

**ДЛЯ КУЗНЕЦОВ ВСЕХ ОТРАСЛЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

---

**А.С. Матвеев, В.А. Кочетков**

# **СПРАВОЧНИК КУЗНЕЦА**

*Под редакцией В.Ф. Безъязычного*



**МОСКВА  
«МАШИНОСТРОЕНИЕ»  
2011**

УДК 621.7  
ББК 34.623  
М-33

**Матвеев А.С., Кочетков В.А.**

М-33 Справочник кузнеца / под ред. В.Ф. Безъязычного. М.: Машиностроение, 2011. 360 с.: ил.

ISBN 978-5-94275-579-9

Представлены сведения о материалах, применяемых в авиационном двигателе-строении, краткие данные о физической сущности пластической деформации, основ-ном оборудовании цехов кузнечно-штамповочного производства, используемой осна-стке, нагревательных устройствах и режимахковки и штамповки, а также контроля температур при нагреве металла. Показана роль обработки материалов давлением в создании нанокристаллической структуры материалов.

Приведены сведения об основных кузнечных и штамповочных операциях и произ-водственных методах контроля качества поковок и штамповок. Рассмотрены вопросы термической обработки поковок и штамповок.

Дано понятие "специальный процесс", изложены требования, предъявляемые к производственному персоналу и используемому оборудованию.

Справочник рекомендуется для подготовки рабочих на предприятиях, а также в качестве учебного пособия для обучения специалистов среднего профессионального образования.

УДК 621.7  
ББК 34.623

ISBN 978-5-94275-579-9

© Матвеев А.С., Кочетков В.А., 2011 г.

© ООО "Издательство Машиностроение", 2011 г.

# ОГЛАВЛЕНИЕ

|                                                                                          |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>ОТ АВТОРОВ</b> .....                                                                  | 7   |
| <b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....                                                                    | 8   |
| <b>Глава 1. МАТЕРИАЛЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В АВИАЦИОННОМ<br/>МОТОРОСТРОЕНИИ</b> .....            | 9   |
| 1.1. Стали и сплавы на основе железа .....                                               | 9   |
| 1.2. Сплавы на основе никеля .....                                                       | 11  |
| 1.3. Сплавы цветных металлов .....                                                       | 43  |
| 1.3.1. Сплавы на основе алюминия .....                                                   | 43  |
| 1.3.2. Сплавы на основе магния .....                                                     | 43  |
| 1.3.3. Сплавы на основе меди .....                                                       | 43  |
| 1.4. Сплавы на основе титана .....                                                       | 60  |
| 1.5. Сплавы на основе тугоплавких металлов .....                                         | 78  |
| 1.5.1. Сплавы на основе кобальта .....                                                   | 78  |
| 1.5.2. Сплавы на основе хрома .....                                                      | 78  |
| 1.5.3. Сплавы на основе ниобия .....                                                     | 79  |
| 1.5.4. Сплавы на основе молибдена .....                                                  | 80  |
| 1.5.5. Штамповые стали .....                                                             | 81  |
| <b>Глава 2. СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ СЛИТКОВ И ЗАГОТОВОК</b> .....                              | 85  |
| 2.1. Методы выплавки сталей и сплавов .....                                              | 85  |
| 2.1.1. Получение слитков в вакуумной индукционной печи .....                             | 85  |
| 2.1.2. Получение слитков в вакуумно-дуговой печи с расходуемым<br>электродом .....       | 85  |
| 2.1.3. Получение слитков электронно-лучевым переплавом .....                             | 86  |
| 2.1.4. Получение слитков плазменно-дуговым переплавом .....                              | 87  |
| 2.1.5. Получение слитков методом электрошлакового переплава .....                        | 87  |
| 2.2. Порошковая металлургия .....                                                        | 88  |
| 2.2.1. Основные сведения о порошковой металлургии .....                                  | 88  |
| 2.2.2. Основные методы получения порошков .....                                          | 89  |
| 2.2.3. Приготовление шихты, формование заготовок и изделий .....                         | 90  |
| <b>Глава 3. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О ФИЗИЧЕСКОЙ СУЩНОСТИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ<br/>ДЕФОРМАЦИИ</b> ..... | 92  |
| 3.1. Строение металлов и сплавов .....                                                   | 92  |
| 3.1.1. Общие вопросы .....                                                               | 92  |
| 3.1.2. О моно- и поликристаллах .....                                                    | 92  |
| 3.2. Физическая природа деформации металлов .....                                        | 95  |
| 3.2.1. Общие сведения .....                                                              | 95  |
| 3.2.2. Дислокации .....                                                                  | 99  |
| 3.3. Изменение свойств металлов в результате пластической деформации .....               | 102 |
| 3.4. Холодная и горячая пластическая деформация .....                                    | 103 |
| <b>Глава 4. НАГРЕВ И НАГРЕВАТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА</b> .....                                 | 106 |
| 4.1. Требования к нагреву .....                                                          | 106 |
| 4.1.1. Общие вопросы .....                                                               | 106 |
| 4.1.2. Окисление и обезуглероживание стали и меры борьбы с ними .....                    | 107 |
| 4.2. Виды топлива и устройства для его сжигания .....                                    | 109 |
| 4.2.1. Жидкое топливо .....                                                              | 110 |
| 4.2.2. Газообразное топливо .....                                                        | 110 |
| 4.2.3. Топливосжигающие устройства .....                                                 | 111 |

