная производительность чернового хода составила 9,8 мм³/(мм·с), а на чистовом обратном ходе – 4,9 мм³/(мм·с). Эти значения, однако, не являются показательными для шлифования зубчатых колес с относительно большими модулями. В нашем примере для колеса с $m = 6$ мм максимальная скорость съема металла по всему контуру впадины составила 112,6 мм³/с, а в случае обработки зубчатого колеса с $m = 2$ мм с удельной производительностью 20 мм³/(мм·с) аналогичная скорость съема была в 1,5 раза меньше – 75,07 мм³/с.

На рис. 12.30 показана также динамика изменения мощности шлифования по каждому проходу двух вариантов обработки. Можно отметить, что процесс съема материала протекал стабильно: максимальный размах значения N во время обработки составил на черновых проходах до 8,3 % по первому варианту и до

12.11. Результаты профильного шлифования зубчатого колеса $m = 6$ мм, $z = 23$ после цементации

Вариант	Режим прохода		N , кВт	F_c , мм ³ /с	τ , с	U , кДж	Ra , мкм	f_{Ha} , мкм	F_p , мкм
	t , мм	$S_{пр}$, мм/мин							
1	0,15	1250	6,37	105,56	4,05	115,6	0,34...0,36	1,7...2,8	2,3...6,0
	0,05	1250	3,16	35,19					
2	0,16	1250	6,72	112,6	3,04	106	0,40...0,43	2,0...2,6	2,8...5,9
	0,04	2500	4,02	56,3					

4,9 % по второму варианту. На чистовых проходах второй вариант тоже оказался ближе к условию стационарности процесса – до 4,5 % в отличие от 5,3 % при первом варианте обработки.

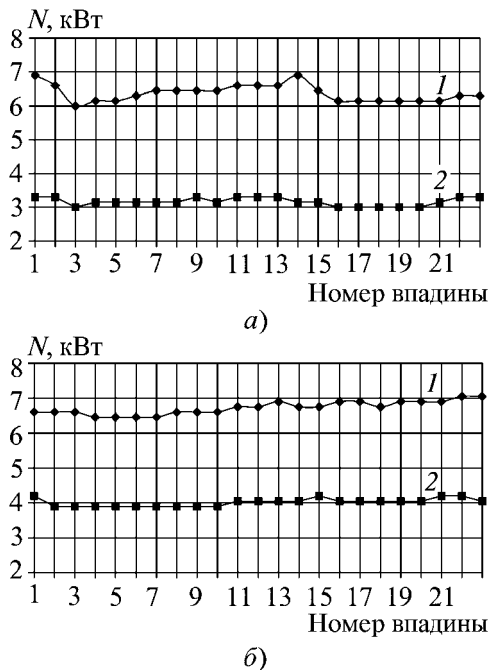


Рис. 12.30. Динамика изменения мощности шлифования по двум вариантам обработки зубчатого колеса с $m = 6$ мм, $z = 23$:

a – черновой проход с $t = 0,15$ мм (1), чистовой проход с $t = 0,05$ мм (2); *б* – черновой проход с $t = 0,16$ мм (1), чистовой проход с $t = 0,04$ мм (2)

Стабильность динамического нагружения зубьев в процессе шлифования в сочетании с повышенной размерной стойкостью круга стала определяющим фактором достижения высокой точности обработанных зубчатых колес.

Данные табл. 12.11 также свидетельствуют о преимуществах второго варианта обработки: при более высокой скорости съема металла (F_c) машинное и фактическое время шлифования колеса уменьшилось на 30 %, а энергоемкость процесса – на 9 %. Показатели шероховатости обработанной поверхности и точности профиля зуба были значительно лучше, чем требования чертежа. Например, накопленная погрешность шага не должна превышать 0,036 мм, а при шлифовании эльборовым кругом получено только 6 мкм.

Тщательным контролем прижогов и микротрещин на всех обработанных колесах не зафиксировано.

Аналогичные результаты высокопористым абразивным кругом с характеристикой 25A 16 M2 12 K достигаются на значительно более мягком режиме профильного шлифования: припуск разбивается на 4 прохода, а промежуточная правка круга для восстановления его режущей способности осуществляется после обработки 3...5 зубьев. Фактическое время шлифования при этом почти в 8 раз больше, чем при обработке эльборовым кругом.

Профильное шлифование зубчатых колес, как правило, сопровождается промежуточными правками круга для восстановления его режущей способности. Количество правок зависит от многих факторов: модуля колеса, его химико-термической обработки, режима шлифования, условий правки и т.д.

Время шлифования зубчатого колеса с числом зубьев z и длиной обработки L за один проход равно:

$$\tau = z \frac{L}{S_{\text{пр}}} + \frac{z}{z_{\text{ц}}} \tau_{\text{пр}}, \quad (12.16)$$

где $z_{\text{ц}}$ – количество зубьев, обработанных за один цикл правки, $\tau_{\text{пр}}$ – время промежуточной правки.

При обработке зубчатого колеса за K проходов круга время шлифования возрастает:

$$\tau = Kz \sum_{i=1}^K \left(\frac{B+l}{S_{\text{пр}i}} + \frac{\tau_{\text{пр}}}{z_{\text{ц}}} \right). \quad (12.17)$$

В формуле (12.17) средняя продольная подача $S_{\text{пр}i}$ соответствует i -му проходу для глубины t_i , а число проходов зависит от размера припуска Δ :

$$K = \frac{\Delta}{\sum_{i=1}^n t_i}.$$

Несмотря на мягкий режим шлифования и большое количество промежуточных правок круга при обработке электрокорундовым инструментом, сохраняется риск появления на обработанных поверхностях зубьев дефектов шлифовочного характера из-за повышенной чувствительности процесса к качеству химико-термической обработки.

Для определения потенциальных возможностей высокопористого эльборового круга с характеристикой ЛКВ 125/100 М2 12 К были проведены дополнительные испытания на высоких скоростях продольного перемещения $S_{\text{пр}}$.

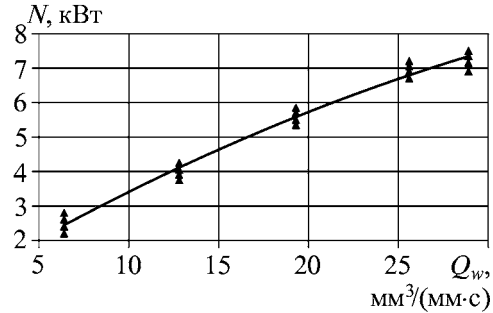


Рис. 12.31. Зависимость мощности профильного шлифования зубчатого колеса от удельной производительности

Обрабатывались шестерни с $m = 4$ мм, $z = 21$, $b = 30$ мм и $\alpha = 25^\circ$ из стали марки 16ХЗНВФМБ-Ш после цементации и закалки на твердость 60 HRC. Профилирование рабочей поверхности круга и периодическая его правка при шлифовании проводились так же, как и в предыдущих случаях, алмазным обкатывающим роликом типа NC80 производства фирмы Dr. Kaiser Diamantwerkzeuge, но с меньшим радиусом округления режущей части ролика – $R = 0,5$ мм.

При правке глубина врезания ролика составила 0,01 мм со скоростью перемещения 60 мм/мин относительно рабочей поверхности круга при соотношении окружных скоростей вращения, равном 0,8.

При постоянной скорости круга 30 м/с и его радиальной подаче на врезание 0,385 мм припуск на чистовое шлифование удалялся за один проход инструмента при изменении продольной подачи $S_{\text{пр}}$ от 1000 до 4500 мм/мин.

При профильном шлифовании впадины зуба по схеме попутной обработки в данном случае дно впадины не обрабатывалось. Результаты измерения зависимости мощности шлифования от удельной производительности обработки Q_w , в диапазоне от 6,4 до 28,9 мм³/(мм·с), рассчитанной по формуле (12.13), показан на рис. 12.31.

По потребляемой мощности процесс на всех режимах протекал стабильно с

колебанием показаний N в пределах 2... 5 %. Точность обработки зубьев (обрабатывались 4 зуба на каждом режиме) соответствовала требованиям чертежа и заданной настройке станка.

Шероховатость обработанных поверхностей зубьев по Ra незначительно увеличилась с повышением скорости $S_{пр}$: от 0,59...0,6 мкм при $S_{пр} = 1000$ мм/мин до 0,6...0,67 мкм при $S_{пр} = 4500$ мм/мин. В аналогичном примере шлифования эльборовым кругом (см. табл. 12.9) достигнутая шероховатость обработанных поверхностей зубьев по параметру Ra была почти в 2 раза меньше. Указанное расхождение можно объяснить изменением радиуса режущей поверхности правящего ролика. При уменьшении R с 1,0 до 0,5 мм шероховатость обработанной поверхности зубьев после правки эльборового круга повышается. Очевидно, что для правки высокопористых эльборовых кругов целесообразно применять правящие обкатывающие ролики с радиусом режущей части не менее 1 мм.

Контрольные испытания эльборового высокопористого круга были выполнены при обработке цементованных зубчатых колес с $m = 4$ мм, $z = 21$, $b = 30$ мм, $\alpha = 25^\circ$: при $S_{пр} = 2000$ мм/мин и $Q_w = 25,6$ мм³/(мм·с). Каждое колесо на постоянном режиме обрабатывалось после одной правки.

После профильного шлифования на обоих режимах качество и точность обработанных зубчатых колес удовлетворяло необходимым требованиям.

В технологическом отношении исследованный эльборовый круг 12-й структуры показал очень хорошие результаты по скорости съема материала, точности и качеству обработки. Чтобы установить, насколько он эффективен с экономической точки зрения, необходимо также учитывать временные затраты на операцию зубошлифования.

Время обработки зубчатого колеса складывается из двух составляющих: времени правки круга, отнесенного к одной

детали, и времени шлифования. С учетом формул (12.16; 12.17), можно записать

$$\tau = \frac{\tau_{пр}}{z_{ц}} + z_{ц} \left(\frac{L}{S_{пр}} + \frac{L}{S_x} \right), \quad (12.18)$$

где учтены значения скоростей рабочего $S_{пр}$ и холостого S_x ходов шлифовального круга.

Увеличение скорости съема материала при увеличении $S_{пр}$ лишь частично решает проблему снижения трудоемкости операции шлифования. Из анализа (12.18) следуют очевидные рекомендации: чтобы уменьшить время шлифования одного зубчатого колеса, необходимо также увеличить число деталей (зубьев), обработанных за один период стойкости и выполнять условие $S_x \geq S_{пр}$.

Для последнего примера шлифования зубчатого колеса $m = 4$ мм, $z = 21$, $b = 30$ мм время правки эльборового круга по стандартной программе станка составило 1,25 мин. Расчет показывает, что если это время правки отнести к одной детали, то при увеличении $S_{пр}$ с 2000 до 4000 мм/мин, или в 2 раза, время шлифования по (12.18) при $S_{пр} = S_x$ сокращается только на 25 %. Если стойкость круга обеспечит обработку без промежуточных правок 20 зубчатых колес, то суммарное время шлифования уменьшается почти в 1,9 раз.

По результатам проведенных производственных испытаний можно сделать следующее заключение.

Высокопористый эльборовый круг с характеристикой ЛКВ 125/100 М2 12 К показал высокие режущие свойства и обеспечил бездефектное профильное шлифование цементированных и азотированных зубчатых колес с модулем 3,5... 6 мм. Благодаря его применению удалось обработать с очень высокой удельной производительностью – до 28,9 мм³/(мм·с) – и точно при отсутствии прижогов и трещин зубчатые колеса по всему периметру впадины между соседними зубьями.

При использовании высокопористого эльборового круга машинное время чистового шлифования зубчатых колес уменьшается до 8 раз, а стойкость круга увеличивается до 15 раз в сравнении с аналогом из электрокорунда белого.

Эффективность эльборового шлифования этими показателями не ограничивается. Бездефектное изготовление зубчатых колес без их подвнутрени дает возможность повысить прочность и выносливость зубчатых передач, исключить дополнительную операцию зубофрезерования для формирования выкружки и сократить номенклатуру червячных фрез.

12.6. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ВЫСОКОПОРИСТЫХ ЭЛЬБОРОВЫХ И КОРУНДОВЫХ КРУГОВ ПРИ ПРОФИЛЬНОМ ЗУБОШЛИФОВАНИИ

Микрокристаллический корунд, изготовленный по SG-технологии, в 20 раз дороже электрокорунда белого, а стоимость кубического нитрида бора почти в три тысячи раз превышает стоимость абразивных зерен из микрокристаллического корунда. Наиболее распространенная область использования всех этих абразивных материалов одна и та же – шлифование сталей. Возникает вопрос: какие должны быть условия шлифования, чтобы повышенные расходы на инструмент из микрокристаллического корунда и особенно из эльбора были технологически и экономически оправданы.

Трудно ожидать, что и подтверждается на практике, чтобы стойкость эльборовых шлифовальных кругов при обработке сталей была на три порядка выше, чем у корундового инструмента.

Для снижения стоимости шлифовальные круги на основе эльбора и микрокристаллического корунда изготавливаются с содержанием зерна до 25 % объема инструмента, но цена на них остается высокой. Опыт применения этих кругов показал, что их стоимость коррелирована с

их эксплуатационными свойствами. Более низкая стоимость инструмента из микрокристаллического корунда в сравнении с эльбором и лучшие режущие свойства в сравнении с зерном электрокорунда белого дают основание предположить, что шлифовальные круги на основе микрокристаллического корунда при определенных условиях могут стать альтернативой эльборовым кругам.

В работе [127] выполнен сравнительный анализ шлифовальных кругов из различных абразивов из электрокорунда белого с характеристикой A80 Z8 B, микрокристаллического корунда (синтеркорунда) – SG 80 UB и кубического нитрида бора – B181 C100 V и B213 C100 B. Испытания проводились для проверки эффективности шлифования с охлаждением маслом и маслом вместе с присадкой, в составе которой находилась сера. Оказалось, что состав смазочно-охлаждающей жидкости влияет не только на показатели процесса шлифования указанными кругами, но и на возможность вообще шлифовать кругом определенной характеристики.

Условия плоского шлифования стали S6-5-2 (60 HRC) были достаточно напряженными: скорость круга 80 м/с, глубина резания 2 мм и продольная скорость стола 1,5 м/мин, что в совокупности обеспечило очень высокую производительность $Q_w = 50 \text{ мм}^3/(\text{мм} \cdot \text{с})$.

При этих режимах шлифования с охлаждением маслом кругом из кубического нитрида бора на керамической связке с характеристикой B181 C100 V возникли большие усилия – 374 Н/мм и слой КНБ разрушился. Остальные круги на бакелитовой связке обеспечили съем материала при охлаждении маслом.

При охлаждении маслом с сернистой присадкой круги из КНБ и электрокорунда на бакелитовой связке улучшили показатели процесса шлифования на 14... 20 %, а при обработке кругом из микрокристаллического корунда показатели процесса сохранились на прежнем уровне.

12.12. Показатели шлифования кругами из различных абразивов

Характеристика круга	Составляющие силы резания, Н/мм		Износ круга, мкм	Ra, мкм
	P_z	P_y		
A80 Z 8 B	40	130	42	0,3
SG 80 UB	40	110	31	0,35
B213 C100 B	37	112	52	0,4
B181 C100 V	25	70	60	0,6

Наиболее важный результат, однако, заключается в сравнении режущих свойств всех испытанных кругов из трех различных абразивов в одинаковых высокопроизводительных условиях шлифования.

В табл. 12.12 приведены значения тангенциальной P_z и нормальной P_y составляющих силы резания, радиального износа и шероховатости обработанной поверхности по Ra , которые получены пересчетом из графиков, приведенных в работе [127], при шлифовании после предварительного удаления $2,5 \cdot 10^4 \text{ мм}^3/\text{мм}$ материала.

Рассматривая представленные результаты, невозможно выделить характеристику шлифовального круга, которая имела бы неоспоримые преимущества одновременно в динамике процесса, изнашивании инструмента и качестве обработки. Это – удивительное заключение, учитывая огромную разницу в стоимости использованных в кругах абразивных материалов.

Проанализировав весь экспериментальный материал, представленный в работе [127], можно сделать вывод, что для каждого из абразивных материалов – корунда, SG и кубического нитрида бора – должна быть определена своя рациональная область использования. Эта область зависит от режущих свойств абразива во взаимосвязи с характеристикой шлифовального круга (зернистость, твердость, структура, связка) и условиями обработки

(правка, режим шлифования, состав охлаждения).

Ниже приведены результаты собственных лабораторных исследований и производственных испытаний высокопористых кругов на керамической связке, изготовленных на основе электрокорунда белого, микрокристаллического корунда и эльбора с целью установления рациональных областей их применения.

Лабораторные исследования. Для прямого сопоставления режущих свойств эльбора марки ЛКВ, микрокристаллического корунда SG/25A и электрокорунда белого марки 25A на их основе были изготовлены высокопористые круги прямого профиля с размерами $70 \times 12 \times 20 \times 10$. Все круги имели 12-ю структуру, один и тот же состав керамической связки и обжигались при одинаковом температурном режиме. Количество абразивных зерен определялось в соответствии с принятыми составами для конкретных абразивных материалов.

Расчетные характеристики кругов составили: ЛКВ 160/125 C1 12 K, SG80/25A C1 12 K и 25A 12 C1 12 K с близкой зернистостью абразива и одинаковой твердостью.

Все круги также в одинаковых технологических условиях были испытаны при плоском шлифовании стали марки 100Cr6 с твердостью 60 HRC на станке типа "Helitronic Power" фирмы Walter. В качестве охлаждения зоны резания использовалось масло Shell Macron 2429S-8.

**12.13. Износ круга и шероховатость обработанной поверхности
после маятникового шлифования инструментом различных характеристик**

Характеристика круга	Износ круга, мкм	Параметр шероховатости, мкм	
		Ra	Rz
ЛКВ 160/125 C1 12 K	2	0,31	2,31
SG 80/25A 12 C1 12 K	2	0,40	3,28
25A 12 C1 12 K	6	0,55	3,79

Исследованные шлифовальные круги правились обтачивающим алмазным роликом типа NC с радиусом $R = 0,19$ мм производства фирмы Dr. Kaiser Diamantwerkzeuge перед сменой условий шлифования. Режим правки был принят постоянным со следующими параметрами: отношение скоростей алмазного ролика и круга $q = 0,9$ (попутная правка); коэффициент перекрытия $U_d = 4$; глубина правки за проход ролика $a_d = 0,003$ мм; число проходов $N_d = 25$.