|                                                                                                    |            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.3. Нагревательные печи кузнечно-штамповочных цехов . . . . .                                     | 115        |
| 4.4. Нагревательные устройства . . . . .                                                           | 124        |
| 4.5. Автоматическое регулирование рабочей температуры печи . . . . .                               | 142        |
| <b>Глава 5. ТЕМПЕРАТУРНЫЕ РЕЖИМЫ КОВКИ И ШТАМПОВКИ . . . . .</b>                                   | <b>146</b> |
| 5.1. Общие вопросы . . . . .                                                                       | 146        |
| 5.2. Диаграмма состояния железоуглеродистых сплавов . . . . .                                      | 147        |
| 5.3. Влияние нагрева на структуру и механические свойства стали . . . . .                          | 149        |
| 5.4. О режиме нагрева заготовок дляковки и штамповки . . . . .                                     | 150        |
| 5.5. Охлаждение поковок и штамповок . . . . .                                                      | 152        |
| 5.6. Недостатки процессов нагрева и горячего деформирования металлов . . . . .                     | 152        |
| <b>Глава 6. КОНТРОЛЬ ТЕМПЕРАТУР ПРИ НАГРЕВЕ МЕТАЛЛА . . . . .</b>                                  | <b>154</b> |
| 6.1. Контроль температуры термоэлектрическими датчиками . . . . .                                  | 154        |
| 6.2. Контроль температуры оптическими и радиационными пирометрами . . . . .                        | 157        |
| 6.3. Регистрирующие приборы . . . . .                                                              | 159        |
| <b>Глава 7. ОБОРУДОВАНИЕ ЦЕХОВ КОВКИ И ШТАМПОВКИ . . . . .</b>                                     | <b>163</b> |
| 7.1. Классификация оборудования . . . . .                                                          | 163        |
| 7.1.1. Общие вопросы . . . . .                                                                     | 163        |
| 7.1.2. Паровоздушные молоты . . . . .                                                              | 164        |
| 7.1.3. Механические молоты . . . . .                                                               | 167        |
| 7.1.3.1. Фрикционные молоты с доской . . . . .                                                     | 167        |
| 7.1.3.2. Молоты с гибкой связью . . . . .                                                          | 168        |
| 7.1.3.3. Бесшаботные молоты . . . . .                                                              | 169        |
| 7.1.4. Винтовые прессы (молоты) . . . . .                                                          | 170        |
| 7.1.5. Гидравлические прессы . . . . .                                                             | 173        |
| 7.1.6. Кривошипные горячештамповочные прессы . . . . .                                             | 177        |
| 7.1.7. Горизонтально-ковочные машины . . . . .                                                     | 179        |
| 7.1.7.1. Общие вопросы . . . . .                                                                   | 179        |
| 7.1.7.2. Типы поковок, изготавливаемых на ГКМ . . . . .                                            | 181        |
| 7.1.8. Машины специального назначения . . . . .                                                    | 183        |
| 7.1.8.1. Ковочные валцы . . . . .                                                                  | 183        |
| 7.1.9. Раскатка кольцевых заготовок . . . . .                                                      | 186        |
| 7.1.9.1. Общие вопросы . . . . .                                                                   | 186        |
| 7.1.9.2. Способ и устройство для повышения точности<br>раскатываемых кольцевых заготовок . . . . . | 189        |
| 7.1.9.3. Электровысадочные машины . . . . .                                                        | 195        |
| 7.1.9.4. Вертикально-ковочные и радиально-обжимные машины . . . . .                                | 196        |
| 7.1.10. Основные характеристики оборудования дляковки<br>и штамповки . . . . .                     | 197        |
| 7.1.11. Выбор оборудования . . . . .                                                               | 197        |
| 7.2. Вспомогательное оборудование . . . . .                                                        | 199        |
| <b>Глава 8. ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ РУЧНОЙ КОВКИ И КОВКИ НА МОЛОТАХ . . . . .</b>                           | <b>202</b> |
| 8.1. Инструмент для ручнойковки . . . . .                                                          | 202        |
| 8.1.1. Основной технологический инструмент для ручнойковки . . . . .                               | 202        |
| 8.2. Основной технологический инструмент для машиннойковки . . . . .                               | 205        |
| 8.3. Ручной поддерживающий инструмент для ручнойковки<br>на молотах . . . . .                      | 209        |
| 8.4. Некоторые правила изготовления и эксплуатации кузнечного<br>инструмента . . . . .             | 211        |

|                                                                                                           |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Глава 9. ОСНОВНЫЕ КУЗНЕЧНЫЕ ОПЕРАЦИИ</b>                                                               | 213 |
| 9.1. Осадка                                                                                               | 213 |
| 9.1.1. Общие вопросы                                                                                      | 213 |
| 9.1.2. Разновидности осадки                                                                               | 216 |
| 9.2. Протяжка                                                                                             | 217 |
| 9.2.1. Общие вопросы                                                                                      | 217 |
| 9.2.2. Протяжка на оправке                                                                                | 218 |
| 9.3. Раскатка                                                                                             | 219 |
| 9.4. Скручивание                                                                                          | 220 |
| 9.5. Прошивка                                                                                             | 221 |
| <b>Глава 10. ШТАМПОВКА НА ПРЕССАХ И МОЛОТАХ</b>                                                           | 223 |
| 10.1. Способы горячей объемной штамповки                                                                  | 223 |
| 10.2. Штамповка на молотах                                                                                | 226 |
| 10.2.1. Основные этапы разработки технологического процесса                                               | 227 |
| 10.3. Штамповка на кривошипных горячештамповочных прессах                                                 | 243 |
| 10.4. Штамповка на электровинтовых прессах                                                                | 246 |
| 10.5. Штамповка на гидравлических прессах                                                                 | 248 |
| 10.6. Изотермическая штамповка                                                                            | 249 |
| <b>Глава 11. ОБРАБОТКА ДАВЛЕНИЕМ АВИАЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ</b>                                               | 254 |
| 11.1. Обработка давлением легированных тепло- и коррозионно-стойких сталей                                | 254 |
| 11.2. Обработка давлением жаропрочных сталей и сплавов на основе железа и никеля                          | 258 |
| 11.3. Обработка давлением титановых сплавов                                                               | 264 |
| 11.4. Обработка давлением сплавов на основе алюминия                                                      | 270 |
| 11.5. Обработка давлением магниевых сплавов                                                               | 274 |
| <b>Глава 12. КОНТРОЛЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА И КАЧЕСТВА ПОКОВОК И ШТАМПОВОК</b>                        | 278 |
| 12.1. Понятие "специальный процесс"                                                                       | 278 |
| 12.2. Требования к персоналу и оборудованию, аттестация персонала и оборудования                          | 279 |
| 12.3. Входной контроль исходных материалов                                                                | 281 |
| 12.4. Технологический контроль качества выполнения процессаковки и штамповки                              | 281 |
| 12.5. Контроль геометрической формы и размеров поковок и штамповок                                        | 283 |
| 12.6. Инструменты и приборы, применяемые для контроля геометрической формы и размеров поковок и штамповок | 283 |
| 12.7. Окончательный контроль                                                                              | 291 |
| <b>Глава 13. ДЕФЕКТЫ ПРИ КОВКЕ И ШТАМПОВКЕ</b>                                                            | 295 |
| 13.1. Дефекты исходного материала                                                                         | 295 |
| 13.2. Дефекты, возникающие в процессе изготовления поковок и штамповок                                    | 297 |
| 13.2.1. Общие вопросы                                                                                     | 297 |
| 13.2.2. Основные дефекты поковок, изготавливаемых на молотах                                              | 299 |
| 13.2.3. Основные дефекты при горячей объемной штамповке на кривошипных горячештамповочных прессах         | 301 |
| 13.2.3.1. Общие вопросы                                                                                   | 301 |
| 13.2.3.2. Основные дефекты, возникающие при штамповке выдавливанием                                       | 302 |
| 13.2.4. Некоторые виды дефектов при штамповке поковок на горизонтально-ковочных машинах                   | 303 |
| 13.2.5. Основные виды дефектов при вальцовке                                                              | 305 |