Каждая серия испытаний по выбранной схеме шлифования состояла из нескольких повторяющихся циклов: 5 циклов для маятникового шлифования с удельным съемом металла по $V'_w = 100$ мм³/мм за цикл и 3 цикла для глубинного шлифования с $V'_w = 150$ мм³/мм за цикл. Суммарный удельный объем металла, отнесенный к высоте круга и сошлифованный при маятниковой схеме, составлял 500 мм³/мм, а при глубинной – 450 мм³/мм.

В ходе обработки на станке измерялись нормальная (P_y) и тангенциальная (P_z) составляющие силы шлифования, а после шлифования – шероховатость обработанной поверхности и радиальный износ круга. Для измерения составляющих силы шлифования использовалось встроенное динамометрическое устройство фирмы Kistler Instrumente. Шероховатость обработанной поверхности заготовки контролировалась прибором серии MarSurf мод. PGK 120 фирмы Mahr. Износ шлифовальных кругов после обработки опре-

делялся копированием профиля круга на тонкую металлическую пластинку с последующим сканированием профиля при помощи профилометра серии MarSurf мод. PCV 200.

При попутной схеме маятникового шлифования испытания проводились со скоростью круга 30 м/с с размерами обрабатываемой поверхности образца 6×150 мм, глубиной резания 0,01 мм и скоростью стола 6000 мм/мин. Производительность по съему материала составила $Q_w = 1$ мм³/(мм·с).

Результаты измерения нормальной P_y , тангенциальной P_z составляющих и их отношения P_z/P_y в зависимости от объема удаленного металла (соответственно времени шлифования) показана на рис. 12.32. Значения P_y и P_z для эльборового круга и круга из микрокристаллического корунда практически близки друг к другу с разницей 14...15 % их средних величин, а для круга из электрокорунда белого средние значения этих составляющих силы резания оказались в 2,2...2,3 раза больше, чем при шлифовании эльборовым кругом. Характер изменения отношения P_z/P_y менее стабилен по времени обработки для всех трех исследованных кругов, но среднее значение P_z/P_y для электрокорундового круга меньше, чем для кругов других характеристик.

Результаты измерения размерного износа инструмента ΔI и шероховатости обработанной поверхности образца после удаления 500 мм³/мм металла приведены в табл. 12.13.

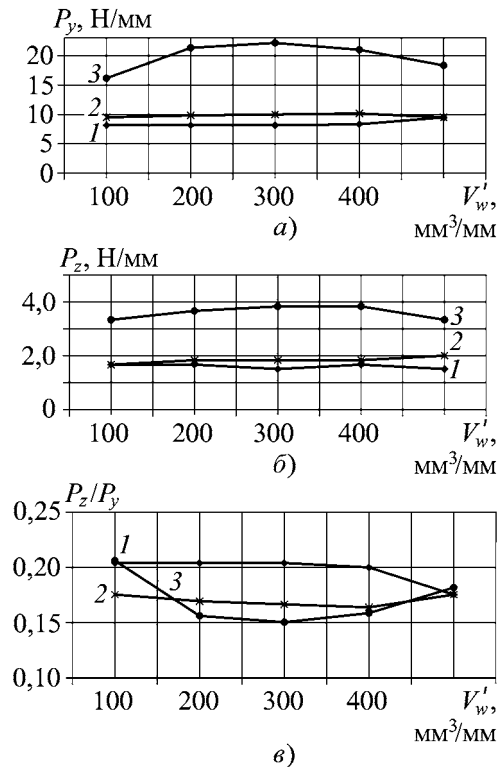


Рис. 12.32. Зависимости нормальной (а), тангенциальной (б) составляющих силы маятникового шлифования их отношения (в) от удельного съема материала высокопористыми кругами: 1 – ЛКВ 160/125 C1 12 K2; 2 – SG80/25A12 C1 12 K2; 3 – 25A 12 C1 12 K2

В условиях маятникового шлифования высокопористые круги из эльбора и смеси зерен SG/25A показали примерно одинаковые результаты по динамике процесса и размерному износу инструмента. Шероховатость поверхности, обработанной эльборовым кругом, оказалась лучше, чем после шлифования кругом из микрокристаллического корунда.

Несмотря на то, что зернистость 12 электрокорундового круга более соответствует условиям чистового шлифования, чем зернистость 16 инструмента из других абразивов, при его применении была получена большая высота микронеровностей на шлифованной поверхности. Раз-

мерный износ высокопористого круга из электрокорунда белого был в 3 раза больше.

Во всех случаях маятникового шлифования различными кругами прижогов и других дефектов не наблюдалось.

При схеме глубинного шлифования глубина резания была увеличена до 0,5 мм, а скорость стола уменьшена до 6 мм/мин. С такой комбинацией параметров режима обработки производительность по съему материала составила 0,5 $\text{mm}^3/(\text{mm} \cdot \text{с})$, или в 2 раза меньше, чем при маятниковом шлифовании.

Изменились условия обработки и соответственно реакция инструментов. Высокопористые круги из электрокорунда белого и микрокристаллического корунда исследованных характеристик оказались непригодны для принятых условий глубинного шлифования. Нормальная составляющая силы резания этими кругами возросла почти в 3 раза, а тангенциальная составляющая – до 2,5...3,2 раз (для круга из зерна 25A больше), в сравнении с обработкой эльборовым кругом. Эльборовый круг имел размерный износ после удаления 450 mm^3/mm металла в 4...4,5 раз меньше, чем корундовые круги после удаления 150 mm^3/mm . При обработке этими кругами сразу же появлялся прижог на шлифуемой поверхности и дальнейшие испытания не имели смысла.

В процессе глубинного шлифования высокопористым эльборовым кругом зафиксированы стабильные значения P_z – 1,3 Н и небольшое увеличение составляющей P_y – от 28 до 30 Н. Улучшилась шероховатость обработанной поверхности: по Ra с 0,31 до 0,23 мкм, а по Rz – с 2,31 до 1,83 мкм.

Производственные испытания кругов из различных абразивных материалов проводились при профильном шлифовании зубчатых колес на профилешлифовальном станке мод. Р600G.

Было изготовлено 4 шлифовальных круга прямого профиля с размерами 100×20×51 – корундовые круги с характе-

12.14. Параметры режима профилирования шлифовальных кругов алмазным роликом

Характеристика круга	Скорость круга, м/с	Глубина правки, мм	Время правки, мин
ЛКВ 100/80 CM1 8 К	15	0,05	133
ЛКВ 160/125 CM2 12 К	15	0,1	67
SG/25A 16 CM2 12 К	30	0,1	35
25A 16 M1 12 К	30	0,2	18

ристикой 25A 16 M1 12 К, SG/25A 16 CM2 12 К и эльборовые круги с характеристиками ЛКВ 160/125 CM2 12 К и ЛКВ 100/80 CM1 8 К.

На первом этапе проверялась возможность использования эльборовых кругов и круга из микрокристаллического корунда на операции профилирования методом глубинного шлифования цилиндрических зубчатых колес. Колеса из термоулучшенной стали 16X3HBFMB-Ш (29...31 HRC) имели $m = 3$ мм, $z = 17$, $b = 17$ и $\alpha = 20^\circ$.

Круги на фасонную рабочую поверхность под $m = 3$ мм профилировались алмазным обкатывающим роликом с радиусом 0,6 мм производства фирмы Dr. Kaiser Diamantwerkzeuge. Режим правки выбирался в зависимости от характеристики круга (табл. 12.14) при постоянном значении отношения скорости ролика к скорости круга, равном 0,8, и коэффициенте перекрытия 10.

Для профилирования впадины между соседними зубьями с модулем 3 мм необходимо шлифовальному кругу внедряться в заготовку на глубину 6,75 мм. Эта операция высокопористым кругом из электрокорунда белого при скорости 35 м/с легко реализуется в соответствии с рекомендациями, изложенными в п. 7.2, за 3 и 6 проходов (табл. 12.15). Эльборовые круги и круги из микрокристаллического корунда в этих условиях глубинного шлифования оказались неработоспособными:

скачкообразный рост нагрузки, резкий звук, сноп искр, интенсивные прижоги на обрабатываемых поверхностях зубьев.

Спрофилировать впадину удалось только многопроходным шлифованием с глубиной хода 0,1 мм высокопористыми кругами из эльбора и SG/25A. Эльборовый круг 8-й структуры не пригоден для профилирования зубчатых колес даже на мягких режимах шлифования: после 9 проходов с глубиной 0,1 мм и продольной подачей 3000 мм/мин он имел катастрофический размерный износ с уменьшением своего диаметра на 10,5 %.

В табл. 12.15 помимо параметров режима шлифования приведены значения потребляемой мощности, погрешности обработки профиля зуба, шероховатость обработанной поверхности и машинное время обработки одной впадины.

На следующем этапе испытаний круги проверялись на работоспособность при чистовом шлифовании тех же зубчатых колес, что обрабатывались методом глубинного шлифования. Зубчатые колеса прошли цементацию и закалку на твердость 64 HRC и имели припуск на обработку 0,23 мм на сторону.

Чистовым шлифованием указанный припуск удалялся за один двойной ход круга с глубиной резания соответственно 0,18 и 0,05 мм. При постоянных значениях глубины резания продольная скорость перемещения круга подбиралась в соответствии с технологическими возможно-

12.15. Характеристики профильного шлифования зубчатого колеса

№ п/п	Характеристика круга	Число проходов	t , мм	$S_{пр}$, мм/мин	N , кВт
1	25A 16 M1 12 К	3	3,3...1,5	200	$2,25 \pm 20 \%$
2		6	1,99...0,75	400	$1,65 \pm 10 \%$
3	SG/25A 16 CM2 12 К	67	0,1	3000	$2,25 \pm 20 \%$
4	ЛКВ 160/125 CM2 12	67	0,1	3000	$1,69 \pm 20 \%$
5	К	67	0,1	6000	$2,7 \pm 25 \%$

№ п/п	$f_{H\omega}$, мкм	F_p , мкм	Ra , мкм	τ , мин
1	23,6	10,6	1,23	16
2	21,6	12,8	1,8	18
3	22,1	4,4	1,3	41
4	26,5	3,0	0,73	41
5	10,9	4,6	1,1	27

стями каждого из четырех испытанных шлифовальных кругов. Критериями ограничения продольной скорости перемещения круга были появление прижогов на

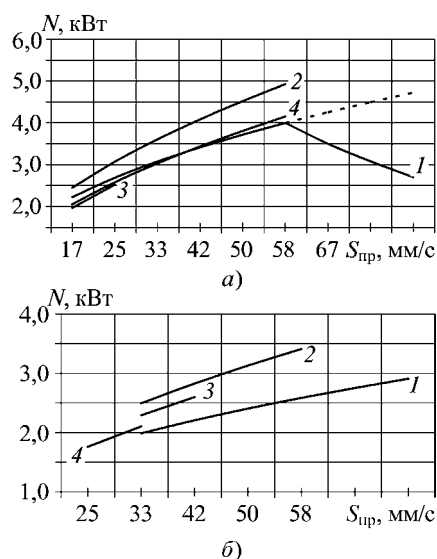


Рис. 12.33. Зависимость потребляемой мощности от глубины резания и скорости продольной подачи круга при чистовом профильном шлифовании зубчатого колеса для кругов:

$a - t = 0,18$ мм; $b - t = 0,05$ мм;
 1 – ЛКВ 100/80 CM1 8 К; 2 – ЛКВ 160/125 CM2 12 К; 3 – SG 80/25A 16 CM2 12 К; 4 – A99 100 I 12 V

обработанных поверхностях зубьев и повышенный размерный износ круга.

Установленный экспериментально диапазон возможного изменения продольной скорости круга при заданной глубине прохода, а также диапазон по мощности процесса, шероховатости обработанной поверхности и точности обработки профиля зуба представлены в табл. 12.16. Для диапазонов исследованных характеристик шлифования разработаны математические модели связи с параметрами режима обработки, а их степень влияния выражена через коэффициенты парной корреляции.

На рис. 12.33 показаны расчетные зависимости изменения потребляемой мощности на каждом проходе круга при $t = 0,18; 0,05$ мм от скорости продольного перемещения круга в экспериментально установленном диапазоне ее изменения. Для эльборового круга нормальной структурой при шлифовании с глубиной 0,18 мм бездефектный съем металла продолжается до скорости 83,3 мм/с (5000 мм/мин), но при интенсивном изнашивании инструмента.

Изменения шероховатости обработанной поверхности и точности профиля зуба после чистового прохода с глубиной врезания 0,05 мм приведены на рис. 12.34.

12.16. Результаты экспериментальных исследований чистового шлифования зубчатых колес и их математического моделирования

Характеристика шлифовального круга	Режим обработки		Выходные характеристики			Математические модели связи	Коэффициент парной корреляции		
	t , мм	S , мм/с	N , кВт	Ra , мкм	Δ , мкм		r	S	
ЛКВ 100/80 CM1 8 К	0,18	20,0... 83,3	2,4... 4,2	—	—	$\ln N = 0,34 \ln t + 0,468 \ln S - 1,851$ $\ln Ra = 0,144 \ln S - 1,225$ $\ln \Delta = 0,478 \ln S - 1,202$	0,730	0,583	
	0,05	33,3... 50,0	1,8... 2,4	0,87... 1,0	9,9... 22,4			—	0,696
								—	0,493
ЛКВ 160/125 CM2 12 К	0,18	20,0... 58,3	2,7... 5,1	—	—	$\ln N = 0,287 \ln t + 0,558 \ln S - 2,467$ $\ln Ra = 0,27 \ln S - 2,272$ $\ln \Delta = 2,311 \ln S - 14,958$	0,593	0,731	
	0,05	33,3...41,7	2,55... 2,85	0,78... 0,92	11,7... 26,0			—	0,981
								—	0,921
SG 80/25A 16 CM2 12 К	0,18	13,3...20,0	1,8... 2,1	—	—	$\ln N = 0,280 \ln t + 0,617 \ln S - 3,107$ $\ln Ra = 0,027 \ln S - 0,417$ $\ln \Delta = 0,566 \ln S - 2,144$	-0,164	0,512	
	0,05	25,0...33,3	1,5... 2,7	0,75... 0,89	7,0... 8,0			—	0,565
								—	0,765
A99 100 I 12 V (25A 12 M2 12 К)	0,18	20,0...58,3	2,25... 4,2	—	—	$\ln N = 0,218 \ln t + 0,562 \ln S - 2,783$ $\ln Ra = 0,105 \ln S - 0,974$ $\ln \Delta = 0,930 \ln S - 4,505$	0,445	0,779	
	0,05	33,3...41,7	2,4... 2,7	0,81... 0,90	10,0... 16,7			—	0,759
								—	0,995

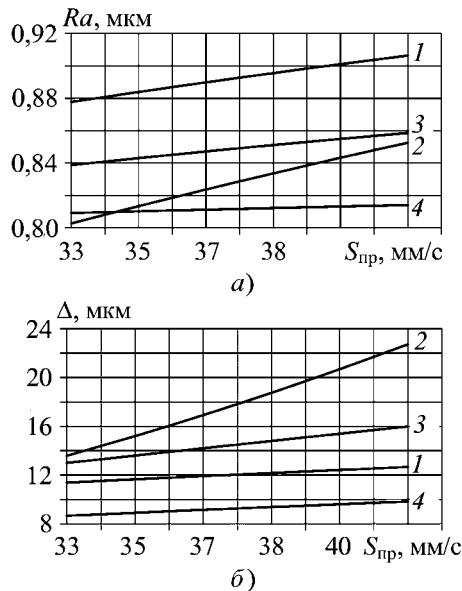


Рис. 12.34. Зависимость шероховатости обработанной поверхности (а) и погрешности профиля зуба (б) от скорости продольной подачи круга после чистового прохода при профильном шлифовании зубчатого колеса:

1 – ЛКВ 100/80 CM1 8 K; 2 – ЛКВ 160/125 CM2 12 K; 3 – SG 80/25A 16 CM2 12 K; 4 – A99 100 I 12 V

При шлифовании корундовыми высокопористыми кругами была проверена схема чистового шлифования с разбивкой припуска на 5 проходов: 4 прохода с глубиной 0,055 мм и заключительный проход с глубиной 0,01 мм. Все проходы выполнялись с продольной скоростью 2500 мм/мин.

При сравнении двух шлифовальных кругов лучшие результаты показал высокопористый круг на основе микрокристаллического корунда SG с характеристикой SG/25A 16 CM2 12 K. В отличие от круга 25A 12 M2 12 K круг на основе SG обеспечил лучшие показатели:

- по мощности шлифования с глубиной 0,055 мм соответственно 2,25 и 2,4 кВт;
- по шероховатости обработанной поверхности – Ra 0,81 и Ra 0,85;
- по погрешности угла впадины – 10,55 и 16 мкм.

При контроле после обработки кругом SG прижогов на обработанных поверхностях зубьев не обнаружено, а микротрещины зафиксированы на дне 4 впадин из 9 обработанных. После шлифования кругом из электрокорунда белого зафиксированы прижоги по кромке и микротрещины на дне впадин всех обработанных зубьев.

Для завершающего этапа производственных испытаний были изготовлены два шлифовальных круга с размерами 350×25×127 и с характеристиками ЛКВ 125/100 M2 12 K и 99SA 80 J 9 V. При изготовлении кругов был учтен опыт предшествующих испытаний, поэтому размеры и характеристики высокопористого эльборового круга и круга из микрокристаллического корунда лучшим образом соответствуют профильному шлифованию зубчатых колес из высоколегированных закаленных сталей.

Указанными кругами на шлифовальном станке мод. P600G фирмы Gleason-Pfauter обрабатывались зубчатые колеса с параметрами: $m = 4$ мм, $z = 21$, $b = 30$ мм, $\alpha = 20^\circ$. Колеса из стали 16X3HВФМБ-Ш были цементованы и закалены до твердости 60 HRC.

При скорости круга 30 м/с припуск на обработку удалялся за один проход по схеме попутного профильного шлифования с радиальной подачей на врезание 0,385 мм с охлаждением.

Шлифовальные круги правились алмазным роликом типа NC 80 с радиусом 0,5 мм фирмы Dr. Kaiser Diamantwerkzeuge с глубиной врезания 0,01 мм, скоростью перемещения 60 мм/мин при отношении окружных скоростей вращения ролика и круга, равном 0,8.

При шлифовании продольная скорость круга изменялась, начиная от 1000 мм/мин, и ее предельное значение достигало 4500 мм/мин ($Q_w = 28,9$ мм³/(м·с)) для высокопористого эльборового круга и 3000 мм/мин ($Q_w = 19,3$ мм³/(м·с)) для круга из микрокристаллического корунда.

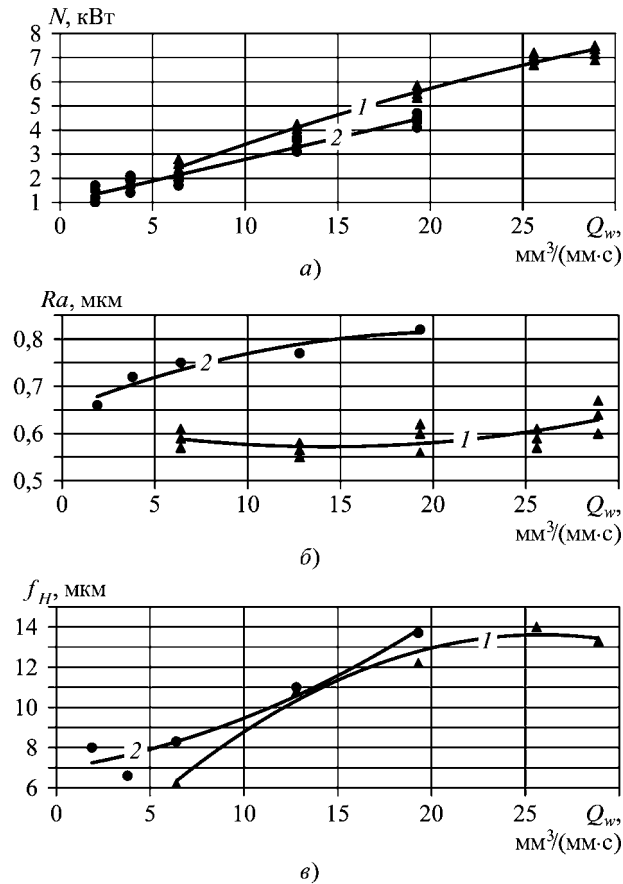


Рис. 12.35. Влияние удельной производительности по съему материала на потребляемую мощность (а), шероховатость (б) и точность обработки (в) при шлифовании высокопористым кругом из эльбора (1) и кругом из микрокристаллического корунда (2)

При более высоких скоростях появлялись видимые прижоги на обрабатываемых поверхностях зубьев.

Результаты измерения потребляемой мощности, шероховатости обработанной поверхности и точности обработки показаны на графиках (рис. 12.35).

В одинаковых условиях профильного шлифования цементованных и закаленных зубчатых колес из высоколегированных сталей высокопористый эльборовый круг обеспечил производительность в 1,5 раза выше, чем круг из микрокристаллического корунда при очень высокой скорости съема материала. Достигнутый уро-

вень по производительности шлифования высокопористым эльборовым кругом превысил в 2,4 раза скорость съема в аналогичных условиях обработки высокопористым кругом из электрокорунда белого.

Если к этому добавить, что высокая производительность профильного шлифования зубчатых колес сочетается с отсутствием дефектов на обработанных поверхностях и возможностью обработки впадины между соседними зубьями по всему периметру, то становится очевиден большой потенциал высокопористого эльборового инструмента.

Глава 13

НАЗНАЧЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЫСОКОПОРИСТЫХ ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ

13.1. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО НАЗНАЧЕНИЮ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЫСОКОПОРИСТОГО ИНСТРУМЕНТА

Под воздействием высоких давлений и температур в зоне резания происходит адгезионное схватывание абразива с обрабатываемым материалом, взаимная диффузия химических элементов, увеличение работы трения связки и абразивных зерен шлифовального круга с обрабатываемой поверхностью детали и, как следствие, разупрочнение и разрушение абразивных зерен и формирование поверхностного слоя детали с неблагоприятными для условий эксплуатации свойствами.

В этих сложных термодинамических условиях работоспособность шлифовального круга будет определяться способностью абразивных зерен на рабочей поверхности инструмента сопротивляться указанным контактными физико-химическим явлениям и, прежде всего, их термическому разупрочнению и разрушению, а также способностью связки удерживать абразивные зерна до потери ими режущих свойств.

На рис. 13.1 показана структурная схема взаимосвязи составляющих элементов шлифовального круга – абразивного зерна и связки с его свойствами, которые необходимо учитывать при назначении характеристики инструмента.

На структурной схеме показаны определяющие свойства шлифовального круга для назначения параметров его характеристики. Рассмотрим их более подробно.

Назначение абразивного материала. С процедуры назначения материала абразива и его зернистости начинается

выбор характеристики шлифовального круга и, в том числе, высокопористого.

Определяющими факторами при этом являются химическая инертность абразива к обрабатываемому материалу, его прочность и склонность к самовосстановлению режущих свойств в процессе шлифования. В п. 1.1 приведена исходная информация по свойствам различных абразивных материалов, необходимая для их выбора применительно к условиям шлифования. Самым важным среди них является химическая активность абразива к обрабатываемому материалу при высоких температурах их контактного взаимодействия.

По этому принципу (см. табл. 1.2) наиболее эффективно при шлифовании всех видов сталей и жаропрочных никелевых сплавов применение кругов на основе электрокорунда, а инструмента на основе карбида кремния – для чугунов, титановых, металлокерамических твердых, алюминиевых и медных сплавов. Использование алмазов вне конкуренции со всеми известными абразивами при шлифовании неметаллических материалов: керамики, стекла, гранита, мрамора, бетона и т.п., а также твердых сплавов. Иногда алмазными кругами шлифуют чугуны.

Широкая область применения у инструмента из эльбора: шлифование сталей, чугунов, титановых и никелевых сплавов.

Особую нишу по обрабатываемости занимают магнитные материалы, которые вследствие своих особых физико-химических свойств могут эффективно шлифоваться кругами из электрокорунда, эльбора и алмаза, а по некоторым рекомендациям и кругами из карбида кремния.



Рис. 13.1. Влияние состава и свойств шлифовального круга на характеристики процесса шлифования

Наибольшее распространение в машиностроении сохраняют до настоящего времени два абразива – электрокорунд и карбид кремния, которые принципиально отличаются друг от друга по химическим и физико-механическим свойствам. Электрокорунд является более прочным материалом и менее твердым, с большей теплопроводностью и теплостойкостью. У него хорошая адгезионная связь с керамической связкой, поэтому за счет прочного удержания абразивных зерен на рабочей

поверхности шлифовальный круг имеет повышенный ресурс эксплуатации.

Достоинством карбида кремния как абразивного материала для шлифования является его склонность к самозатачиванию из-за повышенной хрупкости и более благоприятные для резания геометрические параметры режущих кромок зерен.

На рис. 13.2 показана динамика относительного изменения микротвердости абразивных зерен электрокорунда белого и карбида кремния зеленого от темпера-

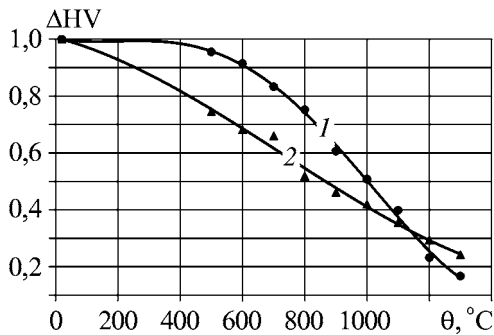


Рис. 13.2. Относительное изменение микротвердости абразивных зерен из электрокорунда белого (1) и карбида кремния зеленого (2) от температуры нагрева

туры нагрева. Уже при температуре 500 °C микротвердость карбида кремния уменьшается в 1,3 раз больше, чем электрокорунда, и такая тенденция сохраняется до температуры 1100 °C. Далее интенсивность разупрочнения электрокорунда белого становится больше, чем у карбида кремния зеленого.

При использовании улучшенных модификаций основных абразивных материалов можно повысить технико-экономические показатели процесса шлифования. Электрокорунд белый, например, имеет на 30...40 % более высокую режущую способность в сравнении с электрокорундом нормальным. Монокорунд при чистовом шлифовании обеспечивает стойкость инструмента в 1,5...2 раза выше, чем круги из электрокорунда белого. Круги из электрокорунда хромтитанистого рекомендуются для интенсификации чернового и чистового шлифования, а круги из электрокорунда циркониевого наиболее эффективны при обдирочном шлифовании проката, отливок и поковок.

Большие потенциальные возможности для повышения технико-экономических показателей процесса шлифования заложены в композициях из смеси различных абразивных материалов. При оптимальном подборе по количеству, составу и размерам зерен можно получить абра-

зивные смеси с меньшей стоимостью и режущими свойствами, существенно лучшими, чем у моноабразивного инструмента.

Назначение зернистости высокопористого шлифовального круга диктуется, в первую очередь, требованиями повышения производительности процесса шлифования. Крупное зерно при этом способствует снижению теплонапряженности в зоне резания, но не всегда может обеспечить заданную шероховатость обработанной поверхности детали.

Обычно, если шлифование завершает технологический цикл изготовления детали, то характеристику инструмента назначают из условий максимально возможной производительности процесса с обеспечением заданных требований по точности, шероховатости и физико-механическому состоянию поверхностного слоя шлифованной детали. В случае маятникового шлифования при необходимости вводятся один или несколько финишных проходов круга, включая выхаживание, с предваряющей правкой его рабочей поверхности. Тонкая правка скалыванием выступающих абразивных зерен сглаживает рабочую поверхность инструмента, формируя минимальную разновысотность режущих кромок.

Если обработка ведется в условиях повышенной жесткости технологической системы резания, то даже крупнозернистым кругом можно достигнуть высокой чистоты шлифованной поверхности. При нежесткой системе резания на кинематику движения круга накладываются колебания относительно поверхности детали с дополнительным внедрением в нее режущих зерен, способствуя увеличению высоты остаточных микронеровностей. Чтобы уменьшить их высоту, правомерно снизить зернистость шлифовального круга.

В машиностроении наибольшее распространение имеют шлифовальные круги на керамических связках зернистостью 10...40. Реже используется зернистость 5...8, например, для шлифования мелко-

модульных резб или зернистость 50...63 для грубых обдирочных операций.

За последние годы традиционные представления о том, что зернистость целесообразно назначать в зависимости от шероховатости обработанной поверхности, кардинально изменились. Если раньше мелкозернистые шлифовальные круги рекомендовались для чистовой обработки с удалением припуска до 0,05...0,1 мм, то теперь при глубинном шлифовании высокопористым кругом зернистостью 10...12 за один проход снимается припуск до ста раз больше, обеспечивая высокие производительность процесса и качество поверхностного слоя.

При шлифовании высокопористыми кругами шероховатость обработанной поверхности детали ухудшается. Если сохранять постоянными технологические условия шлифования, в том числе по характеристике абразивного инструмента, то при увеличении только номера структуры круга высота микронеровностей на поверхности детали будет также увеличиваться.

При круглом шлифовании на врезание закаленной стали кругами из электрокорунда белого зернистостью 16 со степенью твердости CM1 на керамической связке повышение структуры с 6-й до 12-й привело к увеличению параметра *Ra* почти в 1,2 раза, а до 16-й – в 1,5 раза. С возрастанием скорости резания разница в шероховатости поверхности еще более возрастает и тем больше, чем больше номер структуры шлифовального круга. Если при этих же режимах шлифовать без охлаждения, то различие в шероховатости поверхностей, обработанных кругами нормальной и высокопористых структур, уменьшается в 1,4...1,5 раз. Все зафиксированные изменения шероховатости обработанной поверхности были в пределах одного класса.

При необходимости замены на операциях маятникового шлифования инструмента нормальных структур на высокопористый целесообразно уменьшать его

зернистость, если сохраняется твердость высокопористого шлифовального круга.

Назначение твердости круга обычно связывают с обрабатываемым материалом и зернистостью инструмента. Шлифование абразивными кругами на керамической связке деталей из закаленных сталей чаще всего выполняют среднемягким инструментом твердостью CM1...CM2, а деталей из жаропрочных никелевых и титановых сплавов – более мягким инструментом твердостью M2...M3.

Если подходить более строго к выбору этого важного параметра характеристики шлифовального круга, необходимо учитывать не только обрабатываемый материал, но и конкретные свойства обрабатываемой поверхности (например, после химико-термической обработки) во взаимосвязи с условиями шлифования.

Чем тверже обрабатываемая поверхность, тем мягче должен быть шлифовальный круг и меньше его зернистость. Для шлифования вязких материалов эффективней использование более твердого инструмента с крупным абразивным зерном.

При небольшой площади контакта круга с обрабатываемой деталью, например, при круглом наружном и бесцентровом шлифовании, можно назначать максимально возможную твердость исходя из условий дефектообразования. С увеличением площади контакта (плоское, внутреннее шлифование) до больших площадей, характерных для профильного шлифования фасонных поверхностей, твердость шлифовального круга последовательно должна уменьшаться вплоть до степеней твердости BM1...M1. Твердость ЧМ применяется для профильного шлифования при непрерывной правке круга очень больших и закрытых для принудительного охлаждения поливом (или без такового) поверхностей материалов, склонных к образованию дефектов шлифовочного характера. Низкая твердость в таких примерах обработки обычно сочетается с высокими номерами структуры шлифовального круга.

Твердость круга — это параметр, который определяет износостойкость круга и одновременно влияющий на термодинамическую напряженность в зоне шлифования. При высокой твердости инструмента возрастает риск появления прижогов и микротрещин на обрабатываемой поверхности.

Вероятность дефектообразования увеличивается и при возрастании рабочей скорости круга, что удобно объясняется увеличением его так называемой динамической твердости. При высоких скоростях шлифования уменьшаются нагрузки на режущие зерна инструмента и их износ, возрастает интенсивность теплообразования. Шлифовальный круг по выходным параметрам процесса обработки: скорости изнашивания, усилию и температуре резания, проявляет себя как более твердый. Эффект кажущегося повышения исходной твердости круга при высоких скоростях шлифования также необходимо учитывать.

При обработке в условиях недостаточной жесткости технологической системы резания и сопутствующими самовозбуждающимися колебаниями целесообразно твердость шлифовального круга понижать.

Для прецизионной обработки и профильного шлифования сложнофасонных поверхностей деталей из труднообрабатываемых материалов необходимы не только правильный выбор твердости инструмента, но и повышенная стабильность ее показателей в объеме. Только их оптимальное сочетание обеспечивает равномерное изнашивание рабочей поверхности круга и стабильность протекания процесса съема материала в целом.

Состав высокопористого круга влияет на формирование статистических показателей твердости (см. п. 5.1). Установлено, что параметры характеристики инструмента одинаковым образом влияют на твердость высокопористого круга и ее стабильность. Чем выше степень твердости, тем меньше среднее квадратичное отклонение измеренной глубины лунки в

объеме инструмента. С увеличением объемного содержания абразивного зерна в круге (уменьшением номера структуры) стабильность твердости возрастает. Зернистость абразива в малой степени способствует стабилизации твердости.

Выбор структурности шлифовального круга, которая является самостоятельным параметром его характеристики, находится в прямой зависимости от материала абразива, зернистости и твердости инструмента.

Функциональное назначение структурности и обусловленной ею пористости не ограничивается формированием "карманов" на рабочей поверхности инструмента для сбора и накопления стружки. Хотя в некоторых случаях, например, при шлифовании мягких, вязких и пластичных металлов и сплавов при больших удельных съемах материала, эта функция необходима и часто становится единственной возможностью их эффективной реализации.

Предоставляемая технологю возможность назначать номер структуры в диапазоне от 6 до 20 и более радикально изменяет принципы оптимального выбора характеристики шлифовального круга. С увеличением номера структуры изменяются кинематические и динамические характеристики взаимодействия рабочей поверхности инструмента с обрабатываемой поверхностью детали. В результате снижается термодинамическая напряженность в зоне шлифования и создаются предпосылки для уменьшения износа шлифовального круга и улучшения физико-механического состояния поверхностного слоя обрабатываемой детали. Шероховатость ее поверхности при этом возрастает, но риск появления дефектов шлифовочного характера существенно уменьшается.

Повышая номер структуры круга и выполняя при этом условия бездефектности обработки, можно пропорционально увеличивать твердость, соответственно повышая износостойкость инструмента. Этому же способствует и необходимое уменьшение размеров абразивных зерен.

13.1. Выбор номера структуры в зависимости от зернистости круга

Зернистость	Номер структуры
40...50	≤ 8
25...32	≤ 10
16...20	10...22
6...12	10...18

Возможность повышения твердости высокопористого круга без ущерба для качества обработки компенсирует снижение разрывной прочности и увеличение неуравновешенности масс, характерных для высоких номеров структур.

Высокопористые шлифовальные круги позволяют шлифовать без охлаждения и отказаться от импрегнирования инструмента, т.е. улучшить экологические показатели изготовления и применения абразивного инструмента.

С точки зрения технологичности изготовления и целесообразности применения можно рекомендовать рациональные номера структур высокопористых кругов в зависимости от их зернистости (табл. 13.1).

Крупнозернистые круги по своему строению имеют на рабочей поверхности круга очень мало зерен, которые могут участвовать в резании. Поэтому для них применение структур более 8...10 не дает дополнительных преимуществ при шлифовании. Для мелкозернистых кругов, которые, как правило, имеют повышенную твердость, назначение номера структуры, напротив, не должно заметным образом уменьшить количество режущих зерен, необходимых для специфичных операций шлифования (резьбошлифование, прорезание канавок, прецизионная обработка и др.).

Керамическая связка в зависимости от состава, технологии изготовления и режима обжига имеет большой диапазон свойств, которые оказывают соответствующее влияние на возможный диапазон эксплуатационных свойств абразивного инструмента.

Все известные варианты керамической связки обладают характерным набором химических и физико-механических свойств, необходимых для обеспечения оптимальной работоспособности абразивных зерен для конкретных условий шлифования.

Прочность удержания зерен связкой на рабочей поверхности круга регламентируется характером их изнашивания, чтобы обеспечить работу инструмента в режиме или самозатачивания, или затупления режущих кромок. Эластичность связки должна регулировать разновысотность выступающих зерен, чтобы формировать заданную шероховатость обработанной поверхности детали.

Назначение допустимой величины неуравновешенной массы. Неуравновешенность массы или дисбаланс является очень сложной характеристикой шлифовального круга, которая чрезвычайно трудно поддается управлению технологическими методами.

В п. 5.4 уже анализировалась статистическая природа формирования неуравновешенности масс, из которой следует, что ее среднее значение обусловлено составом абразивной массы и точностью изготовления шлифовального круга на протяжении всего цикла его производства. Действие случайных возмущающих факторов производства дестабилизирует процесс формирования дисбаланса, в результате чего при изготовлении партии инструмента имеет место большое рассеяние его значений.

В табл. 13.2 в качестве примера приведены средние значения неуравновешенности масс $\bar{m}_D$ для шлифовальных кругов различных типоразмеров и характеристик с их распределением по классам неуравновешенности. Данные таблицы являются типичными для производства шлифовальных кругов.