|                                                                                                             |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Глава 14. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОБЪЕМНОЙ ШТАМПОВКИ</b>                                    | 307 |
| 14.1. Общие вопросы                                                                                         | 307 |
| 14.2. Пример использования программы QForm 3D в производстве компрессорных лопаток ГТД                      | 309 |
| <b>Глава 15. ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ПОКОВОК И ШТАМПОВОК</b>                                                  | 315 |
| 15.1. Назначение термической обработки                                                                      | 315 |
| 15.1.1. Общие вопросы                                                                                       | 315 |
| 15.1.2. Классификация основных видов термической обработки                                                  | 317 |
| 15.2. Отжиг первого рода                                                                                    | 318 |
| 15.3. Отжиг второго рода                                                                                    | 321 |
| 15.4. Закалка                                                                                               | 323 |
| 15.5. Отпуск                                                                                                | 324 |
| 15.6. Термомеханическая обработка                                                                           | 325 |
| 15.6.1. Термомеханическая обработка сталей                                                                  | 325 |
| 15.6.2. Термомеханическая обработка стареющих сплавов                                                       | 326 |
| 15.7. Термообработка поковок и штамповок из углеродистых и легированных конструкционных сталей              | 328 |
| 15.8. Термообработка поковок и штамповок из никелевых сплавов                                               | 334 |
| 15.9. Термообработка поковок и штамповок из титановых сплавов                                               | 334 |
| 15.10. Термообработка поковок и штамповок из цветных сплавов                                                | 334 |
| <b>Глава 16. НАНОТЕХНОЛОГИЯ И ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ ДАВЛЕНИЕМ</b>                                            | 335 |
| 16.1. Введение                                                                                              | 335 |
| 16.2. Способы получения объемных конструкционных наноструктурных материалов методами их обработки давлением | 337 |
| 16.3. Компактирование нанопорошков прессованием                                                             | 338 |
| 16.4. Методы интенсивной пластической деформации                                                            | 339 |
| <b>Глава 17. ТЕХНИЧЕСКОЕ НОРМИРОВАНИЕ И ОПЛАТА ТРУДА</b>                                                    | 346 |
| <b>Глава 18. ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ В КУЗНЕЧНО-ШТАМПОВОЧНЫХ ЦЕХАХ</b>                                         | 349 |
| 18.1. Общие требования безопасности                                                                         | 349 |
| 18.2. Требования безопасности перед началом работы                                                          | 350 |
| 18.3. Требования безопасности во время работы                                                               | 350 |
| 18.4. Требования безопасности в аварийных ситуациях                                                         | 352 |
| 18.5. Требования безопасности по окончании работы                                                           | 352 |
| 18.6. Требования техники безопасности при работе на нагревательном оборудовании                             | 353 |
| 18.6.1. Общие требования                                                                                    | 353 |
| 18.6.2. Требования безопасности в аварийных ситуациях                                                       | 355 |
| 18.6.3. Требования безопасности по окончании работы                                                         | 355 |
| <b>Список литературы</b>                                                                                    | 356 |

## ОТ АВТОРОВ

Справочник знакомит читателей со свойствами труднодеформируемых металлов, применяемых в авиадвигателестроении, энергетическом машиностроении и других производствах; способами получения металла, влияющими на качество поступающих в кузнечный цех исходных заготовок; особенностями нагрева (охлаждения) заготовок; средствами контроля температуры нагрева; применяемым оборудованием и инструментом для выполнения операцийковки и штамповки, его влиянии на качество поковок и штамповок, а также с особенностями контроля технологических процессов и качества продукции, основными видами сбоев технологических процессов и методами их корректировки.

Приведены основные этапы разработки технологииковки и штамповки заготовок, в том числе компьютерного моделирования технологического процесса изготовления лопатки авиационного двигателя. Описаны некоторые способы получения нанокристаллической структуры материала методами пластической деформации.

Дополнительно освещены вопросы организации системы качества в свете международных стандартов ИСО 9000, объяснено понятие "специальный процесс" и рассмотрены требования к его выполнению, а также отражены вопросы термической обработки поковок и штамповок, технического нормирования и оплаты труда кузнецов и штамповщиков, вопросы техники безопасности при работе на кузнечно-штамповочном и термическом оборудовании.

В состав справочника в сжатой форме включены не только информационные материалы, известные по научно-технической литературе, но и сведения в области горячей обработки металлов давлением и организации кузнечно-штамповочного производства в ОАО "НПО "Сатурн" (г. Рыбинск), являющемся разработчиком и производителем современных авиационных двигателей и энергетических установок.

Авторы выражают искреннюю признательность сотруднику управления главного металлурга ОАО "НПО "Сатурн" В.Б. Быстрову, взявшему на себя труд внимательного ознакомления с представленной рукописью и сделавшему ценные замечания, сотруднику управления главного металлурга Р.А. Казакову, подготовившему материалы по компьютерному моделированию процессов штамповки, а также сотрудникам С.П. Лело, С.А. Кукушкину, оказавшим техническую помощь в подготовке материалов справочника.

Авторы выражают также глубокую благодарность главному редактору справочника д-ру техн. наук, проф. В.Ф. Безъязычному за высокий профессионализм и тщательность в подготовке к печати материалов справочника.

## ВВЕДЕНИЕ

В современных газотурбинных двигателях и энергоустановках, основные детали которых работают в среде высокоскоростных газовых потоков, при высокой температуре и значительных статических и динамических нагрузках, находят широкое применение коррозионно- и жаростойкие стали, жаропрочные стали и сплавы, титановые и алюминиевые сплавы, а также другие труднодеформируемые материалы с особыми механическими и физическими свойствами.

При этом высокие технические характеристики и надежность в эксплуатации деталей, изготовленных из этих материалов, в большинстве случаев возможно обеспечить только методами горячей обработки металлов давлением, которые позволяют получить необходимую структуру и свойства металла, существенно повышающие сопротивление детали воздействию внешних нагрузок и ее эксплуатационную надежность.

Однако изготовление из этих материалов поковок и штамповок, являющихся заготовками будущих деталей, осложняется тем, что эти материалы имеют в большинстве случаев низкую технологическую пластичность даже при их горячей обработке давлением вследствие высокого сопротивления деформированию, низкой теплопроводности, узкого температурного интервала деформирования, чувствительности к скорости и степени деформации и ряда других причин.

Успешная реализация процессов штамповки труднодеформируемых материалов, обеспечивающая качественное изготовление поковок и штамповок базируется не только на разработке оптимальных технологических процессов их формоизменения, но и на высокой квалификации исполнителей технологии: штамповщиков, кузнецов и других работников кузнечно-штамповочного производства.

Отличительной стороной справочника является включение помимо сведений справочно-информационного характера, содержащих наиболее важные данные о химическом составе, свойствах и режимах горячего деформирования и термообработки материалов, применяемых в авиационном моторостроении, сведений, носящих познавательный характер, способствующих повышению технического уровня и расширению кругозора рабочих — штамповщиков и кузнецов.