Обобщающее распределение кругов по классам неуравновешенности для 5 различных партий инструмента с учетом

13.2. Распределение шлифовальных кругов по классам неуравновешенности масс

Типоразмер	Характеристика круга	Количество кругов	$\bar{m}_D$, г	Распределение кругов по классам неуравновешенности, %		
				1	2	3
1 300×32×76	25A 25 CM1 10 K	84	11,7	35,8	57,1	7,1
5 350×40×127	25A 25 CM2 10 K	54	15,8	29,6	40,7	29,6
1 450×20×203	25A 4 CM2 9 K	9	19,2	12,5	37,5	50
1 500×25×203	25A 12 ЗИ33 12 K	139	15,0	30,8	61,5	7,7
1 500×32×203	25A 16 МЗ 12 K	15	14,3	53,3	40,0	6,7

статистических весов каждой партии составляет: 1-й класс – 33,9 %; 2-й класс – 50 % и 3-й класс – 16,1 %. Круги с четвертым классом неуравновешенности масс в исследованном массиве отсутствуют.

Несмотря на принятые меры для обеспечения повышенной точности изготовления указанных шлифовальных кругов, избежать рассеяния дисбаланса не удалось.

На примере двух первых шлифовальных кругов (см. табл. 13.2) можно рассмотреть рекомендуемую область их применения в соответствии с классом неуравновешенности. По ГОСТ 3060–86 для шлифовальных кругов 9-й структуры и выше на керамической связке указанные круги по неуравновешенности масс должны классифицироваться по 3-му классу (25 г для круга $\varnothing$ 300 и 30 г для круга $\varnothing$ 350).

Этим полезность информации о величине дисбаланса ограничивается. Неясно, например, для каких процессов шлифования и при каких условиях обработки они могут быть использованы.

Согласно европейскому стандарту ISO/ FDIS 6103 неуравновешенность масс шлифовального круга регламентирована способом шлифования, видом применяемого оборудования, типом абразивного инструмента, его размерами и скоростью шлифования (табл. 13.3).

В соответствии с требованиями этого стандарта рассматриваемые шлифовальные круги по неуравновешенности масс

классифицируются на условия работы с коэффициентом $k = 0,32$ (рис. 13.3). Они могут быть применены при черновом шлифовании при скорости круга $16 \leq v_{кр} \leq 63$ м/с, силовом шлифовании и прецизионном шлифовании с рабочей скоростью в диапазоне $16 \leq v_{кр} \leq 40$ м/с.

Стандарт ISO/FDIS 6103 содержит необходимые предпосылки для обоснованного назначения величины неуравновешенности масс шлифовальных кругов в зависимости от условий их эксплуатации. Он является более жестким, чем отечественный стандарт на неуравновешенность масс шлифовальных кругов. Например, по ГОСТ 3060–86 предельная неуравновешенность масс для круга 300×32×76 составляет 16 г, а для круга 350×40×127 – 20 г. В соответствии с европейским стандартом отечественный инструмент 1-го класса неуравновешенности может быть применен только для условий шлифования при коэффициенте $k \geq 0,25$ (см. табл. 13.3). Для самого высокого уровня качества (при $k \geq 0,15$) рассматриваемых шлифовальных кругов европейский стандарт регламентирует значения дисбаланса в 10 и 13 г соответственно для диаметров 300 и 350 мм.

При назначении дисбаланса необходимо иметь в виду, что не только точность механической обработки и качество предшествующих операций изготовления высокопористых шлифовальных кругов предопределяет его величину. Она также

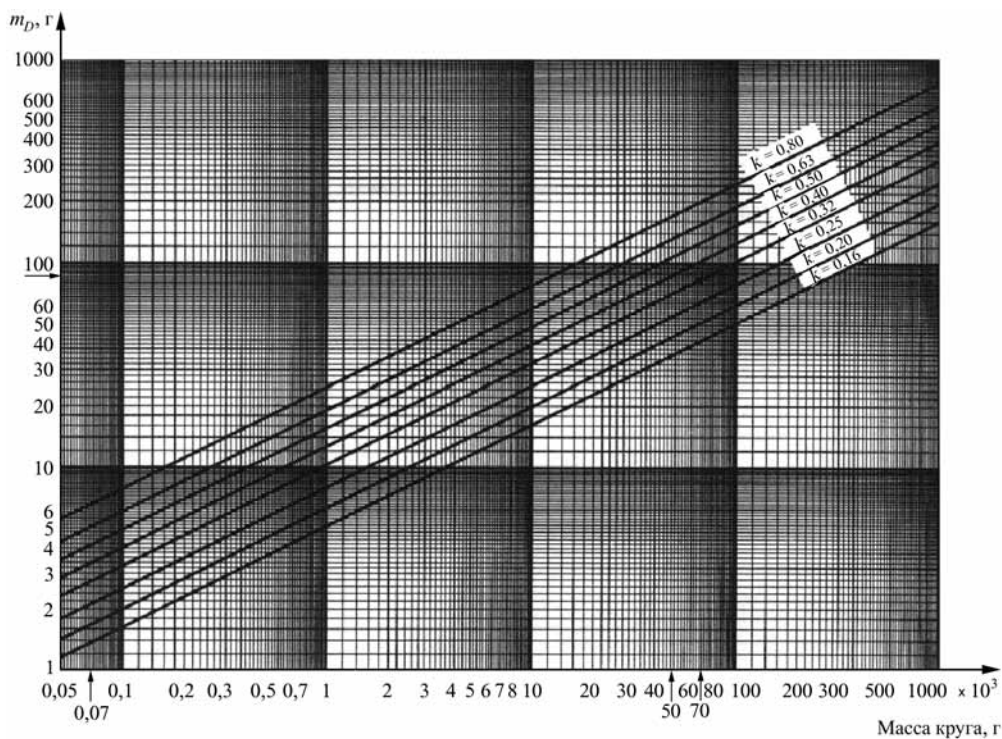


Рис. 13.3. Зависимость неуравновешенности масс шлифовальных кругов от их массы при различных значениях коэффициента k

зависит и от характеристики круга. Для инструмента на основе электрокорунда возможный дисбаланс уменьшается при уменьшении зернистости, увеличении твердости и номера структуры (см. табл. 5.16), т.е. для характеристики круга, оптимальной для прецизионного шлифования.

Для высокопористых кругов из карбида кремния закономерность изменения дисбаланса от их характеристики другая: увеличение зернистости абразива и номера структуры круга приводит к уменьшению возможного значения неуравновешенности масс. С увеличением твердости дисбаланс так же, как у корундовых кругов, уменьшается.

И еще на одно обстоятельство надо обратить внимание. В отечественной практике для отдельных операций шлифования, примеры которых приводились выше, назначаются одновременно неоправданно жесткие, по мнению автора,

требования по твердости высокопористых кругов (по звуковому индексу) и наивысшим классом точности (как правило, АА) и неуравновешенности масс (обычно 1-й класс неуравновешенности).

Формирование твердости и неуравновешенности масс при изготовлении абразивного инструмента являются, как показали результаты исследований, статистически независимыми событиями. Вероятность одновременного выполнения заданных требований по твердости и неуравновешенности масс круга равна произведению вероятностей выполнения каждого из указанных требований в отдельности.

В случае изготовления шлифовальных кругов с повышенными требованиями по качеству, возможный выход такого инструмента в реальных условиях промышленного производства не превосходит 10...20 % от исходной заформованной партии заготовок.

13.3. Значения коэффициента k при оценке неуравновешенности масс шлифовальных кругов

Способ шлифования	Вид оборудования	Тип абразивного инструмента	D, мм		B, мм		Коэффициент k при рабочей скорости, м/с		
			от	до	от	до	$16 \leq v_{ср} \leq 40$	$40 \leq v_{ср} \leq 63$	$63 \leq v_{ср} \leq 100$
Шлифование (черновое шлифование, обдирка, снятие заусенцев)	Ручные шлифовальные машины	1, 2, 4, 27, 28, 35, 36	—	150	—	—	0,40	0,32	0,25
			150	180	—	—	0,40	0,32	0,20
			180	—	—	6	0,40	0,32	0,20
			—	—	6	—	0,32	0,25	0,16
Шлифование (черновое шлифование, обдирка, снятие заусенцев)	Шлифовальные станки, станки малой жесткости и т.д.	1, 2, 35, 36	Все значения			—	0,40	0,32	—
			Все значения			—	0,63	0,50	0,40
Силовое шлифование	Шлифовальные станки	1	Все значения			—	0,8		
Шлифование прецизионное, цилиндрическое, скоростное, заточка	Шлифовальные станки	Все типы	—	300	Все значения		0,25	0,20	0,16
			300	610			0,32	0,25	0,20
			610	—			0,40	0,32	0,25
Отрезка	Ручные отрезные машины	41, 42	—	≤ 400	—	—	0,40	0,32	0,20
	Отрезные станки	41, 42	—	≤ 300	—	—	0,50	0,40	0,32
			> 300	—	—	—	0,63	0,50	0,40

Выбор рабочей скорости шлифовального круга ограничивается, прежде всего, его эксплуатационными возможностями по разрывной прочности, возможностями шлифовального станка и необходимостью одновременного повышения производительности процесса съема материала и качественных показателей обработанных деталей.

Увеличение скорости шлифования, безусловно, очень эффективное средство улучшения его технико-экономических показателей. Но его технологическая реализация, помимо упомянутых ограничений, связана с нейтрализацией возрастающего теплового эффекта. В условиях, когда зона обработки труднодоступна для принудительного охлаждения жидкостью, безальтернативно применение шлифовальных кругов с повышенными номерами структур.

Допустимая рабочая скорость абразивного круга входит в состав его характеристики и маркировки, и в случае применения высокопористых композиций она может быть обеспечена на достаточно высоком уровне (см. п. 5.5).

Влияние охлаждения смазывающе-охлаждающими технологическими средствами при шлифовании высокопористыми кругами также обусловлено их положительными свойствами. Способность образовывать и сохранять защитные пленки на контактирующих поверхностях при высоких температурах и давлениях, снижать работу трения при хороших моющих и антикоррозионных свойствах обеспечивает эффект, аналогичный их применению при обработке инструментом нормальных структур.

Однако применение СОТС помимо положительного эффекта дает и необратимые изменения характеристики абразивного инструмента. В зависимости от продолжительности воздействия и состава СОТС может иметь место как понижение, так и повышение твердости круга. По данным Ю.М. Кулакова и В.А. Хрулькова, при охлаждении струей содового раствора через 0,5 часа твердость кругов из электрокорунда белого зернистостью 25...40 и

твердостью СМ2...СТ1 снижается на 0,5...1 степень, а в течение 3,5 часа – на 0,5...2 степени.

От длительного воздействия СОТС, которые не дают сухого остатка, пористость абразивного инструмента увеличивается за счет вымывания твердых обломков зерен и керамической связки, а также физико-химических процессов адсорбции. При шлифовании воздействие СОТС сопровождается проникновением и накоплением шлама в объеме круга, в результате чего его пористость уменьшается, а неуравновешенность массы возрастает.

Необходимо отметить еще одно важное обстоятельство при назначении характеристики шлифовального круга, особенно высокопористого. Стандартизованные параметры характеристики абразивного инструмента не в полной мере отображают его реальные режущие и физико-механические свойства, а тем более их адекватность конкретным условиям шлифования.

В характеристике не идентифицируется рецептурный состав инструмента, качество абразивного зерна и его рассева по фракциям, стабильность показателей твердости, свойства связки, фактический номер структуры и статистические показатели структурности (размер пор, характер их распределения и т.д.), возможные составы и режущие свойства абразивных композиций по материалам и зернистости и другие показатели.

Для большинства операций шлифования знания указанных особенностей не требуется, но для процессов с повышенными требованиями по производительности, точности и качеству обработки их необходимо принимать во внимание и согласовывать с изготовителем абразивного инструмента.

13.2. ИДЕНТИФИКАЦИЯ ВЫСОКОПОРИСТОГО АБРАЗИВНОГО ИНСТРУМЕНТА

Многолетний опыт изготовления высокопористых шлифовальных кругов на различных фирмах Австрии, Германии, Чехии и России и соответственно хорошее

знание специфики этого производства дает автору этих строк право утверждать, что потребитель, заказывая высокопористый инструмент, не всегда получает то, что ожидает.

Все преимущества высокопористого инструмента прямо или косвенно обусловлены относительным объемным содержанием абразивного зерна или его структурой. Но методы и средства контроля этой характеристики абразивного инструмента отсутствуют. Поэтому установить прямым инструментальным методом, какой номер структуры имеет шлифовальный круг, подготовленный к эксплуатации, в настоящее время невозможно.

Номер структуры через объемное содержание зерна V_3 связан с пористостью инструмента $V_{\text{п}}$: чем больше номер структуры, тем больше ожидаемая пористость. Но в соответствии с (1.5) уменьшение V_3 может компенсироваться увеличением объемного содержания связки $V_{\text{св}}$ для получения более высокой степени твердости или невыгорающими наполнителями для повышения устойчивости объемной структуры инструмента к его деформации при изготовлении.

По этой причине контроль открытой пористости абразивного инструмента специальным отечественным прибором ПКП-1 или польским прибором мод. LPJLR-1 является аттестацией его качества только по параметру открытой пористости, который не стандартизован и не нашел широкого применения в производстве абразивного инструмента.

В известных стандартах и публикациях номера структуры и соответствующие им значения объемного содержания абразивного зерна, в отличие от общепринятой практики стандартизации, приводятся в виде целых чисел. Например, структуре 12 соответствует объемное содержание зерна 38 %, а структуре 13 – 36 %. Можно ли получить ответ на вопрос: какому номеру структуры соответствует абразивный инструмент с объемным содержанием зерна в 25 или 37 %? Диапазон

возможного рассеяния значений объемного содержания зерна для конкретного номера структуры не установлен, как это сделано, например, для глубины лунки в зависимости от степени твердости [ГОСТ 18118–79 (в ред. 1981 г.), рис. 1.2].

Необходимость идентификации высокопористого абразивного инструмента на соответствие номера структуры диктуется и спецификой производства этого типа инструмента.

В процессе изготовления высокопористого инструмента происходит изменение его расчетного объема W , и это изменение идет, как правило, в сторону уменьшения. Расчетный объем инструмента может уменьшиться при прессовании абразивной массы "в размер" и особенно при прессовании по "давлению" и всегда – при его сушке и высокотемпературном обжиге.

При уменьшении исходного объема шлифовального круга от W к W^* , его объемная деформация ε_w (усадка) составит

$$\varepsilon_w = 1 - \frac{W^*}{W}, \quad (13.1)$$

а соответствующее новому объему инструмента относительное содержание абразивного зерна V_3^* станет тем больше расчетного значения, чем больше объемная деформация

$$V_3^* = \frac{V_3}{1 - \varepsilon_w}. \quad (13.2)$$

Если принять во внимание зависимость V_3 от номера структуры N_c в виде

$$V_3 = \frac{62 - 2N_c}{100},$$

то фактический номер структуры нового круга будет равен

$$N_c^* = \frac{N_c - 31\varepsilon_w}{1 - \varepsilon_w}, \quad (13.3)$$

который надо привести к целому или натуральному числу.

Опыт изготовления высокопористых шлифовальных кругов со структурами 10...18 и выше свидетельствует, что их объемная деформация может достигать 10...30 %, и обычно тем больше, чем выше исходный номер структуры.

По аналогии с (13.2) в результате деформации инструмента возрастает объемное содержание связки и, как следствие, его твердость. Если твердость можно проверить на соответствие заданной, то по отношению к номеру структуры, которым маркируется готовый инструмент, этого сделать нельзя.

В результате объемного сжатия у высокопористого абразивного инструмента увеличивается относительное объемное содержание абразивных зерен и связки и уменьшается номер структуры. Из-за перестройки объемной структуры изменяются практически все физико-механические свойства инструмента и, как следствие, его эксплуатационные свойства.

Автором предлагается методический подход к контролю высокопористого абразивного инструмента, который в настоящее время отсутствует.

В качестве основного критерия соответствия номера структуры, полученного в результате изготовления, номеру структуры, которой был задан как исходный, предлагается использовать плотность инструмента.

Объем абразивного инструмента состоит из абразивного зерна, связки, различных наполнителей – порообразователей и пор естественного и искусственного происхождения, а плотность его складывается из плотностей γ_i и удельных объемов α_i , входящих в абразивную массу компонентов:

$$\gamma = \sum_{i=1}^k \alpha_i \gamma_i. \quad (13.4)$$

Плотности абразивного зерна, связки и порообразователей существенно различаются между собой, и, соответственно, их влияние на плотность шлифовального круга зависит от его твердости и структу-

ры и, следовательно, от объемного (или массового) содержания связки и абразива.

Для шлифовальных кругов из электрокорунда, например, со структурой 6...20, твердостью от ВМ1 до С2 наибольший вклад в плотность инструмента вносит содержание абразивных зерен – 65...85 %, в меньшей степени влияет керамическая связка – 15...30 %. При использовании порообразователей их доля в плотности высокопористых шлифовальных кругов не превышает 6 %. С увеличением номера структуры и твердости инструмента влияние объемного содержания абразивного зерна на плотность шлифовального круга уменьшается и одновременно увеличивается влияние керамической связки. Таким образом, по плотности шлифовального круга γ можно судить не только о его структуре и твердости, но и об относительном содержании абразивных зерен и керамической связки.

Важной и ценной особенностью этого критерия является возможность учитывать изменения в структуре шлифовального круга, которые происходят при его высокотемпературном обжиге. Очевидно, что плотность исходной формовочной массы будет отличаться от фактической плотности инструмента после обжига, что обусловлено выгоранием связки и других выгорающих компонентов абразивной массы. Определенное влияние на плотность шлифовального круга, как и на изменение его структурного состояния, оказывает усадка в процессе термической обработки.

Таким образом, плотность абразивного инструмента и, в частности, шлифовальных кругов является достаточно чувствительным оценочным показателем его структурного состава, учитывающего объемное содержание абразива и связки, размеры абразивных зерен, твердость и его фактическую пористость после обжига.

На рис. 13.4 показано влияние на плотность шлифовальных кругов объемного содержания абразивного зерна (номера структуры) и твердости по следующей статистической модели:

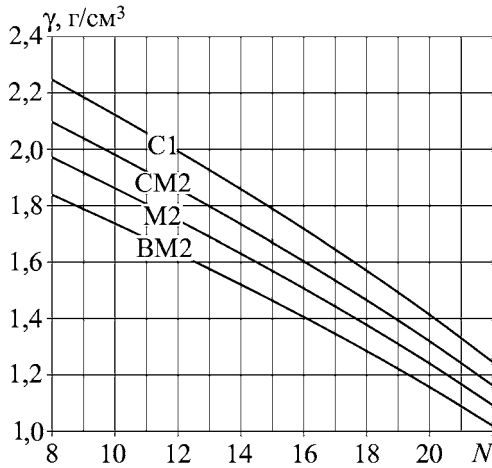


Рис. 13.4. Влияние номера структуры шлифовальных кругов из электрокорунда зернистостью 12...25 на их плотность

$$\ln \gamma = 1,663 + 0,628 \ln V_3 - 0,302 \ln h_d - 0,006 \ln A_3. \quad (13.5)$$

Расчетная модель (13.5) и данные, представленные на рис. 13.4, дают возможность по значению плотности шлифовального круга γ и его твердости определить фактическое объемное содержание абразивных зерен, т.е. фактическую структуру инструмента для анализа его режущей способности при шлифовании и разработки рекомендаций по совершенствованию технологии его изготовления.