Кроме того, справочно-информационный материал может быть полезен технологам и конструкторам штамповой оснастки, мастерскому и линейному составу кузнечно-штамповочных производств, а также студентам — будущим обработчикам металла пластическим деформированием.



## Глава 1

# МАТЕРИАЛЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В АВИАЦИОННОМ МОТОРОСТРОЕНИИ

---

---

В настоящее время конструкторские успехи в области авиадвигателе- и газотурбиностроения настолько значительны, что вопрос о материалах, способных работать под нагрузкой при высоких температурах, не только оказался в числе основных, но и приобрел характер одной из главных проблем, определяющих возможности дальнейшего развития этой передовой отрасли техники. В связи с этим металлургические изыскания ведутся по двум направлениям: главное из них — это удовлетворение потребностей в материалах с высоким пределом длительной прочности при высоких температурах; другое — изыскание материалов для высоконагруженных деталей стационарных газотурбинных установок, работающих при менее высоких температурах, но рассчитанных на более длительные сроки службы.

Таким образом, появление жаропрочных материалов стало следствием интенсивного развития газотурбинной техники. История их дальнейшей эволюции тесно связана с развитием газовой турбины, сыгравшей революционную роль в создании реактивной авиации. Однако не совсем правильно представлять, что спрос на высокотемпературные металлы, вызванный появлением и становлением газовой турбины, — это единственный стимулирующий фактор развития металлургии жаропрочных сплавов. Выдающиеся успехи в разработке жаропрочных материалов вряд ли были бы возможны, если бы им не предшествовали многолетние интенсивные изыскания таких материалов для нужд энергетики, нефтяной и химической промышленности и большая теоретическая работа по изучению поведения металлов при высоких температурах.

В настоящее время в распоряжении конструкторов авиационной и газотурбинной техники имеется богатый ассортимент жаропрочных деформируемых и литейных сталей и сплавов на основе железа, никеля, титана и алюминия, способных служить материалами для тяжелонагруженных узлов и деталей турбин, работающих при различных температурах.

### 1.1. СТАЛИ И СПЛАВЫ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА

Сталь — это основной материал, широко применяемый в машино-, приборо- и авиастроении, строительстве, а также для изготовления различных инструментов. Этот материал отличается сравнительно низкой стоимостью, производится в больших количествах и обладает комплексом механических, физико-химических и технологических свойств. Стали классифицируются по химическому составу, назначению, качеству, степени раскисления и структуре.

*Классификация сталей по химическому составу.* По химическому составу стали подразделяют на углеродистые и легированные.

Стали, свойства которых в основном зависят от содержания углерода, называют углеродистыми. Углеродистые стали, в свою очередь, классифицируют по содержанию в них углерода (С): на низко- (до 0,25 % С), средне- (0,25...0,6 % С) и высокоуглеродистые (> 0,6 % С).

Легированными называют стали, в химический состав которых входят специально введенные химические элементы для придания им требуемых свойств. Легированные стали подразделяют по количеству введенных легирующих элементов на три группы: низколегированные, в которых суммарное содержание легирующих элементов до 2,5 %; среднелегированные, где содержание легирующих элементов 2,5...10 %; высоколегированные с содержанием легирующих элементов > 10 %. В зависимости от введенных легирующих элементов легированные стали бывают хромистые, марганцовистые, хромоникелевые и т.д.

*Классификация сталей по назначению.* По назначению стали делят на конструкционные, инструментальные и стали специального назначения с особыми свойствами.

Конструкционные стали представляют собой наиболее обширную группу, предназначенную для изготовления деталей машин, приборов и элементов строительных конструкций. Из конструкционных сталей можно выделить: цементируемые, азотируемые, улучшаемые, автоматные, высокопрочные и пружинно-рессорные стали.

Инструментальные стали подразделяют на стали для изготовления режущего инструмента, измерительного инструмента, для штампов холодного и горячего деформирования (штамповые стали).

Стали специального назначения — это коррозионно-, жаро- и износостойкие, жаропрочные и др.

*Классификация сталей по качеству.* По качеству стали классифицируют на стали обыкновенного качества, качественные, высококачественные, особовысококачественные. Под качеством стали понимают совокупность свойств, определяемых металлургическим процессом ее производства. Однородность химического состава, строение и свойства стали зависят от содержания вредных примесей и газов (кислорода, водорода, азота, серы и фосфора). Основными показателями для классификации сталей по качеству являются нормы содержания вредных примесей: серы (S) и фосфора (P). Стали обыкновенного качества содержат (%) до 0,06 S и 0,07 P; качественные до 0,035 S и 0,035 P; высококачественные до 0,025 S и 0,025 P и особовысококачественные до 0,015 S и 0,025 P.

*Классификация сталей по степени раскисления.* Раскислением называют процесс удаления кислорода из стали в расплавленном (жидком) состоянии. Нераскисленная сталь отмечается низкой пластичностью и подвержена хрупкому разрушению при горячей обработке давлением.

По степени раскисления стали разделяют на спокойные, полуспокойные и кипящие.

Спокойные стали — это стали с высокой степенью раскисления марганцем, алюминием и кремнием в печи или ковше. Они затвердевают в изложнице спокойно, без газообразования.

Кипящие стали — это стали раскисленные только марганцем. Они раскислены не полностью. Перед разливкой в них содержится повышенное количество кислорода, который при затвердевании слитка частично реагирует с углеродом и выделяется в виде пузырей оксида углерода CO, создавая ложное "кипение" стали.

Полуспокойные стали по степени раскисления занимают промежуточное положение между спокойными и кипящими сталями. Частично их раскисляют в печи или ковше, а частично — в изложнице с помощью содержащегося в металле углерода.

*Классификация сталей по структуре.* По структуре стали классифицируют в двух состояниях: после отжига и после нормализации. В отожженном (равновесном) состоянии стали делят на доэвтектоидные, имеющие в структуре избыточный феррит;

эвтектоидные, состоящие из перлита; заэвтектоидные, в структуре которых содержатся вторичные карбиды, выделяющиеся из аустенита; ледебуритные — с первичными (эвтектическими) карбидами; аустенитные; ферритные. По структуре после нормализации стали подразделяют на следующие классы: перлитный, мартенситный, аустенитный, ферритный.

Широко применяемые в авиационном двигателестроении деформируемые стали и сплавы на железоникелевой основе приведены в табл. 1.1. Химический состав деформируемых сталей и сплавов на основе железа представлен в табл. 1.2, а режимы термической обработки и их механические свойства — в табл. 1.3.

## 1.2. СПЛАВЫ НА ОСНОВЕ НИКЕЛЯ

В настоящее время сплавы на основе никеля нашли широкое применение в качестве жаропрочных материалов, предназначенных для работы в области температур 700...1000 °С. Их используют в газовых турбинах авиационных двигателей, корабельных силовых и энергетических установках, газовой промышленности, ракетно-космической технике, нефтехимической отрасли. В авиационном газотурбинном двигателе ~70 % от его массы составляют жаропрочные сплавы. Это диски, сопловые и рабочие лопатки турбины, элементы камеры сгорания и т.п.

В современной технической литературе существуют различные классификации сплавов на никелевой основе, например по назначению (дисковые, лопаточные, котельные и т.д.), способу производства (литейные и деформируемые); степени легирования (низко-, средне- и высоколегированные), по их работоспособности при высоких температурах (жаропрочные и жаростойкие).

Под жаропрочностью понимают способность сплава выдерживать механические нагрузки при высоких температурах в течение определенного времени, под жаростойкостью — способность сплава сопротивляться газовой коррозии при высоких температурах в ненагруженном или слабонагруженном состоянии.

Никелевые сплавы в авиационном двигателестроении обычно работают на пределе своих температурных возможностей, так как рабочие температуры часто достигают 0,8...0,85 от их температуры плавления. Современные жаропрочные сплавы на никелевой основе — это сложнолегированные материалы: в их состав входит до семи — девяти основных легирующих элементов: Mo, W, Cr, V, Nb, Co, Al, Fe, Cu, Ti. Титан, алюминий (суммарно до 8...10 %) образуют главную упрочняющую фазу —  $\gamma'$ . Хром и алюминий повышают сопротивление к газовой коррозии.

Принципы легирования никелевых сплавов одинаковы для литейных и деформируемых сплавов, но при создании последних необходимо обеспечить достаточную технологическую пластичность при обработке давлением, а литейных — удовлетворительные литейные свойства (жидкотекучесть, пористость).

Горячая пластическая деформация высоколегированных жаропрочных никелевых сплавов отличается следующими характерными особенностями:

- низкой технологической пластичностью при всех температурах деформирования;
- высоким сопротивлением деформированию, включая деформирование в однофазной области твердого раствора;
- узким температурным интервалом деформирования, достигающим до 80...100 °С;
- высокой чувствительностью к перегреву.

1.1. Основные деформируемые стали и сплавы на основе железа и области их применения

| Марка материала    | ГОСТ, ТУ                                                           | Сортамент             | Обработка давлением                                                                                                                                                                                  | Область применения                                                                           |
|--------------------|--------------------------------------------------------------------|-----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|
| 12X13              | ТУ 14-1-377–72<br>и 14-1-378–72,<br>ЧМТУ 1-518–68,<br>ГОСТ 5949–75 | Прутки, листы         | Деформируется в холодном и горячем состояниях. Интервал горячей штамповки 1150...900 °С                                                                                                              | Детали авиационные и другие слабонагруженные детали, работающие при температурах до 400 °С   |
| 20X13              |                                                                    | Прутки, листы и ленты | Деформируется в холодном и горячем состояниях. Температурный интервал штамповки 1150...900 °С                                                                                                        | Для деталей авиационных приборов и других деталей, работающих в легких коррозионных условиях |
| 30X13              |                                                                    | Прутки, листы         | Деформируется в горячем состоянии. Температурный интервал штамповки 1160...900 °С. Охлаждение после деформации медленное                                                                             | Детали, не имеющие концентраторов напряжений, работающие преимущественно на износ            |
| 40X13              |                                                                    |                       | Деформируется в горячем состоянии. Рекомендуются медленный ступенчатый нагрев перед деформацией. Температурный интервал штамповки 1150...900 °С. Рекомендуются медленное охлаждение после деформации | Детали высокой твердости (HRC > 50), работающие на износ                                     |
| 2X18N10B2 (ЭП 610) | ТУ 14-1-204–72                                                     | Прутки                | Деформируется в горячем состоянии. Температурный интервал штамповки 1180...800 °С                                                                                                                    | Азотируемые детали, работающие на износ во влажной среде при температурах до 500 °С          |

Продолжение табл. 1.1

|                                  |                                                                                   |                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                            |
|----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 12X17Г9АН4 (ЭИ 878)              | ТУ 14-1-377-72<br>и 14-1-569-73,<br>ЧМТУ 1-518-68,<br>ГОСТ 5949-75                | Прутки, полосы,<br>листы                                                                                          | Хорошо деформируется в<br>горячем состоянии. Тем-<br>пературный интервал<br>штамповки 1160...850 °С.<br>Охлаждение после де-<br>формации на воздухе                                                                                              | Детали, работающие дли-<br>тельно во всех климати-<br>ческих условиях при тем-<br>пературах до 400 °С и<br>кратковременно при тех<br>же условиях до 800 °С                 |
| 12X18Н10Т,<br>12X18Н9Т (Я1Т)     | ТУ 14-1-377-72,<br>14-1-378-72,<br>14-1-652-73<br>и 14-1-1073-74,<br>ГОСТ 5949-75 | Прутки и полосы,<br>листы, термически<br>обработанные лис-<br>ты, нагартованные<br>(без термической<br>обработки) | Хорошо деформируется<br>в холодном и горячем<br>состоянии. Температур-<br>ный интервал штампов-<br>ки 1180...850 °С. Охлаж-<br>дение после деформации<br>на воздухе                                                                              | Цельные и сварные дета-<br>ли самолетов и двигате-<br>лей, работающие при<br>температурах до 800 °С                                                                        |
| X20Н6МД2Т (ЭП 309,<br>ВНС-4)     | ТУ 14-1-892-74<br>и 14-1-905-74                                                   | Листы, ленты                                                                                                      | Деформируется в горячем<br>состоянии. Температур-<br>ный интервал штамповки<br>1160...800 °С. Охлажде-<br>ние после деформации<br>на воздухе                                                                                                     | Детали и сварные узлы,<br>работающие в атмосфер-<br>ных условиях при темпе-<br>ратурах до 300 °С и крат-<br>ковременно и при тех же<br>условиях до 800 °С                  |
| 03X11Н10М2Т (ВНС-17,<br>ЭП 678)  | ТУ 122-68<br>и 14-130-7-71                                                        | Прутки, листы,<br>ленты                                                                                           | Хорошо деформируется<br>в горячем состоянии.<br>Температурный интервал<br>штамповки 1200...<br>...900 °С. Охлаждение<br>после горячей деформа-<br>ции на воздухе                                                                                 | Детали обшивки самоле-<br>тов, работающие при<br>криогенных температу-<br>рах. При повышенных<br>температурах длительное<br>время до 400 °С, крат-<br>ковременно до 500 °С |
| 03X11Н10М2Т (ВНС-17У,<br>ЭП 679) | ТУ 14-370-7-71<br>и 14-130-62-73                                                  | Листы и ленты,<br>проволока<br>пружинная                                                                          | Деформируется в горя-<br>чем состоянии неболь-<br>шими обжатиями. Реко-<br>мендуется медленный<br>нагрев перед деформаци-<br>ей. Температурный ин-<br>тервал штамповки<br>1160...900 °С. Охлажде-<br>ние после горячей де-<br>формации медленное | Детали высокой твердос-<br>ти, работающие на изно-<br>с в условиях влажной ат-<br>мосферы (коррозионно-<br>стойкие шарикоподшип-<br>ники и т.п.)                           |
| 95X18 (ЭП 229)                   | ТУ 14-1-377-72,<br>ГОСТ 5949-75                                                   | Прутки                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                            |