Решая уравнение (13.4) относительно объемного содержания зерна, получаем расчетную формулу для определения фактического значения V_3^* :

$$V_3^* = 0,0708 \gamma^{1,592} h_d^{0,481} A_3^{0,009}. \quad (13.6)$$

Зернистость абразива A_3 в диапазоне 6...40 дает незначительный вклад в расчетное значение V_3^* – в пределах 1 %, поэтому ею можно пренебречь.

Таким образом, определив плотность круга γ и его твердость по глубине лунки h_d при давлении 0,05 МПа, можно оценить фактическое содержание абразивного зерна в объеме инструмента и установить

фактический номер его структуры по зависимости, аналогичной (1.2):

$$N^* = 31 - 0,5 V_3^*, \quad (13.7)$$

где V_3^* в %.

Предложенная методика анализа высокопористых кругов по их плотности получена для их идентификации на номер структуры во всех случаях: контроля качества производства инструмента и его входного контроля перед эксплуатацией.

Автор также предлагает для практического использования разработанную им классификацию абразивного инструмента со структурами 10...30 по относительно-му объемному содержанию зерна с четким определением его границ для каждого номера структуры (табл. 13.4). В таблице также приведены ориентировочные значения возможной общей пористости шлифовальных кругов, допустимая степень деформации при их изготовлении, при которой значение V_3^* остается в пределах заданного номера структуры, и ориентировочные величины плотности для инструмента из электрокорунда и карбида кремния.

Измерение плотности круга в сочетании с оценкой его пористости по воздухопроницаемости дает гарантированную оценку его качества и, прежде всего, соответствия номеру структуры.

В заключение этого раздела целесообразно обратиться к терминологии высокопористого абразивного инструмента.

Структура (лат. structura – расположение, порядок) в общепринятом значении предполагает строение или устройство изучаемого объекта с совокупностью его устойчивых связей, обеспечивающих целостность и тождественность самому себе.

Когда этому слову придается смысл количества абразива в единице объема, то нарушается не только значение этимона, но (и это самое неприятное) из понятийного анализа абразивного инструмента исключается удобное и емкое понятие его строения.

13.4. Классификация высокопористых шлифовальных кругов

Номер структуры	Относительное объемное содержание абразивного зерна		Пористость круга, %		Допустимая деформация при изготовлении, %	Плотность кругов, г/см ³	
	допустимый диапазон	среднее	возможная	средняя		из электрокорунда	из карбида кремния
10	0,411...0,430	0,42	42...53	47,5	2,32	1,72...2,25	1,64...2,14
11	0,391...0,410	0,40	44...55	49,5	2,44	1,66...2,17	1,58...2,07
12	0,371...0,390	0,38	46...57	51,5	2,56	1,60...2,09	1,52...2,0
13	0,351...0,370	0,36	48...59	53,5	2,70	1,54...2,00	1,46...1,93
14	0,331...0,350	0,34	50...61	55,5	2,86	1,48...1,93	1,40...1,86
15	0,311...0,330	0,32	52...63	57,5	3,03	1,42...1,85	1,34...1,79
16	0,291...0,310	0,30	54...65	59,5	3,23	1,36...1,77	1,28...1,72
17	0,271...0,290	0,28	56...67	61,5	3,45	1,30...1,69	1,22...1,65
18	0,251...0,270	0,26	58...69	63,5	3,70	1,24...1,61	1,16...1,58
19	0,231...0,250	0,24	60...71	65,5	4,0	1,18...1,53	1,10...1,51
20	0,211...0,230	0,22	62...73	67,5	4,35	1,12...1,45	1,04...1,44
21	0,191...0,210	0,20	64...75	69,5	4,76	1,06...1,37	0,98...1,37
22	0,171...0,190	0,18	66...77	71,5	5,26	1,00...1,29	0,92...1,29
23	0,151...0,170	0,16	68...79	73,5	5,88	0,94...1,21	0,86...1,21
24	0,131...0,150	0,14	70...81	75,5	6,67	0,88...1,13	0,80...1,13
25	0,111...0,130	0,12	72...83	77,5	7,69	0,82...1,05	0,76...1,05
26	0,091...0,110	0,10	74...85	79,5	9,09	0,76...0,97	0,70...0,97
27	0,071...0,090	0,08	76...87	81,5	11,11	0,70...0,89	0,64...0,89
28	0,051...0,070	0,06	78...89	83,5	14,26	0,64...0,81	0,58...0,81
29	0,031...0,050	0,04	80...91	85,5	20,0	0,58...0,76	0,57...0,74
30	0,011...0,030	0,02	82...93	87,5	33,33	0,57...0,73	0,56...0,72

По аналогии с такими понятными и измеряемыми характеристиками абразивного инструмента, как зернистость, твердость и пористость, лучше заменить слово "**структура**" как количественную меру абразивного зерна на определение "**структурность**".

В соответствии с понятием "структурность" можно устранить разночтение в определении видов абразивного инструмента и унифицировать его терминологию в зависимости от объемного содержания зерна. Целесообразно для номеров структуры или структурности от 0 до 4 абразивный инструмент называть **плотноструктурным**, 5...7 – **нормальноструктурным**, 8...10 – **высокоструктурным** и от 11 и более – **высокопористым**. К разновидностям высокопористого абразивного инструмента можно отнести **крупнопористый** инструмент, а также инструмент с **открытой** и **закрытой** пористостью.

13.3. ОПТИМИЗАЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИК И РЕЦЕПТУРНОГО СОСТАВА ВЫСОКОПОРИСТЫХ КРУГОВ

Концепция оптимизации абразивного инструмента. Оптимизация абразивного инструмента – это выбор такого варианта его состава, при котором достигается экстремальное значения какого-нибудь критерия, характеризующего качество инструмента. К понятию качества инструмента можно отнести не только оценку его эксплуатационных свойств – производительность, износостойкость и т.д., но и экономическое качество, например, себестоимость изготовления.

Процедуру оптимизации абразивного инструмента необходимо рассматривать во взаимосвязи с процессом абразивной обработки, исходя из требований к обрабатываемой детали и соответственно требований к процессу съема материала.

Последовательность проектирования технологических процессов и инструмента для абразивной обработки можно представить следующим образом (рис. 13.5).

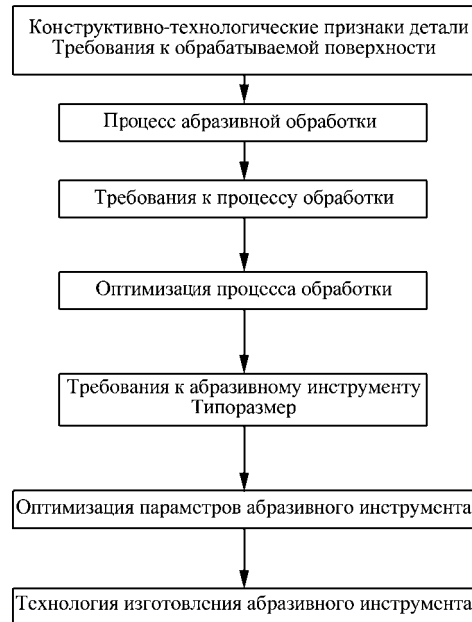


Рис. 13.5. Последовательность проектирования технологических процессов и инструмента для абразивной обработки

На основе конструктивно-технологических признаков детали и конкретных требований к ее обрабатываемым поверхностям возможен выбор необходимого технологического процесса абразивной обработки – шлифования и его метода – круглое наружное, внутреннее, плоское, глубинное, профильное и т.д., включая схемы обработки – попутное или встречное шлифование.

В соответствии с выбранным процессом и схемой обработки выявляются требования к нему: по производительности, качеству, надежности и экономичности, и по выбранному критерию оптимальности устанавливаются оптимальные параметры режима обработки и требования к абразивному инструменту.

На рис. 13.5 показана традиционная последовательность проектирования технологических процессов и инструмента для абразивной обработки, а на рис. 13.6 – принятый алгоритм назначения параметров характеристики шлифовального круга.



Рис. 13.6. Алгоритм назначения параметров абразивного шлифовального круга

Указанный алгоритм предопределяет логическую последовательность проектирования (назначения) параметров абразивного инструмента. Как правило, требования к процессу обработки взаимосвязаны с требованиями к абразивному инструменту и назначение конкретного параметра инструмента обусловлено несколькими характеристиками процесса обработки.

На рис. 13.7 сделана попытка показать взаимосвязь требований к абразивному инструменту и процессу абразивной обработки. Применительно, например, к твердости инструмента, ее назначение зависит от требований к производительности процесса (величине минутного съема материала), точности обработки, обусловленной размерной стойкостью рабочих поверхностей инструмента и характером их изнашивания, к качеству поверхностного слоя детали (трещины, сколы, прижоги и физико-механические свойства и др.).

Необходимость придерживаться такого подхода к оптимизации абразивного инструмента подтверждается практикой разработки и внедрения в производство высокопористого инструмента. Много-

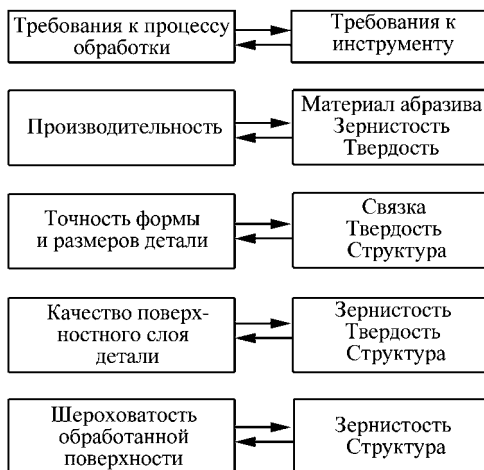


Рис. 13.7. Взаимосвязь требований к абразивному инструменту и процессу обработки

летняя практика его применения выявила одну важную особенность: нельзя механически переносить параметры абразивного инструмента (прежде всего его твердость и зернистость) нормальной структуры и даже высокопористого инструмента с открытой структурой на параметры нового инструмента. Назначать параметры абразивного инструмента целесообразно исходя из требований к процессу обработки и необходимости его интенсификации.

Описанный алгоритм назначения характеристики абразивного инструмента является лишь приближенной схемой решения чрезвычайно сложной задачи оптимизации его рецептурного состава с учетом требуемой характеристики. Характеристика инструмента, как это уже показано, назначается исходя из условий и требований обработки.

Для шлифовальных кругов нормальных структур при заданной характеристике по материалу и зернистости абразива, твердости и номеру структуры вариативность их изготовления ограничена маркой связки и ее количеством в объеме инструмента. Как правило, при грамотном на-

значении характеристики абразивного инструмента оговаривается не только тип связки, но и ее марка. По существу у технолога не остается возможности управлять рецептурным составом, так как изменение количества связки обусловлено заданной характеристикой и масштабным фактором.

При изготовлении высокопористых шлифовальных кругов основной проблемой становится обеспечение их конкурентоспособных свойств – высоких показателей по твердости, разрывной скорости, минимальному дисбалансу с одновременным увеличением номеров структуры. На решение этой проблемы накладываются сопутствующие негативные явления – возрастание деформации инструмента и дестабилизации свойств в его объеме при уменьшении содержания абразивного зерна.

Но, в отличие от инструмента нормальных структур, при изготовлении высокопористых кругов имеется очень важное преимущество – диверсификация рецептурного состава. Современные технологии производства высокопористого абразивного инструмента дают возможность для заданной его характеристики вариативно решить задачу оптимизации состава. Эта возможность может быть обеспечена за счет выбора типа, химического состава, размеров и объемного содержания выгорающих и невыгорающих порообразователей, включая возможность их рассева по фракциям и применения их самых разнообразных композиций. При этом возможно не только обеспечить заданную характеристику инструмента при его минимальной деформации и себестоимости изготовления с повышенной стабильностью твердости в объеме. При необходимости возможно повысить его разрывную прочность и целенаправленно изменять характеристику для повышения производительности, точности и качества процесса шлифования.

Методология оптимизации высокопористых кругов. В общем виде задача

параметрической оптимизации абразивного инструмента представляется в виде:

$$Q = \text{extr} \{f_0(x, w) \mid x \in D\}, \quad (13.8)$$

при технологических ограничениях вида

$$g(x, w) \leq 0; \quad f(x) \leq 0; \quad a_i \leq k_i \leq b_i;$$

где $f_0(x, w)$ – критерий оптимизации, значение которого зависит от требований к процедуре оптимизации и набора оптимизирующих x и постоянных параметров инструмента; D – область допустимых значений оптимизирующих параметров; a_i и b_i – постоянные.

Состав высокопористого круга включает в себя: абразив, корундовые, силикатные и стеклянные микросферы, молотые фруктовые косточки и связку. Все указанные компоненты отличаются разнообразием форм, размеров, химического состава и физико-механических свойств.

В более простой форме задача параметрической оптимизации абразивного инструмента поставлена следующим образом: установить оптимальное соотношение между компонентами высокопористой абразивной массы инструмента, которое обеспечит его заданные эксплуатационные и технологические свойства.

В качестве эксплуатационных свойств или параметров шлифовальных кругов (условно) в расчетах можно принять: типоразмер круга (необходим для расчета его объема и количества входящих в абразивную массу компонентов); материал абразива; размер абразивного зерна (номер зернистости); твердость круга (глубина лунки); связку инструмента; структуру круга (содержание зерна в круге); неуравновешенность массы; скорость обработки (разрывная прочность круга).

Технологические свойства в значительной степени определяются составом абразивной массы, технологией изготовления и дисциплиной ее исполнения и являются часто решающим фактором не только стоимости изготовления высокопористых шлифовальных кругов, но и возможности их изготовления в принципе.

Так, большие деформации инструмента при спекании могут привести к его разрушению или неоправданно большим припускам на механическую обработку.

Сочетание в различных пропорциях различных по составу и размерам порообразователей позволяет варьировать в широком диапазоне технологическими свойствами нового высокопористого инструмента: его пористостью или номером структуры, твердостью и ее рассеянием в объеме круга, разрывной прочностью, деформацией, что, в свою очередь, обеспечивает заданные требования условий обработки по производительности и качеству.

При проектировании рецептурного состава высокопористого абразивного инструмента необходимо стремиться, чтобы в его состав вводилось минимально возможное число различных по своей природе ингредиентов. Сложная по физико-химической природе и количественным соотношениям композиция создает больше предпосылок для негативных последствий.

Безусловно, что подбор рецептурного состава обуславливается требуемой характеристикой шлифовального круга – его твердостью и номером структуры. Материал и зернистость абразива при этом заданы, но являются важнейшим компонентом высокопористой абразивной массы, от которых зависит количество вводимой связки, порообразователей и других наполнителей.

Общая рекомендация для высокопористой абразивной массы заключается в том, что ее объем в формуемой заготовке круга не должен превышать 68...72 %. Конкретная цифра зависит от зернистости абразива: для крупных зерен с размерами 250...400 мкм она может быть на верхнем пределе, для более мелкой зернистости – на нижнем пределе.

Обязательность выполнения этого требования объясняется плотностью укладки абразивных зерен в заданном объеме. Например, для шаров, уложенных в куб, плотность укладки составляет 66 %

объема. Для зерен неправильной формы и различных размеров плотность укладки определяется, в основном, их зернистостью и имеет свой диапазон.

При повышении номера структуры, естественно, уменьшается удельный объем абразивных зерен. Освобождаемый объем целесообразно заполнить невыгорающими порообразователями – корундовыми или силикатными микросферами. Чем больше их будет в объеме, тем меньше деформация круга при его обжиге и тем стабильнее будет распределение твердости в его объеме.

Размеры вводимых микросфер не должны превышать размера абразивных зерен. В противном случае, они при шлифовании, разрушаясь на рабочей поверхности круга, могут своими режущими кромками нанести на обрабатываемую поверхность детали более глубокие царапины, чем шлифующие зерна.

Большое количество технологических решений в этой связи предопределяет необходимость постановки и решения задач оптимизации состава или рецептуры абразивной массы. Чрезвычайная сложность решения этой задачи оптимизации объясняется не только многовариантностью возможных комбинаций порообразователей в сочетании с объемным содержанием абразивного зерна и связок различных марок, а также наличием естественных пор. Задача оптимизации усложняется за счет различного по степени и характеру влияния каждого отдельного порообразователя, их сочетаний и, наконец, всего состава абразивной массы в целом на технические свойства инструмента. К этому следует добавить, что отсутствуют аналоги постановки и решения подобного типа задач оптимизации не только для высокопористого инструмента, но и для инструмента нормальной структуры.

После сравнительного анализа возможных вариантов постановки и специфики решаемой задачи оптимизации, она была сформулирована следующим образом: определить оптимальный состав аб-

разивной массы, стоимость компонентов которой минимальна, а технологические свойства отвечают заданным требованиям.

Критерием оптимизации состава абразивной массы может быть принята стоимость ее компонентов:

$$C = W \sum_{i=1}^n \alpha_i \gamma_i P_i, \quad (13.9)$$

где α_i – относительное объемное содержание компонентов абразивной массы (зерно, связка, наполнители, декстрин, жидкое стекло и т.д.); γ_i – удельный вес компонентов; P_i – стоимость компонентов; W – объем шлифовального круга.

В качестве ограничений для оптимизируемых параметров в соответствии с существующими стандартами и практикой изготовления абразивного инструмента можно принять:

1. Ограничение по твердости

$$[h_{\text{л}}] - \Delta h_{\text{л}} \leq h_{\text{л}}(x_i) \leq [h_{\text{л}}] + \Delta h_{\text{л}}, \quad (13.10)$$

т.е. расчетное значение глубины лунки должно находиться в диапазоне возможных по ГОСТ 18118–79 (в ред. 1981 г.) значений для заданной степени твердости круга.

2. Ограничение по стабильности твердости

$$\sigma_h(x_i) \leq [\sigma_h], \quad (13.11)$$

т.е. значение среднеквадратичного отклонения глубины лунки, рассчитанного для возможного ее изменения в партии инструмента, не может быть более заданной величины.

3. Ограничение по объемной деформации круга

$$\varepsilon_w(x_i) \leq [\varepsilon_w], \quad (13.12)$$

устанавливает ее возможное значение по условиям производства.

4. По рассчитанной деформации ε_i проверяется ограничение на заданный номер структуры

$$N(\varepsilon_i) = [N], \quad (13.13)$$

а при невозможности обеспечить условие (13.13), необходимо пересчитать рецеп-

турный состав высокопористой абразивной массы на более высокий номер структуры.

5. Ограничение по допустимой неуравновешенности масс

$$m_D(x_i) \leq [m_D]. \quad (13.14)$$

6. Ограничение по разрывной прочности (или разрывной скорости круга)

$$\sigma_p(x_i) \leq [\sigma_p(v)]. \quad (13.15)$$

Комплекс оптимизационных параметров x_i включает в себя: размер A_3 и объемное содержание абразивных зерен V_3 в круге, объемное содержание корундовых $V_{\text{мс}}$, стеклянных $V_{\text{ст}}$, силикатных $V_{\text{см}}$, фруктовых косточек $V_{\text{к.ф}}$ и керамической связки $V_{\text{св}}$ в проектируемом инструменте.

Разработанный алгоритм оптимизации включает в себя задание формы и размера шлифовального круга, размера зерна, твердости, номера структуры и скорости обработки, т.е. требования к инструменту, которые предопределены конкретными условиями обработки (схема шлифования, модель станка, требования к производительности и качеству обработки). Некоторые из этих параметров при необходимости могут быть включены и в состав оптимизируемых параметров (например, твердость, номер структуры и зернистость круга).

В качестве основных оптимизируемых параметров служат параметры абразивной массы инструмента, выбор которых производится с помощью ограничений на допустимые величины рассеяния твердости круга и его деформации после обжига, дисбаланса и разрывной прочности, функционально связанной с рабочей скоростью круга.

Достоинством разработанной методологии оптимизации является то, что она впервые позволяет находить оптимальные комбинации основных компонентов высокопористой абразивной массы в зависимости от требуемых технологических и эксплуатационных свойств инструмента.

13.5. Примеры оптимального выбора состава высокопористой абразивной массы для шлифовальных кругов

Характеристика круга	Типоразмер круга	L_x , мм	Относительное содержание				Твердость h_d , мм		
			V_z	V_{mc}	V_{ct}	V_{cb}	Диапазон	МО	СКО
15A 16П МЗ 12 К5	1 50×11×10	51,2	0,38	0,18	0,12	0,07	3,8...4,4	4,1	0,26
	1 50×25×10	55,9	0,38	0,18	0,14	0,086	4,1...4,3	4,2	0,11
	1 350×32×76	351,5	0,38	0,18	0,10	0,06	4,2...4,3	4,3	0,07
	1 500×25×203	500,6	0,38	0,16	—	0,084	4,7...5,0	4,8	0,14
25A 16П М2 14 К5	1 55×28×13	61,7	0,34	0,25	0,05	0,11	5,4...5,6	5,5	0,11
	1 200×20×51	201	0,34	0,25	0,05	0,09	4,9...5,3	5,1	0,14
25A 25П М1 11 К5	1 250×32×76	252	0,40	0,14	0,16	0,06	5,7...7,0	6,3	0,58
95A 25П М1 11 К5	1 500×17×203	500,3	0,40	0,12	0,18	0,06	5,7...7,0	6,3	0,56

Существенным недостатком указанного метода, как показывает практика его применения, стало игнорирование масштабного фактора оптимизируемого инструмента. Исследования показали, что габариты инструмента оказывают значительное влияние на его твердость и ее стабильность в объеме.

Предлагается новая концепция оптимизации состава высокопористых шлифовальных кругов, которая учитывает их масштабный фактор. Как уже было показано выше, при оптимизации состава абразивной массы крупногабаритных кругов необходимо учитывать механическую прочность сырца, чтобы получить инструмент вообще (без разрушения на всех этапах изготовления) и учесть коррекцию на расчетную степень твердости, чтобы обеспечить заданные характеристики по качеству.

При реализации новой концепции возникают дополнительные проблемы при оптимизации объемного содержания отдельных компонентов высокопористой абразивной массы. Оптимизация ее состава предполагает обеспечить жестко регламентированную твердость инструмента (расчетную глубину лунки h_d) при минимальном ее рассеянии σ_h . Расчетное значение твердости можно достигнуть за счет

оптимального соотношения всех компонентов абразивной массы (табл. 13.5), однако при этом должна быть гарантирована механическая прочность сырца, достаточная для бездефектного изготовления высокопористого инструмента заданной характеристики по структуре, твердости и ее стабильности, размеру абразивного зерна (см. п. 3.2).

Сопоставление расчетных моделей механической прочности сырца абразивной массы на излом и изгиб, твердости инструмента и ее стабильности позволяет сделать вывод, что влияние на эти характеристики компонентов абразивной массы неоднозначно как по существу, так и по степени воздействия.

Однако в целом механическая прочность сырца на излом достаточно тесно коррелирована с твердостью инструмента: чем больше прочность сырца, тем меньше твердость инструмента. Для корреляционной связи прочности на изгиб сырца с твердостью инструмента вскрыта противоположная закономерность: увеличение прочности сырца на изгиб гарантирует повышение твердости абразивной массы после обжига.

Наличие корреляционной связи между механической прочностью сырца абразивной массы с ее твердостью после обжи-

13.6. Изменение глубины лунки в зависимости от степени твердости круга по ГОСТ 18118–79 (в ред. 1981 г.) ($P = 0,15$ МПа)

Степень твердости	Индекс	$h_d \pm \Delta h_d$, мм, в зависимости от зернистости		
		8...12	16...25	32...40
Среднемягкая	CM1	$5,5 \pm 0,3$	$6,0 \pm 0,4$	$5,3 \pm 0,4$
	CM2	$4,95 \pm 0,25$	$5,25 \pm 0,35$	$4,55 \pm 0,35$
Средняя	C1	$4,5 \pm 0,2$	$4,6 \pm 0,3$	$3,9 \pm 0,3$
	C2	$4,1 \pm 0,2$	$4,0 \pm 0,3$	$3,35 \pm 0,25$
Среднетвердая	CT1	$3,7 \pm 0,2$	$3,45 \pm 0,25$	$2,85 \pm 0,25$
	CT2	$3,3 \pm 0,2$	$3,0 \pm 0,2$	$2,4 \pm 0,2$
	CT3	$2,95 \pm 0,15$	$2,6 \pm 0,2$	$2,05 \pm 0,15$

га инструмента дает возможность прогнозировать на этапе замешивания и формования высокопористого шлифовального круга его возможную твердость и аналогично ее рассеяние, однако, без учета масштабного фактора инструмента. Учесть масштабный фактор оптимизируемого шлифовального круга необходимо через коррекцию расчетных значений глубины лунки и среднеквадратичного ее отклонения.

Оптимизация высокопористых кругов с учетом их масштабного фактора. Принципиально методология оптимизации рецептурного состава высокопористых кругов с учетом их масштабного фактора сохраняется в соответствии с моделью оптимизации (13.8) и критерием оптимизации (13.9) в виде стоимости входящих в состав абразивной массы зерна, связки и порообразователей. Масштабный фактор, как это было обосновано выше, предполагает внесение необходимых корректив в структуру технологических ограничений, которые накладываются на область допустимых значений оптимизируемых параметров и гарантируют выполнение заданных требований к составу высокопористой абразивной массы.

В модель оптимизации высокопористых кругов с учетом их масштабного фактора вводится новое ограничение по механической прочности сырца абразивной массы, которая должна быть максимально возможной, но не ниже прочности сырца

для абразивных кругов нормальной структуры:

$$\sigma_{из}(x_i) \geq [\sigma_{из}], \quad (13.16)$$

где $\sigma_{из}(x_i)$ может быть представлено через прочность сырца на излом или прогиб, модели которых приведены в табл. 3.17.

Коррекция на твердость и ее стабильность с учетом масштабного фактора инструмента (см. п. 5.2) должна уменьшить расчетные значения глубины лунки в соответствии с увеличением характеристического размера L_x шлифовального круга.

Ранее было установлено, что распределение глубины лунки (твердости) для одного инструмента или его партии близко к нормальному закону. Следовательно:

$$h_d \pm \Delta h_d = h_d \pm 3\sigma_{h_d}, \quad (13.17)$$

и расчетное значение среднеквадратичного отклонения глубины лунки должно соответствовать ограничению:

$$\sigma_h \leq \frac{1}{3} \Delta h_d, \quad (13.18)$$

где рассеяние твердости Δh_d по глубине лунки зависит от степени твердости и зернистости абразивного инструмента (табл. 13.6).

Рекомендации по выбору расчетного значения глубины лунки в зависимости от масштабного фактора инструмента (для удобства — от диаметра шлифовального круга) и возможного его рассеяния приве-

**13.7. Выбор глубины лунки (твердости) в зависимости от диаметра круга
($P = 0,05$ МПа)**

Диаметр круга, мм	Зерни- стость	Глубина лунки, мм, при твердости круга						
		BM1	BM2	M1	M2	M3	CM1	CM2
До 150	8...12	9,0 _{-1,5}	7,4 _{-0,9} ^{+0,1}	6,4 _{-0,5} ^{+0,1}	5,4 _{-0,5} ^{+0,1}	4,6 _{-0,9} ^{+0,1}	3,9 _{-0,9} ^{+0,1}	3,3 _{-0,9} ^{+0,1}
	16...25	8,7 _{1,0}	7,6 _{-0,9} ^{+0,1}	6,6 _{-0,9} ^{+0,1}	5,7 _{-0,9} ^{+0,1}	4,8 _{-0,9} ^{+0,1}	3,9 _{-0,9} ^{+0,1}	3,2 _{-0,9} ^{+0,1}
	32...40	5,9 _{-0,8}	5,0 _{-0,5} ^{+0,1}	4,4 _{+0,5} ^{+0,1}	3,8 _{-0,5} ^{+0,1}	3,2 _{-0,4} ^{+0,1}	2,7 _{-0,4} ^{+0,1}	2,2 _{-0,4} ^{+0,1}
200...300	8...12	8,3 _{-0,8} ^{+0,7}	6,9 _{-0,4} ^{+0,6}	5,9 _{-0,4} ^{+0,6}	5,1 _{-0,4} ^{+0,4}	4,3 _{-0,3} ^{+0,4}	3,6 _{-0,2} ^{+0,4}	3,1 _{-0,2} ^{+0,3}
	16...25	8,2 _{-0,5} ^{+0,5}	7,2 _{-0,5} ^{+0,5}	6,2 _{-0,4} ^{+0,5}	5,3 _{-0,4} ^{+0,5}	4,4 _{-0,4} ^{+0,5}	3,5 _{-0,2} ^{+0,5}	2,9 _{-0,3} ^{+0,4}
	32...40	5,5 _{-0,4} ^{+0,4}	4,7 _{-0,2} ^{+0,4}	4,2 _{-0,3} ^{+0,4}	3,5 _{-0,3} ^{+0,4}	3,0 _{-0,2} ^{+0,3}	2,5 _{-0,2} ^{+0,3}	2,0 _{-0,2} ^{+0,3}
400...600	8...12	7,5 ^{+1,5}	6,5 ^{+1,0}	5,5 ^{+1,0}	4,7 ^{+0,8}	4,0 ^{+0,7}	3,4 ^{+0,6}	2,9 ^{+0,5}
	16...25	7,7 ^{+1,0}	6,7 ^{+1,0}	5,8 ^{+0,9}	4,9 ^{+0,9}	4,0 ^{+0,9}	3,3 ^{+0,7}	2,6 ^{+0,7}
	32...40	5,1 ^{+0,8}	4,5 ^{+0,6}	3,9 ^{+0,6}	3,3 ^{+0,6}	2,8 ^{+0,5}	2,3 ^{+0,5}	1,8 ^{+0,5}

дены в табл. 13.7. В соответствии с указанными рекомендациями процедура назначения расчетного значения σ_h усложняется, так как для реализации ограничения (13.18) необходимо назначить σ_h в каждом конкретном случае.

Используя ранее описанные результаты исследования (см. п. 3.2), можно найти корреляцию между модулем упругости E шлифовального круга и механической прочностью сырца на изгиб $\sigma_{изг}^*$, а также между коэффициентом вариации модуля упругости и коэффициентом вариации прочности $\sigma_{изг}^*$. По представленным моделям на образцах абразивной массы в сыром виде по значению ее механической прочности можно заранее определить модуль упругости готового инструмента. В свою очередь, установлена связь $E(h_n)$, с помощью расчетной модели которой можно без разрушения поверхности шлифовального круга пескоструйным аппаратом оценить степень твердости.

Таким образом, анализ механической прочности сырца абразивной массы уже

на предварительной стадии изготовления высокопористых шлифовальных кругов позволяет оценить будущую твердость инструмента и ее стабильность и проконтролировать прогноз неразрушающим методом ультразвукового контроля по модулю упругости.

В главе 5, табл. 5.14 содержатся обобщающие модели связи $f(h_n)$ и $h_n(f)$, которые имеют высокую коррелированность с экспериментальными значениями.

На основании данных акустического контроля можно сделать некоторые обобщения и сформулировать практические рекомендации по его использованию.

Экспериментально доказано, что между глубиной лунки, полученной пескоструйным методом, и частотой собственных колебаний высокопористых шлифовальных кругов имеется достаточно тесная связь. Математическая модель такой связи может быть формализована только для конкретной группы составов, основанных на различных видах выгорающих и невыгорающих порообразователей.

Выявленные закономерности дают возможность акустическим методом получить оценку твердости круга не только по ЗИ, но и сопоставить ее с твердостью по глубине лунки. Если измерена величина ЗИ для конкретного круга, принадлежность которого к той или иной группе составов известна, то можно либо по рис. 5.12 и 5.13 или по модели из табл. 5.14 рассчитать соответствующее значение глубины лунки h_d . Связав глубину лунки с зернистостью круга, получаем расчетную степень твердости.

13.4. ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ВЫСОКОПОРИСТЫХ ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

При изготовлении высокопористых кругов, например, с номерами структуры 12...20, объем порового пространства составляет 55...75 % объема инструмента и зависит от содержания керамической связки, необходимой для получения заданной твердости. Без введения в состав абразивной массы твердых порообразователей технологически обеспечить высокую структуру с небольшим содержанием абразивного зерна невозможно.

Вводимый в абразивную массу порообразователь должен, с одной стороны, обеспечить ее достаточно однородную по объему инструмента формуемость и прочность формы на всех этапах изготовления после прессования, включая устойчивость к деформации при высокотемпературном спекании. С другой стороны, этот порообразователь при нагреве может вступать в химическое взаимодействие с абразивом и керамической связкой, изменяя их свойства.

Чаще всего в технологии производства высокопористого абразивного инструмента используются продукты искусственного (нафталин) или естественного (молотые фруктовые косточки) происхождения, при выгорании которых образуются газы. Продукты выгорания, вырыва-

ясь под давлением на поверхность инструмента, формируют в его объеме сквозную пористость, форма, размеры и ориентация которых носит случайный характер. При этом вырывающиеся газы разрушают мостики связи между абразивными зернами, снижая твердость и прочность шлифовального круга. Создаются предпосылки формообразования неоднородной по объему структуры абразив-связка шлифовального круга с флуктуациями плотности и соответственно с повышенной неуравновешенностью масс и нестабильностью твердости.

Сложной технологической проблемой качественного изготовления высокопористых кругов является обеспечение их хорошей формуемости при малой насыпной массе: чем выше номер структуры инструмента, тем больше объем воздуха в составе деформируемой абразивной массы. В этом случае даже при двухстороннем прессовании и незначительном давлении деформация объема происходит неоднородно с образованием уплотнений абразивной массы на поверхностях контакта формы с пуассоном.

Чтобы избежать этих негативных последствий, в состав массы добавляют выгорающий наполнитель (например, молотые фруктовые косточки, нафталин и др.), который, как уже отмечалось, приводит к уменьшению твердости и прочности высокопористого инструмента. Уже при объемном содержании более 5 % фруктовые косточки как порообразователь начинают оказывать заметное разупрочняющее действие. Попытка компенсировать разупрочняющий эффект от применения выгорающих наполнителей за счет увеличения содержания керамической связки приводит к другому негативному фактору – возрастает объемная деформация инструмента при спекании и, как следствие, риск его разрушения или существенного искажения формы и размеров. По этой причине до 50 % и более высокопористых шлифовальных кругов, особенно крупногабаритных, бракуется при изготовлении.

В литературе подробно рассмотрены достоинства и недостатки высокопористого абразивного инструмента на основе выгорающих или вспучивающихся порообразователей. Можно только отметить, что эта технология не позволяет обеспечить экономичное производство качественного высокопористого инструмента с твердостью более чем СМ1...СМ2 и рабочей скоростью более 50 м/с. Сложной проблемой остается и изготовление крупногабаритных шлифовальных кругов со структурами 12...16 и выше.

Для высокопористых кругов любого рецептурного состава базисным сохраняется общий признак – уменьшенное содержание абразивных зерен в объеме инструмента. В этом проявляется парафилизм этого класса инструмента независимо от его состава, а именно – характер влияния количества работающих зерен на процесс шлифования.

С участием автора разработана новая технология изготовления высокопористых шлифовальных кругов, у которых структура формируется с применением экологически безопасных, невыгорающих порообразователей в виде микросфер различного состава, размеров и свойств. Новая технология изготовления высокопористого абразивного инструмента оригинальна, прежде всего, составом абразивной массы. Оптимизация различных композиций по составу и количеству порообразователей в абразивной массе должна обеспечить заданные свойства инструмента по твердости, пористости (номеру структуры), разрывной прочности и неуравновешенности масс (дисбалансу).

Подбор порообразователей должен удовлетворять требованиям экологической безопасности производства, а состав абразивной массы в целом должен гарантировать хорошие технологические свойства, включая повышенную прочность сырца, минимальные значения деформации инструмента при его сушке и высокотемпературном спекании, а также дисперсии твердости в объеме шлифовального круга.

В зависимости от требований к технологическим и эксплуатационным свойствам шлифовальных кругов в качестве порообразователей используются как в отдельности, так и в различных комбинациях корундовые, алюмосиликатные или кремнеземные и стеклянные пустотелые микросферы. Они имеют правильную геометрическую форму шара с толщиной стенки от 1 до 5 мкм в зависимости от состава и размера (этим они отличаются от известного сферокорунда, имеющего неправильную геометрическую форму и толстую стенку). Микросферы хорошо выдерживают большую статическую нагрузку при прессовании инструмента, участвуя в создании прочного каркаса зерно–микросферы–связка–воздух. Если такая микросфера находится на рабочей поверхности шлифовального круга, то при шлифовании она легко раскалывается, образуя искусственную пору с дополнительными режущими кромками.