Продолжение табл. 1.1

| Марка материала                    | ГОСТ, ТУ                        | Сортамент | Обработка давлением                                                                                                                          | Область применения                                                                                                |
|------------------------------------|---------------------------------|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1Х15Н4АМЗ-Ш<br>(ЭП 310-Ш, ВНС-5-Ш) | ТУ 14-1-940-74                  | Прутки    | Деформируется в горячем состоянии. Температурный интервал штамповки 1180...950 °С. Охлаждение после деформации на воздухе                    | Силовые детали и детали крепежа, работающие при температурах 180...300 °С                                         |
|                                    | ТУ 14-1-944-74,<br>ГОСТ 5949-75 |           | Деформируется в горячем и холодном состояниях. Температурный интервал штамповки 1180...900 °С. Охлаждение после горячей деформации медленное | Пружины, работающие при температурах до 350 °С в топливе, маслах и атмосферных условиях с ограниченной влажностью |
| Х11Н23Т3МР (ЭП 33, ЭИ 696М)        | ТУ 14-1-116-74,<br>ГОСТ 5949-75 |           | Удовлетворительно деформируется в горячем состоянии. Температурный интервал штамповки 1100...900 °С                                          | Пружины, работающие при температурах до 600 °С, кратковременно до 650 °С                                          |
| Х15Н27Т3МР (ЭП 700)                | ТУ 14-131-128-73                |           |                                                                                                                                              | Пружины, работающие при температурах до 650 °С                                                                    |
| 40ХН2МА (40ХНМА)                   | ГОСТ 4543-71                    |           | Деформируется в горячем состоянии. Температурный интервал штамповки 1220...800 °С                                                            | Валы, диски компрессорных машин и другие тяжело нагруженные детали, работающие при температурах до 450 °С         |
| 40Х2Н2МА                           |                                 |           |                                                                                                                                              | Валы и тяжело нагруженные детали                                                                                  |

Продолжение табл. 1.1

|                      |                                  |                |                                                                                                                                                                 |                                                                                                                       |
|----------------------|----------------------------------|----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 18Х2Н4МА             | ГОСТ 4543–71                     | Прутки         | Деформируется в горячем состоянии. Температурный интервал штамповки 1200...800 °С                                                                               | Валы, шестерни и другие тяжело нагруженные детали, работающие в интервале температур 70...450 °С                      |
|                      | 65Г                              |                | Прутки                                                                                                                                                          | Пружины, рессоры, тормозные диски                                                                                     |
|                      | 50ХФА                            |                |                                                                                                                                                                 | Тяжело нагруженные пружины с повышенными требованиями к устойчивости прочности, работающие при температурах до 300 °С |
|                      | 60С2, 60С2А                      |                |                                                                                                                                                                 | Тяжело нагруженные пружины, торсионные валы, пружинные шайбы, работающие при температурах до 250 °С                   |
| 13Х14Н3В2ФР (ЭИ 736) | ГОСТ 5949–75,<br>ТУ 14-1-3297–82 | Прутки, полосы | Деформируется в горячем состоянии. Температурный интервал штамповки 1160...850 °С. Медленные нагрев под горячую штамповку и охлаждение после горячей деформации | Для высоконагруженных деталей, дисков, стяжных болтов, лопаток компрессора, работающих при температурах до 500 °С     |
| 10Х11Н2МБФ (ЭП 609)  | ТУ 14-1-931–74                   | Прутки         | Деформируется в горячем состоянии. Температурный интервал штамповки 1160...950 °С. Медленное охлаждение после горячей деформации                                | Для сварных узлов, работающих при температурах до 600 °С                                                              |

Окончание табл. 1.1

| Марка материала               | ГОСТ, ТУ                     | Сортамент      | Обработка давлением                                                                                                                                     | Область применения                                                                                                       |
|-------------------------------|------------------------------|----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 15X12H2MФВАБ (ЭП 517)         | ТУ 14-1-1161-75              | Прутки         | Деформируется в горячем состоянии. Температурный интервал штамповки 1160...900 °С. Требуется замедленного нагрева и охлаждения после горячей деформации | Для высоконагруженных деталей двигателя, в том числе дисков и лопаток компрессора, работающих при температурах до 650 °С |
| 15X16H2AM (ЭП 479)            | ТУ14-1-948-74                |                | Деформируется в горячем состоянии. Температурный интервал штамповки 1160...900 °С. Требуется замедленного нагрева и охлаждения после горячей деформации | Для деталей двигателя, в том числе лопаток компрессора, работающих при температурах до 500 °С                            |
| 14X17H2 (ЭИ 268)              | ТУ 14-1-377-72, ГОСТ 5949-75 | Прутки, полосы |                                                                                                                                                         | Для деталей, работающих при температурах до 400 °С в условиях влажной среды                                              |
| 16X20K6H2MВФ (ЭП 768, ВНС-22) | ТУ 14-1-957-74               | Прутки         | Деформируется в горячем состоянии. Температурный интервал штамповки 1160...950 °С                                                                       | Для лопаток компрессора, работающих в условиях морского климата при температурах до 550 °С                               |



1.2. Химический состав основных деформируемых сталей  
и сплавов на основе железа

| Марка материала       | ГОСТ, ТУ     | Химический состав, % |       |                 |         |        |    |               |         |    |    |
|-----------------------|--------------|----------------------|-------|-----------------|---------|--------|----|---------------|---------|----|----|
|                       |              | Ca                   | Cu    | C               | Cr      | Ni     | Mo | W             | Nb      | Ti | Al |
| 12X13                 | ГОСТ 5632–72 | –                    |       | 0,09...<br>0,15 | 12...14 |        |    |               | –       |    |    |
|                       |              | Fe                   | Mn    | Si              | Zr      | Ce     | B  | S             | P       | N  | Co |
|                       |              | Основа               | ≤ 0,6 |                 |         | –      |    | ≤ 0,025       | ≤ 0,030 |    | –  |
|                       |              | Химический состав, % |       |                 |         |        |    |               |         |    |    |
| 20X13                 | ГОСТ 5632–72 | Ca                   | Cu    | C               | Cr      | Ni     | Mo | W             | Nb      | Ti | Al |
|                       |              | –                    |       | 0,16...<br>0,24 | 12...14 |        |    |               | –       |    |    |
|                       |              | Fe                   | Mn    | Si              | Zr      | Ce     | B  | S             | P       | N  | Co |
|                       |              | Основа               | ≤ 0,6 |                 |         | –      |    | ≤ 0,025       | ≤ 0,030 |    | –  |
| 30X13                 | ГОСТ 5632–72 | Ca                   | Cu    | C               | Cr      | Ni     | Mo | W             | Nb      | Ti | Al |
|                       |              | –                    |       | 0,25...<br>0,34 | 12...14 |        |    |               | –       |    |    |
|                       |              | Fe                   | Mn    | Si              | Zr      | Ce     | B  | S             | P       | N  | Co |
|                       |              | Основа               | ≤ 0,6 |                 |         | –      |    | ≤ 0,025       | ≤ 0,030 |    | –  |
| 40X13                 | ГОСТ 5632–72 | Ca                   | Cu    | C               | Cr      | Ni     | Mo | W             | Nb      | Ti | Al |
|                       |              | –                    |       | 0,35...<br>0,44 | 12...14 |        |    |               | –       |    |    |
|                       |              | Fe                   | Mn    | Si              | Zr      | Ce     | B  | S             | P       | N  | Co |
|                       |              | Основа               | ≤ 0,6 |                 |         | –      |    | ≤ 0,025       | ≤ 0,030 |    | –  |
| 2X18N10B2<br>(ЭП 610) | ГОСТ 5632–72 | Ca                   | Cu    | C               | Cr      | Ni     | Mo | W             | Nb      | Ti | Al |
|                       |              | –                    |       | 0,21...<br>0,28 | 17...19 | 9...11 | –  | 2,0...<br>2,5 |         | –  |    |
|                       |              | Fe                   | Mn    | Si              | Zr      | Ce     | B  | S             | P       | N  | Co |
|                       |              | –                    | ≤ 0,7 | 0,3...<br>0,8   |         | –      |    | ≤ 0,025       | ≤ 0,030 |    | –  |

Продолжение табл. 1.2

| Марка материала         | ГОСТ, ТУ        | Химический состав, % |                |        |                 |                |               |         |           |                 |        |   |
|-------------------------|-----------------|----------------------|----------------|--------|-----------------|----------------|---------------|---------|-----------|-----------------|--------|---|
|                         |                 | Ca                   | Cu             | C      | Cr              | Ni             | Mo            | W       | Nb        | Ti              | Al     |   |
| 12Х17Г9АН4<br>(ЭИ 878)  | ГОСТ 5632–72    | –                    | –              | ≤ 0,12 | 16...<br>18     | 3,5...<br>4,5  | –             |         |           |                 |        |   |
|                         |                 | Fe                   | Mn             | Si     | Zr              | Ce             | B             | S       | P         | N               | Co     |   |
|                         |                 | Основа               | 8,0...<br>10,5 | ≤ 0,8  | –               |                | ≤ 0,020       |         | ≤ 0,035   | 0,15...<br>0,25 | –      |   |
|                         |                 | Химический состав, % |                |        |                 |                |               |         |           |                 |        |   |
| Марка материала         | ГОСТ, ТУ        | Ca                   | Cu             | C      | Cr              | Ni             | Mo            | W       | Nb        | Ti              | Al     |   |
| 12Х18Н10Т               | ГОСТ 5632–72    | –                    | –              | ≤ 0,12 | 17...19         | 9...11         | –             |         | 2,6...3,2 |                 |        | – |
|                         |                 | Fe                   | Mn             | Si     | Zr              | Ce             | B             | S       | P         | N               | Co     |   |
|                         |                 | Основа               | ≤ 2,0          | –      |                 | ≤ 0,8          |               | ≤ 0,020 |           | –               |        |   |
|                         |                 | Химический состав, % |                |        |                 |                |               |         |           |                 |        |   |
| Марка материала         | ГОСТ, ТУ        | Ca                   | Cu             | C      | Cr              | Ni             | Mo            | W       | Nb        | Ti              | Al     |   |
| Х20Н6МД2Т<br>(ЭП 309)   | –               | –                    | 1,8...<br>2,5  | ≤ 0,1  | 19,5...<br>21,5 | 5,0...<br>7,5  | 1,3...<br>1,8 | –       |           | 0,40...<br>0,65 | –      |   |
|                         |                 | Fe                   | Mn             | Si     | Zr              | Ce             | B             | S       | P         | N               | Co     |   |
|                         |                 | Основа               | ≤ 1,0          | ≤ 0,8  | –               |                | ≤ 0,020       |         | ≤ 0,030   | –               |        |   |
|                         |                 | Химический состав, % |                |        |                 |                |               |         |           |                 |        |   |
| Марка материала         | ГОСТ, ТУ        | Ca                   | Cu             | C      | Cr              | Ni             | Mo            | W       | Nb        | Ti              | Al     |   |
| 03Х11Н10М2Т<br>(ЭП 678) | ТУ 14-1 4608–89 | ≤ 0,05               | –              | ≤ 0,1  | 10,0...<br>11,5 | 9,0...<br>10,5 | 1,8...<br>2,3 | –       | ≤ 0,15    | 0,7...1,1       | ≤ 0,15 |   |
|                         |                 | Fe                   | Mn             | Si     | Zr              | Ce             | B             | S       | P         | N               | Co     |   |
|                         |                 | Основа               | –              | ≤ 0,1  | ≤ 0,02*         | –              | ≤ 0,003*      | ≤ 0,01  |           | –               |        |   |
|                         |                 | Химический состав, % |                |        |                 |                |               |         |           |                 |        |   |
| Марка материала         | ГОСТ, ТУ        | Ca                   | Cu             | C      | Cr              | Ni             | Mo            | W       | Nb        | Ti              | Al     |   |
| 03Х11Н10М2Т<br>(ЭП 679) | –               | ≤ 0,05               | –              | ≤ 0,1  | 10,0...<br>11,5 | 9,0...<br>10,5 | 1,8...<br>2,3 | –       | ≤ 0,15    | 0,7...1,1       | ≤ 0,15 |   |