К невыгорающим порообразователям в виде микросфер при необходимости могут добавляться выгорающие порообразующие компоненты, например, молотые фруктовые или оливковые косточки различных размеров.

Шлифовальный круг – это стохастическая система из неоднородно распределенных абразивных зерен, мостиков связки и пор. В высокопористых кругах с использованием выгорающих или вспучивающихся порообразователей степень неоднородности распределения всех компонентов системы значительно повышается. Неопределенность размеров, форм, свойств и распределения пор становится преобладающим фактором полиморфности объемно-структурного строения инструмента. Известно, что замена абразивных зерен, имеющих случайную форму и размеры, которые формируются при размалывании в мельнице, на зерна изометричной формы способствует повышению износостойкости инструмента и его разрывной прочности.

В высокопористых кругах более половины объема занимает поровое про-

13.8. Характеристики новых высокопористых кругов

Характеристика	Электрокорунд и его модификации	Карбид кремния и его модификации
Зернистость	6...50	10...25
Степень твердости	BM1...CT2	BM1...C2
Дисперсия твердости в объеме круга, мм ²	± 0,03	± 0,02
Номер структуры	10...30	10...16
Деформация при обжиге, %	0,2...15	0,5...10
Разрывная скорость, м/с	≤ 168	≤ 122

пространство, морфологические и физико-механические свойства которого определяют эксплуатационные свойства инструмента. Поры и поровое пространство в целом являются доминантой объемного строения высокопористых шлифовальных кругов. Они определяют прочность и эластичность соединения абразивных зерен, теплопроводность абразивной массы, развитость режущего рельефа на рабочей поверхности и др.

Введение невыгорающих микросфер правильной геометрической формы в качестве конструктивных элементов порового пространства гомогенизирует его строение и способствует упорядоченному

распределению абразивных зерен в объеме инструмента. В этом проявляется трансгрессия, т.е. появление нового признака или новых свойств высокопористых кругов, что существенно улучшает его потребительские свойства.

В результате исследований и производственных испытаний разработаны высокопористые шлифовальные круги на основе корунда и карбида кремния различных модификаций с широким диапазоном возможных характеристик (табл. 13.8).

Рекомендации по характеристикам инструмента и режимам шлифования различных конструкционных материалов приведены в табл. 13.9 и 13.10.

13.9. Рекомендации по глубинному шлифованию новыми высокопористыми кругами

Обрабатываемый материал	Характеристика круга	Режимы глубинного шлифования		
		Скорость круга, м/с	Скорость детали, м/мин	Глубина обработки, мм
Легированные закаленные стали	25A 16 M2...CM1 12...16 K 25A 16 M2...M3 10...12 K	20...35	0,1...0,5	0,5...10
Жаропрочные никелевые сплавы	25A 12...25 BM2 12 K 25A 12...25 3И31...35 12 K	20...70	0,02...1,0	0,5...10
Титановые сплавы	64C 16 M1...M2 12 K	20...30	0,02...0,8	0,5...5,0
Магнитотвердые материалы:				
литые	25A 10...12 BM2...M1 12 K	20...30	0,050...0,25	0,5...3,0
спеченные	25A 10...12 BM2...M1 12 K	20...30	0,050...0,35	0,5...4,0
деформируемые	25A 10...12 BM2...M1 12 K	20...30	0,050...0,40	0,5...5,0

13.10. Рекомендации по мягниковому шлифованию высокопористыми кругами

Обрабатываемый материал	Вид шлифования	Характеристика круга	Режимы шлифования			
			Скорость круга, м/с	Скорость детали, м/мин	Поперечная подача, мм/мин	Глубина обработки, мм
Легированные закаленные стали	Круглое внутреннее	25A 12...16 M3...CM2 12...16 K	60...80	100...150	0,1...4,5	0,015...0,6
	Круглое наружное	25A 12...25 M3...C2 10...16 K	35...100	2...25	—	0,2...0,3
	Плоское	25A 8...40 CM1...CM2 12...16 K	25...50	10...25	1...4	0,01...0,1
Жаропрочные никелевые сплавы	Круглое наружное	25A 12...16 M3...CM2 10...14 K	30...40	15...25	0,5...1,0	0,1...0,5
	Плоское	25A 16...40 CM1...CM2 10...14 K	25...35	10...25	1...2	0,01...0,1
Титановые сплавы	Круглое наружное	64C 12...40 M2...CM2 10...16 K	25...35	20...40	0,5...2,0	0,005...0,1
	Плоское	64C 16...25 M1...CM1 10...14 K	20...30	10...20	0,5...1,0	0,005...0,05
Магнитотвердые материалы	Плоское	25A 16...25 M2...M3 12...14 K	30...35	20...25	1...2	0,03...0,05

Достоинствами нового инструмента, обусловленными его оригинальным составом, являются:

- экологически безопасная технология изготовления и применения;
- уникальная возможность изготовления высокопористых шлифовальных кругов с повышенной прочностью на разрыв независимо от их пористости и твердости для обработки на скоростях до 120 м/с;
- возможность изготовления и применения абразивного инструмента высокой твердости – до СТ2 с высокой пористостью – до 80 %, а также в самых различных сочетаниях зернистость–твердость–структура, в том числе, крупногабаритных кругов высотой до 200 мм со структурами 12...16;
- высокое качество формовочной массы вследствие ее повышенной однородности и сыпучести, что гарантирует стабильность физико-механических свойств в объеме инструмента при его минимальном дисбалансе;
- высокая прочность сырца и минимальная деформация при обжиге инструмента обеспечивают минимальный брак при изготовлении – менее 5 % и соответственно снижение материальных затрат в производстве.

В сравнении с абразивным инструментом нормальных структур уменьшение количества зерен с одновременным увеличением объема порового пространства также обеспечивает:

- улучшение термодинамических условий шлифования за счет уменьшения действующих в зоне контакта сил и температур; это позволяет получать детали с повышенными показателями по точности и качеству обработки;
- возможность введения в шлифовальный круг при необходимости импрегнаторов различной степени консистентности;
- благоприятные условия для охлаждения зоны шлифования подачей охлаждающей жидкости через поры высокопористого абразивного инструмента;

- более интенсивное охлаждение детали за счет струйного турбулентного эффекта от вращения макрошероховатой поверхности шлифовального круга.

Указанные преимущества могут быть обеспечены при снижении стоимости шлифовальных кругов за счет уменьшения затрат на абразив. Это снижение будет тем больше, чем дороже вводимый в круг абразивный материал (например, микрокристаллический корунд, алмаз и кубический нитрид бора).

Новый инструмент в процессе шлифования оказывает минимальное термодинамическое воздействие на систему резания, что создает предпосылки для бездефектной и высокопроизводительной обработки. При шлифовании новым инструментом вследствие особенностей его строения низкая температура в зоне резания – на 300...500 °С ниже, чем у аналогов – сохраняется как при обработке с охлаждением, так и без применения смазочно-охлаждающих средств. Повышенная стабильность физико-механических свойств в объеме инструмента при минимальном дисбалансе обеспечивает стабильные режущие свойства по всей периферии рабочей поверхности шлифовального круга и соответственно равномерный износ в течение всего периода его работы. Это очень важно при обработке деталей высокой точности.

Экспериментальными исследованиями разработанных высокопористых шлифовальных кругов показано, что в зависимости от их состава разрывная скорость может изменяться от 168 до 79,8 м/с. При этом необходимо различать шлифовальные круги по абразивному материалу: для высокопористых кругов на основе электрокорунда разрывная скорость при одной и той же зернистости, твердости и номеру структуры всегда будет больше, чем у кругов на основе карбида кремния.

Основные закономерности заключаются в следующем: разрывная и соответственно рабочая скорость высокопористых кругов будет тем больше, чем меньше их зернистость и номер структуры, и больше твердость.

Наибольшие рабочие скорости – до 140 м/с – можно обеспечить при шлифовании высокопористыми кругами с размером зерна 0,06...0,1 мм, со структурами 9...12 и твердостью СМ1...СТ1. Инструмент с такими характеристиками, как правило, предназначен для прецизионной обработки ответственных деталей, в том числе после химико-термической обработки – цементации, азотирования, нитроцементации и закалки.

В качестве инструмента в этом случае необходимо применять высокопористые абразивные круги на основе корундовых микросфер в качестве порообразователя с керамической связкой повышенной прочности и с добавлением стеклянных микросфер до 10 % объема круга.

Высокопористые круги с размером зерна 0,12...0,16 мм, твердостью ВМ2...М3 и с номерами структуры 10...16 могут обеспечить рабочую скорость до 110 м/с. Инструмент с такими характеристиками эффективен при профильном глубинном шлифовании фасонного режущего инструмента (сверла, фрезы, протяжки и др.), замков лопаток, зубчатых колес и соединений и т.д. с удалением припуска до 10 мм и более за один проход. Его применение также эффективно для бесприжогового шлифования при традиционных схемах маятниковой обработки с удалением припуска до 0,5...1 мм.

Чем больше вероятность появления дефектов шлифовочного характера, тем больше в объем инструмента надо вводить выгорающего порообразователя. При этом надо иметь в виду, что повышение объемного содержания, например, фруктовых косточек приводит к снижению твердости и прочности круга. По этой причине их объемное содержание для высокоскоростного шлифования не должно превышать 10 %.

В качестве выгорающих, экологически безопасных порообразователей лучше использовать молотые оливковые косточки. Они в сравнении с персиковыми или фруктовыми косточками сборного состава отечественного производства обеспечи-

вают наилучшие технологические и эксплуатационные показатели высокопористых шлифовальных кругов.

Применение композиций из выгорающих и невыгорающих порообразователей дает возможность бездефектного шлифования сложных фасонных поверхностей с большими площадями контактирования с рабочей поверхностью инструмента.

Для операций чернового шлифования новыми высокопористыми кругами с размером абразивных зерен 0,25...0,40 мм на керамических связках скорость обработки может достигать 70...80 м/с.

Областями эффективного применения нового инструмента, как показал опыт производственных испытаний и внедрения в промышленность, являются:

- шлифование деталей из труднообрабатываемых материалов, в том числе хрупких материалов и закаленных сталей, особенно после химико-термической обработки, которые чувствительны к появлению сколов, трещин и прижогов;
- высокопроизводительная и точная обработка с высокими скоростями резания – до 120 м/с, в том числе без охлаждения;
- прогрессивные схемы глубинного шлифования различных конструкционных материалов: жаропрочных никелевых и титановых сплавов, закаленных легированных сталей, магнитных материалов и др. (хвостовиков лопаток, зубчатых колес, фасонного режущего и накатного инструмента и др.).

Рецептурные составы и технология изготовления нового высокопористого инструмента защищены авторскими свидетельствами на изобретения, патентами РФ и зарубежными патентами. Его производство в виде шлифовальных кругов прямого и специального профиля, тарелок, чашек, колец и брусков самых разнообразных размеров и характеристик освоено в промышленных масштабах.

По своим технологическим и эксплуатационным свойствам описанные высокопористые шлифовальные круги можно классифицировать как инструмент нового поколения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Асланова М.С., Стеценко В.Я., Шустров А.Ф.** Полые неорганические микросферы // Химическое производство за рубежом. 1981. № 9. С. 33–51.
2. **Ашкиназий Я.М.** Бесцентровые круглошлифовальные станки. Конструкции, обработка и правка. М.: Машиностроение, 2003. 352 с.
3. **Бакуль В.Н.** Основы проектирования и технология изготовления абразивного и алмазного инструмента. М.: Машиностроение, 1975. 296 с.
4. **Балкаров Т.С.** Повышение эффективности шлифования магнитотвердых материалов за счет применения глубинной схемы обработки и высокопроизводительных абразивных кругов: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. М., 1992. 138 с.
5. **Булыжев Е.М., Ромашкин В.Г., Кокорин В.Н.** Технология переработки в брикеты дисперсных металломаслосодержащих смесей // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы: тр. конф. «Шлифабразив-97». Волжский, 1997. С. 30–32.
6. **Ваксер Д.Б.** Пути повышения производительности абразивного инструмента при шлифовании. М.–Л.: Машиностроение, 1964. 123 с.
7. **Вентцель Е.С.** Теория вероятностей. М.: Наука, 1969. 576 с.
8. **Власов В.В., Биктанова Н.И.** Соответствие зернистостей шлифовальных материалов ГОСТ 3647–80 и стандартам FERA 42-D-1984 R 1993 и FERA 43-D-1984 R 1993 // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы: тр. конф. «Шлифабразив-99». Волжский, 1999. С. 67–68.
9. **Воронин В.Н.** Бесконтактное исследование структурных параметров абразивного инструмента // Конструкторско-технологическая информатика: тр. V междунар. конгресса. М.: ИЦ ГОУ МГТУ «Станкин», «Янус-М», 2005. С. 28–30.
10. **Волский Н.И.** Обрабатываемость материалов шлифованием. М.: Машгиз, 1950. 72 с.
11. **Вредные вещества** в промышленности // Справочник для химиков, инженеров и врачей. Т. 1. Органические вещества / под ред. Н.В. Левиной. Л.: Химия, 1976. 592 с.
12. **Выбор** оптимальных характеристик высокопористых кругов для глубинного шлифования / В.Ф. Макаров, В.П. Кирчанов, А.Н. Попов, В.В. Семиколенных // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы: тр. конф. «Шлифабразив-98». Волжский, 1998. С. 27–30.
13. **Высокопроизводительное** шлифование / отв. редактор Е.Н. Маслов. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 248 с.
14. **Гавриш А.П.** Шлифование и доводка магнитных материалов. Л.: Машиностроение, 1985. 117 с.
15. **Гаршин А.П., Гропянов В.М., Лагунов Ю.В.** Абразивные материалы. Л.: Машиностроение, 1983. 231 с.
16. **Гегузин Я.Е., Кривоглаз М.А.** Движение макроскопических включений в твердых телах. М.: Металлургия, 1971. 344 с.
17. **Глубинное** шлифование деталей из труднообрабатываемых материалов / С.С. Силин, В.А. Хрульков, А.В. Лобанов, Н.С. Рыкунов. М.: Машиностроение, 1984. 64 с.
18. **Грабченко А.И., Федорович В.А.** Экспертная система процесса алмазного шлифования сверхтвердых материалов // Вопросы механики и физики процессов резания и холодного пластического деформирования. Киев: НАН Украины, 2005. С. 481–489.
19. **Дунин-Барковский И.В.** О статистических аспектах шлифования. Вероятностистатистические основы процесса шлифования и доводки. Л.: СЗПИ, 1974. 125 с.
20. **Дьяченко П.Е.** Шлифовальный круг и его режущая способность. М.–Л.: Оборонгиз, 1939. 104 с.
21. **Евсеев Д.Г.** Формирование свойств поверхностных слоев при абразивной обработке. Саратов: Изд-во Саратовского университета, 1975. 127 с.
22. **Екобори Т.** Физика и механика разрушения и прочности твердых тел. М.: Металлургия, 1971. 264 с.
23. **Елисеев Ю.С., Старков В.К., Рябцев С.А.** Новый инструмент для глубинного шлифования хвостовиков турбинных лопаток // Авиационная промышленность. 2000. № 4. С. 36–44.
24. **Еремин С.В.** Разработка высокопористого абразивного инструмента для шлифования без применения смазочно-охлаждающих сред: дисс. ... канд. техн. наук. М.: 1997. 130 с.
25. **Зубков А.Б.** Повышение эффективности глубинного шлифования жаропрочных сплавов с использованием высокопористого абразивного инструмента специальной структуры: дисс. ... канд. техн. наук. М., 1992. 125 с.
26. **Инструменты** из сверхтвердых материалов / Под ред. Н.В. Новикова. Киев: НАН Украины, 2002. 526 с.

27. **Ипполитов Г.М.** Абразивно-алмазная обработка. М.: Машиностроение. 1969. 334 с.
28. **Калашников А.С., Калашников С.Н.** Комплексная автоматизация производства зубчатых колес. М.: Машиностроение, 1991. 287 с.
29. **Карлин В.В., Хижняк Н.П.** Электрокорундовые сферы – перспективный абразивный и огнеупорный материал // Труды ВНИИАШ, 1983. С. 8–11.
30. **Кашеев В.Н.** Процессы в зоне фрикционного контакта металлов. М.: Машиностроение. 1978. 213 с.
31. **Контроль** качества абразивного инструмента акустическим методом // Методич. рекомендации. М.: НИИМаш, 1984. 60 с.
32. **Коротков А.Н.** Эксплуатационные свойства абразивных материалов. Изд-во Красноярского университета, 1992. 122 с.
33. **Кравченко Ю.Г.** Работоспособность высокопористых кругов при заточке быстрорежущего инструмента // Абразивы. М.: НИИМаш, 1977. № 12. С. 9–10.
34. **Кремень З.И., Дугин В.И., Карпова Е.И.** Высокоскоростные круги для желобов колец подшипников // Абразивы. 1974. Вып. 5. С. 1–6.
35. **Кремень З.И., Зайцева М.А., Федотова С.М.** Специализированные абразивные инструменты. М.: Машиностроение, 1986. 40 с.
36. **Кудасов Г.Ф.** Абразивные материалы и инструменты. Л.: Машиностроение, 1967. 160 с.
37. **Кудряшов Б.П.** Разработка абразивных кругов со специальной структурой для шлифования быстрорежущих сталей: дисс. ... канд. техн. наук. М., 1983. 181 с.
38. **Кузьменко Н.Г.** Сравнительные морфологические особенности зерна карбида кремния после термического воздействия // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы: тр. конф. «Шлифабразив-99». Волжский, 1999. С. 40–41.
39. **Курдюков В.И., Коротовских В.К.** Выбор состава и содержания связки высокопористых алмазных кругов // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы: тр. конф. «Шлифабразив-2003». Волжский, 2003. С. 60–63.
40. **Лурье Г.Б.** Абразивные инструменты и их эксплуатация. М.: Машиностроение, 1971. 63 с.
41. **Лурье Г.Б.** Шлифование металлов. М.: Машиностроение, 1969. 127 с.
42. **Макаров В.Ф., Семиколенных В.В., Лобов М.В.** Скоростное глубинное шлифование высокопористыми кругами из электрокорунда на керамической связке // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы: тр. конф. «Шлифабразив-2001». Волжский. 2001. С. 160–162.
43. **Мартин Дж., Дозрти Р.** Стабильность микроструктуры металлических систем. М.: Атомиздат, 1978. 280 с.
44. **Маслов Е.Н.** Основы теории шлифования. М.: Машгиз, 1951. 179 с.
45. **Маслов Е.Н.** Теория шлифования материалов. М.: Машиностроение, 1974. 320 с.
46. **Материалы** в машиностроении. Выбор и применение: справочник / под общей ред. И.В. Кудрявцева. Т. 3. Специальные стали и сплавы / под ред. Ф.Ф. Химушина. М.: Машиностроение, 1968. 446 с.
47. **Медведь Р.А., Кузина В.Ф., Барышникова М.Н.** Влияние условий резания на загрязненность воздушной среды аэрозолями и продуктами термоокислительной деструкции СОЖ // Пути повышения производительности и качества механообработки на базе эффективного применения смазочно-охлаждающих жидкостей и прогрессивных методов заточки режущего инструмента: тез. докл. семинара. М.: ЦНИИТЭ. 1981. С.41–45.
48. **Миркин Л.И.** Справочник по рентгеноструктурному анализу поликристаллов. М.: Физматгиз. 1961. 863 с.
49. **Мурдасов А.В.** Оценка прочности керамической связки // Абразивы. М.: НИИМаш, 1976. № 4. С. 8–10.
50. **Муцянко В.И.** Основы выбора шлифовальных кругов и подготовка их к эксплуатации. Л.: Машиностроение, 1987. 163 с.
51. **Нетребко В.П., Коротков А.Н.** Прочность шлифовальных кругов. М.: Николь, 1992. 104 с.
52. **Носенко В.А.** Шлифование адгезионно-активных металлов. М.: Машиностроение, 2000. 261 с.
53. **Оптимизация** технологии глубинного шлифования // С.С. Силин, Б.Н. Леонов, В.А. Хрульков и др. М.: Машиностроение, 1989. 120 с.
54. **Основные** вопросы высокопроизводительного шлифования / под редакцией Е.Н. Маслова. М.: Машгиз, 1960. 196 с.
55. **Основы** проектирования и технология изготовления абразивного и алмазного инструмента / Ю.М. Ковальчук, В.А. Букин, Б.А. Глазовский и др. Под общей ред. Ю.М. Ковальчука. М.: Машиностроение, 1984. 288 с.
56. **Островский В.И.** Оптимизация условий эксплуатации абразивного инструмента // Обзор. М.: НИИМаш, 1984. 56 с.
57. **Островский В.И.** Теоретические основы процесса шлифования. Л.: Изд-во ЛГУ, 1981, 142 с.
58. **Пандит С.М., Нассирпур Ф., Вус М.** Стохастическая геометрия анизотропных слу-

чайных поверхностей и ее приложения к абразивным лентам // Конструирование и технология машиностроения. 1977. № 1. С. 160–167.

59. **Попов С.А., Ананьян Р.В.** Шлифование высокопористыми кругами. М.: Машиностроение, 1980. 79 с.

60. **Предельно допустимые** концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны: Гигиенические нормативы. М.: Российский регистр потенциально опасных химических и биологических веществ Минздрава России, 1998. 208 с.

61. **Производство** зубчатых колес газотурбинных двигателей / Ю.С. Елисеев, В.В. Крымов, И.П. Нежурин и др. М.: Высшая школа, 2001. 493 с.

62. **Профильное** глубинное шлифование зубчатых колес / Ю.С. Елисеев, В.С. Новиков, В.К. Старков, С.А. Рябцев // Вестник машиностроения. 2001. № 1. С. 41–44.

63. **Пташников В.С.** Совершенствование инструмента из эльбора для скоростного шлифования колец подшипников // Станки и инструмент. 1987. № 7. С. 21–23.

64. **Резников А.Н.** Абразивная и алмазная обработка материалов: Справочник. М.: Машиностроение, 1977. 391 с.

65. **Роль дислокаций** в упрочнении и разрушении металлов / отв. редактор В.С. Иванова. М.: Наука, 1965. 180 с.

66. **Ружичка В.** Контроль зубчатых колес. М.: Машгиз, 1960. 323 с.

67. **Рябцев С.А.** Влияние неуравновешенности массы шлифовальных кругов на их разрывную скорость // Вестник машиностроения. 2004. № 1. С. 47–49.

68. **Селиванов Ю.Т., Першин В.Ф.** Расчет и проектирование циркуляционных смесителей сыпучих материалов без внутренних перемешивающих устройств. М.: Машиностроение-1, 2004. 119 с.

69. **Склерометрия.** Теория, методика, применение испытаний на твердость царапанием. М.: Наука, 1968. 219 с.

70. **Современные** виды абразивных инструментов: сб. науч. тр. М.: ВНИИТЭМР, 1991. 117 с.

71. **Современные** технологии в производстве газотурбинных двигателей / под ред. А.Г. Братухина, Г.К. Язова, Б.Е. Карасева. М.: Машиностроение, 1997. 416 с.

72. **Справочник** инструментальщика / И.А. Ординарцев, Г.В. Филиппов, А.Н. Шевченко и др.; под общ. ред. И.А. Ординарцева. Л.: Машиностроение. 1987. 846 с.

73. **Справочник** по обработке материалов резанием / Ф.Н. Абрамов, В.В. Коваленко, В.Е. Любимов и др. Киев: Техніка, 1983. 239 с.

74. **Справочник** по технологии резания материалов / под ред. Шпура Г., Штефле Т. Кн. 2. М.: Машиностроение, 1985. 688 с.

75. **Старков В.К., Белоусова Н.И.** Шлифование цементованных и закаленных сталей высокоструктурными кругами // Авиационная промышленность. 1972, № 6. С. 44–47.

76. **Старков В.К.** Высокопористый абразивный инструмент нового поколения // Вестник машиностроения. 2002. № 4. С. 56–62.

77. **Старков В.К.** Дислокационные представления о резании металлов М.: Машиностроение, 1979. 160 с.

78. **Старков В.К.** Исследование процесса шлифования тугоплавких сплавов на основе вольфрама и молибдена: дисс. ... канд. техн. наук. М., 1967. 246 с.

79. **Старков В.К., Макаров О.В.** Критерии конкурентоспособности высокопористого абразивного инструмента // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы: тр. конф. «Шлифабразив-98». Волжский, 1998. С. 48–51.

80. **Старков В.К.** Обработка резанием. Управление стабильностью и качеством в автоматизированном производстве. М.: Машиностроение, 1989. 296 с.

81. **Старков В.К., Рябцев С.А.** Влияние технологических свойств высокопористых кругов на процесс глубинного шлифования жаропрочных сплавов // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы: тр. конф. «Шлифабразив-99». Волжский. 1999. С. 118–121.

82. **Старков В.К., Рябцев С.А., Големи С.** О роли дисбаланса в формировании прочностных характеристик шлифовальных кругов // Конструкторско-технологическая информатика: тр. V Междунар. конгресса. М.: ИЦ ГОУ МГТУ «Станкин», «Янус-М», 2005. С. 213–214.

83. **Старков В.К., Солодунин Н.Н.** Формирование поверхностного слоя при глубинном шлифовании зубчатых колес // Справочник. Инженерный журнал. 2002. № 9. Приложение. Инженерия поверхности. С. 20–22.

84. **Старков В.К.** Теоретические предпосылки профильного глубинного шлифования зубчатых колес // Вестник машиностроения. 2002. № 3. С. 49–55.

85. **Старков В.К.** Технологические методы повышения надежности обработки на станках с ЧПУ. М.: Машиностроение, 1984. 119 с.

86. **Степанов Ю.С., Гусев В.Г., Афанасьев Б.И.** Дискретное внутреннее шлифование. М.: Машиностроение-1, 2004. 190 с.

87. **Технологические** процессы механической и физико-механической обработки в

авиадвигателестроении: учебное пособие / под общ. ред. В.Ф. Безязычного. М.: Машиностроение, 2001. 290 с.

88. **Технологическое** обеспечение проектирования и производства газотурбинных двигателей / под ред. Б.Н. Леонова и А.С. Новикова. Рыбинск, 2000. 407 с.

89. **Узунян М.Д.** Микроскопический подход в теории шлифования // Вопросы механики и физики процессов резания и холодного пластического деформирования. Киев: НАН Украины. 2002. С. 464–471.

90. **Федотова С.М., Казанская В.В.** Высокопористый абразивный инструмент на керамической связке с применением различных порообразующих наполнителей // Абразивы. 1980. Вып. 12. С. 5–8.

91. **Физико-механические** и эксплуатационные свойства высокопористых фасонных шлифовальных кругов для заточки лезвийного инструмента / Ю.С. Батайсков, В.А. Носенко, А.В. Лежнева и др. // Тр. конф. INTERGRIND'91, ч. I. Л. 1991. С. 82–87.

92. **Физическая акустика.** Т. III. 2.А. Влияние дефектов на свойства твердых тел / под ред. У. Мэзона. М.: Мир, 1969. 578 с.

93. **Филимонов Л.Н.** Высокоскоростное шлифование. Л.: Машиностроение, 1979. 248 с.

94. **Финкель В.М.** Физические основы торможения разрушения. М.: Metallurgia, 1978. 359 с.

95. **Шлифование** зубчатых колес и соединений высокопористыми кругами / Ю.С. Елисеев, Н.Н. Солодухин, В.С. Новиков, В.К. Старков и др. // Технология машиностроения. 2001. № 6. С. 15–18.

96. **Эльянов В.Д.** Эксплуатационные возможности шлифовальных кругов: Обзор информ. М.: НИИмаш, 1976. 52 с. Сер. С-2 (Инструментальная и абразивно-алмазная промышленность).

97. **Эфрос М.Г., Миронюк В.С.** Современные абразивные инструменты / под ред. З.И. Кремня. Л.: Машиностроение, 1987. 158 с.

98. **Эфрос М.Г., Федотова С.М.** Основные направления исследований в области изготовления современного абразивного инструмента на керамической связке // Тр. конф. INTERGRIND'91, ч. I. Л. 1991. С. 11–16.

99. **Якимов А.В.** Абразивно-алмазная обработка фасонных поверхностей. М.: Машиностроение, 1984. 311 с.

100. **Якимов А.В.** Качество изготовления зубчатых колес. М.: Машиностроение, 1979. 279 с.

101. **Якимов А.В.** Оптимизация процесса шлифования, М.: Машиностроение, 1975. 176 с.

102. **Ящерицын П.И., Зайцев А.Г.** Повышение эксплуатационных свойств шлифованных поверхностей и режущих свойств абразивно-алмазного инструмента. Минск: Наука и техника, 1972. 384 с.

103. **Amin** und borsaufreie Kuhlsehmierstoffe // Maschine. 1994. N 7–8. P. 24.

104. **Boucke T.** Zahnflankenprofilschleifen mit keramisch-gebundenen CBN-Schleifscheiben. Aachen: Shaker, 1994. 118 S.

105. **Brinksmeier E., Brockhoff T., Walter A.** Minimalmengenkühlschmierung und Trockenbearbeitung beim Schleifen // Harterei-Technische Mitteilungen – HTM, 1997. Bd. 52. № 3. S. 166–170.

106. **Brinksmeier E.** Randzonenanalyse geschliffener Werkstucke: Dr.-kng. Dissertation / Universitat Hannover. Dusseldorf: VDI-Verlag, 1982. 145 S.

107. **Brinksmeier E., Wilke T.** Influence of Process Design on Residual Grinding Stresses // 1-st Europ. Conf. on Grinding, Aachen, 6–7 Nov, 2003. Fortschr.-Ber. VDI. Reihe 2. № 643. P. 15-1–15-27.

108. **Bruckner K.** Industrie Anzeiger. 1960. № 36. P. 533–558.

109. **Cai R., Rowe W.B.** Assessment of vitrified CBN wheels for precision grinding / Loughborough Univ. Liverpool John Moores Univ // Intern. J. of Machine Tools and Manufacture. 2004. Bd. 44. № 12/13. S. 1391–1402.

110. **Dahlmanns F.** Trockenschleifen unter industrialen Randbedingungen // Konferenz-Einzelbericht "Umweltverträgliches Schleifen". Ökologie als ökonomie der Zukunft. Schleiftechnisches Kolloquium Aachen, 18–19 Mai, 2000. S. 233–246.

111. **Dorr I., Sahm A.** Erfahrungen mit Minimalmengen-Schmierung // Werkstatt und Betrieb. 1999. Bd. 132. № 4. P. 39–48.

112. **Ein Schnapsglas** ist genug // Produktion. 1997. № 25–26. P. 17.

113. **Glasson T.J.** Cloudy forecast for dry machining // Amer. Mach. 1997. № 3. P. 41.

114. **Guo C., Malkin S.** Analysis of Energy Partition in Grinding // Journal of Engineering for Industry. 1995. V. 117. Febr. P. 55–61.

115. **Fedoseev O.B., Malkin S.** Analysis of tempering and rehardening for grinding of hardened steels // Trans. of the ASME. Journal of Engineering for Industry. 1991. V. 113. Nov. S. 388–394.

116. **Heidtman W.** Optimierung beim Bandschleifen // Metalloberfläche. 1998. B. 52. № 8. P. 609–613.

117. **Hitchiner M.** Zusammenarbeit von CBN-Schleifscheiben und Hochgeschwindigkeitsschleif-

- maschinen. Die perfekte Paarung für die Autoteile-Produktion. Saint-Gobain Abrasives, Worcester // Amer. Mach. 2004. Bd. 148. № 9. S. 58–61.
118. **Jones N.** Высокопроизводительное глубинное шлифование никелевых сплавов // Machinery. 2003. N 4067. P. 27.
119. **Kempa B.** Zahnflankenprofilschleifen mit galvanisch-gebundenem CBN. Aachen: Shaker. 2000. 129 S.
120. **Klocke F., Friedrich D.** Spitzenloses Rundscheifen mit CBN-Forschungsergebnisse am WLZ in Aachen. RWTH Aachen // Industrial Diamond Review. 2003. Bd. 63. № 4. S. 29–32.
121. **König W., Lortz W.** Three-Dimensional Measurement of the Grinding // Wheel Surface-Evaluation and Effect of Cutting Behavior. CIRP Annals. 1976. Vol. 25. № 1. P. 197–202.
122. **Lubrication:** l'assurer sans huile, un réalité // Mach. prod. 1993. № 597. P. 72–73.
123. **Lucovics I., Krystufek M.** High Speed grinding of Polymers and metals // ICPM. 2003. Praha, CR. P. 194–200.
124. **Maier D.** Tracken gewinnsebohren // Werkstatt und Betr. 1995. № 3. S. 193–194.
125. **Malkin S.** Grinding Technology // Ellis Horwood Limited. UK, 1989. 269 p.
126. **Matsui S.** Some considerations as to successive cutting edge spacing on wheel surface in grinding process // Technology Reports, Tohoku University. 1977. Vol. 42. N 1. P. 61–75.
127. **Minke E.** Auswirkung der Additivierung eines Schleiföls auf Prozess – und Ergebnisgrößen beim Schleifen von Schnellarbeitsstahl // Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren. Verfahren und Maschinen: 61 Ausgabe. Essen: Vulkan-Verlag, 2004. S. 49–64.
128. **Minke E., Giwerzew A.** CD-Grinding at Increased Cutting Speeds // 1-st Europ. Conf. on Grinding. Aachen. 6–7 Nov. 2003, Fortschr.-Ber. VDI, Reihe 2. № 643. P. 11–11–18.
129. **Nishihava T., Okuyama S., Kawamura S.** Untersuchungen zur geometrischen Genauigkeit beim Umfangsflachschleifen. Einfluss der Wärmeabfuhr durch das Kühlschmiermittel auf die thermische Deformation // Intern. J. of the Japan Society for Precision Engineering. 1993. Bd. 27. № 3. S. 241–246.
130. **Noechl A.** Hochgeschwindigkeitstiefen- und Oberflächenbearbeitung von Bauteilen aus Nickellegierungen // Werkstatt und Betrieb. 2002. № 6. S. 98–103.
131. **Noichl H.** Aufbau und Einsatz von Hochleistungsschleifwerkzeugen // Konferenz-Einzelbericht "Wirtschaftliche Schleifverfahren" – Stand und Entwicklungstendenzen in der Schleiftechnik, DIF, Dt, IndustrieForum f. Technologie, Mettmann. 1997. S. 1–38.
132. **Nonchlorinated** coolant easily recycled // Amer. Mach. 1994. № 11. P. 89.
133. **Oppelt P., Fischbacher M., Zepfenfeld C.** Process Relations and Machine Requirements on Speed Stroke Grinding of Turbine Materials // 1-st Europ. Conf. on Grinding. Aachen, 6–7 Nov. 2003, Fortschr.-Ber. VDI. Reihe 2. № 643. P. 1–1–1–17.
134. **Rauch I., Oberländer J.** CBN beim spitzenlosen Außen-Rundscheifen. Mikrosa Leipzig // Werkstatt und Betrieb. 1998. Bd. 131. № 6. S. 562–566.
135. **Redington P.** Применение КНБ в авиакосмической промышленности // Modern Machine Shop. 2001. V. 74. № 3. P. 53–54.
136. **Schiele L.K.** Hanter krankungen musen nicht sein // Produktion 1993. № 6. S. 8.
137. **Sluban C.A.** Selecting the Right Cutting and Grinding Fluids // Tool and Prod. 1994. № 2. P. 40–50.
138. **Soo S.** Обзор технологии и режимов шлифования никелевых сплавов в авиационной промышленности кругами из сверхтвердых материалов // IDR (Industry Diamond Review). 2002. № 2. S. 109–116.
139. **Spur G., Brucher T., Liebe I.** Kuhlsmierung beim Schleifen Keramischer Werkstoffe // Konferenz-Einzelbericht "Bearbeitung neuer Werkstoffe". Tagung d. VDI-Ges. Produktionstechnik (ADB). Aachen, 30 sep. – 1 okt 1996. VDI-Berichte. 1996. Bd. 1276. S. 275–288.
140. **Starkov V.K., Durr H., Herrbach S., Kunz S., Winkler R.** Umweltverträgliche Schleifbearbeitung // Dima (die maschine). 1996. 7/8. S. 52–59.
141. **Stephenson D.J., Jin T., Corbett J.** High Efficiency Deep Grinding of a Low Alloy Steel with Plated CBN Wheels / School of Industrial and Manufacturing Science. Cranfield University. Cranfield. Bedford // Annals of the CIRP. 2002. Vol. 51. № 1.
142. **Tonsshoff H.K., Wobker H.G., Brunner G., Kroos F.** Möglichkeiten und Grenzen des Trockenschleifens gehärteter Stähle // Harterei – Technische Mitteilungen – HTM. 1995. Bd. 50. № 2. S. 78–85.
143. **Tso P.L.** Zum Schleifen von Inconel 718 // Journal of Materials Processing Technology. 1995. B. 55. № 3–4. S. 421–426.
144. **Weinert K., Kempmann D., Kötter D.** Schleifen von Formgedächtnislegierungen // Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren: 61 Ausgabe. Essen: Vulkan-Verlag, 2004.
145. **A.C. № 1355470 A1 СССР, МКИ B24D 3/06.** Масса для изготовления алмазного инструмента. 1987.