Продолжение табл. 1.2

|                         |          |                      |    |                 |                 |                 |                 |               |        |           |       |
|-------------------------|----------|----------------------|----|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------------|--------|-----------|-------|
| 03X11N10M2T<br>(ЭП 679) | —        | Fe                   | Mn | Si              | Zr              | Ce              | B               | S             | P      | N         | Co    |
|                         |          | Основa               | —  | ≤ 0,1           | ≤ 0,02*         | —               | ≤ 0,003*        | ≤ 0,01        | ≤ 0,01 | —         | —     |
| Марка<br>материала      | ГОСТ, ТУ | Химический состав, % |    |                 |                 |                 |                 |               |        |           |       |
|                         |          | Ca                   | Cu | C               | Cr              | Ni              | Mo              | W             | Nb     | Ti        | Al    |
|                         |          | —                    | —  | 0,9...<br>1,0   | 17...19         | —               | —               | —             | —      | —         | —     |
|                         |          | Fe                   | Mn | Si              | Zr              | Ce              | B               | S             | P      | N         | Co    |
| Марка<br>материала      | ГОСТ, ТУ | Химический состав, % |    |                 |                 |                 |                 |               |        |           |       |
|                         |          | Ca                   | Cu | C               | Cr              | Ni              | Mo              | W             | Nb     | Ti        | Al    |
|                         |          | —                    | —  | 0,11...<br>0,16 | 14,0...<br>15,5 | 4,0...<br>5,0   | 2,3...2,8       | —             | —      | —         | —     |
|                         |          | Fe                   | Mn | Si              | Zr              | Ce              | B               | S             | P      | N         | Co    |
| Марка<br>материала      | ГОСТ, ТУ | Химический состав, % |    |                 |                 |                 |                 |               |        |           |       |
|                         |          | Ca                   | Cu | C               | Cr              | Ni              | Mo              | W             | Nb     | Ti        | Al    |
|                         |          | —                    | —  | 0,11...<br>0,16 | 14,0...<br>15,5 | 4,0...<br>5,0   | 2,3...2,8       | —             | —      | —         | —     |
|                         |          | Fe                   | Mn | Si              | Zr              | Ce              | B               | S             | P      | N         | Co    |
| Марка<br>материала      | ГОСТ, ТУ | Химический состав, % |    |                 |                 |                 |                 |               |        |           |       |
|                         |          | Ca                   | Cu | C               | Cr              | Ni              | Mo              | W             | Nb     | Ti        | Al    |
|                         |          | —                    | —  | 0,11...<br>0,16 | 14,0...<br>15,5 | 4,0...<br>5,0   | 2,3...2,8       | —             | —      | —         | —     |
|                         |          | Fe                   | Mn | Si              | Zr              | Ce              | B               | S             | P      | N         | Co    |
| Марка<br>материала      | ГОСТ, ТУ | Химический состав, % |    |                 |                 |                 |                 |               |        |           |       |
|                         |          | Ca                   | Cu | C               | Cr              | Ni              | Mo              | W             | Nb     | Ti        | Al    |
|                         |          | —                    | —  | 0,10...<br>0,16 | 10,5...<br>12,0 | 1,50...<br>1,80 | 0,35...<br>0,50 | 1,6...<br>2,0 | —      | —         | —     |
|                         |          | Fe                   | Mn | Si              | Zr              | Ce              | B               | S             | P      | N         | Co    |
| Марка<br>материала      | ГОСТ, ТУ | Химический состав, % |    |                 |                 |                 |                 |               |        |           |       |
|                         |          | Ca                   | Cu | C               | Cr              | Ni              | Mo              | W             | Nb     | Ti        | Al    |
|                         |          | —                    | —  | ≤ 0,1           | 10...<br>12     | 21...<br>25     | 1,0...<br>1,6   | —             | —      | 2,6...3,2 | ≤ 0,8 |
|                         |          | Fe                   | Mn | Si              | Zr              | Ce              | B               | S             | P      | N         | Co    |
| Марка<br>материала      | ГОСТ, ТУ | Химический состав, % |    |                 |                 |                 |                 |               |        |           |       |
|                         |          | Ca                   | Cu | C               | Cr              | Ni              | Mo              | W             | Nb     | Ti        | Al    |
|                         |          | —                    | —  | ≤ 0,1           | 14...<br>16     | 25...<br>28     | 1,0...<br>1,6   | —             | —      | 2,6...3,2 | ≤ 0,5 |
|                         |          | Fe                   | Mn | Si              | Zr              | Ce              | B               | S             | P      | N         | Co    |

Продолжение табл. 1.2

| Марка материала                 | ГОСТ, ТУ                      | Химический состав, % |                 |                 |                 |                 |                 |         |        |    |    |
|---------------------------------|-------------------------------|----------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------|--------|----|----|
|                                 |                               | Ca                   | Cu              | C               | Cr              | Ni              | Mo              | W       | Nb     | Ti | Al |
| X15H2T3MP<br>(ЭП 700)           | ТУ 14-131-128–73              | Основа               | ≤ 0,60          |                 |                 | –               |                 | ≤ 0,01  | ≤ 0,02 |    | –  |
| Марка материала<br><br>40XH2MA  | ГОСТ, ТУ<br><br>ГОСТ 4543–71  | Химический состав, % |                 |                 |                 |                 |                 |         |        |    |    |
|                                 |                               | Ca                   | Cu              | C               | Cr              | Ni              | Mo              | W       | Nb     | Ti | Al |
|                                 |                               | –                    | ≤ 0,3           | 0,37...<br>0,44 | 0,6...<br>0,9   | 1,25...<br>1,65 | 0,15...<br>0,25 |         | –      |    |    |
|                                 |                               | Fe                   | Mn              | Si              | Zr              | Ce              | B               | S       | P      | N  | Co |
|                                 |                               | –                    | 0,5...<br>0,8   | 0,17...<br>0,37 |                 | –               |                 | ≤ 0,025 |        |    | –  |
| Марка материала<br><br>40X2H2MA | ГОСТ, ТУ<br><br>ГОСТ 4543–71  | Химический состав, % |                 |                 |                 |                 |                 |         |        |    |    |
|                                 |                               | Ca                   | Cu              | C               | Cr              | Ni              | Mo              | W       | Nb     | Ti | Al |
|                                 |                               | –                    | ≤ 0,3           | 0,35...<br>0,42 | 1,25...<br>1,65 | 1,35...<br>1,75 | 0,2...<br>0,3   |         | –      |    |    |
|                                 |                               | Fe                   | Mn              | Si              | Zr              | Ce              | B               | S       | P      | N  | Co |
|                                 |                               | –                    | 0,3...<br>0,7   | 0,17...<br>0,37 |                 | –               |                 | ≤ 0,025 |        |    | –  |
| Марка материала<br><br>18X2H4MA | ГОСТ, ТУ<br><br>–             | Химический состав, % |                 |                 |                 |                 |                 |         |        |    |    |
|                                 |                               | Ca                   | Cu              | C               | Cr              | Ni              | Mo              | W       | Nb     | Ti | Al |
|                                 |                               | –                    | ≤ 0,3           | 0,14...<br>0,20 | 1,35...<br>1,65 | 4,0...<br>4,4   | 0,3...<br>0,4   |         | –      |    |    |
|                                 |                               | Fe                   | Mn              | Si              | Zr              | Ce              | B               | S       | P      | N  | Co |
|                                 |                               | –                    | 0,25...<br>0,55 | 0,17...<br>0,37 |                 | –               |                 | ≤ 0,025 |        |    | –  |
| Марка материала<br><br>65Г      | ГОСТ, ТУ<br><br>ГОСТ 14959–79 | Химический состав, % |                 |                 |                 |                 |                 |         |        |    |    |
|                                 |                               | Ca                   | Cu              | C               | Cr              | Ni              | Mo              | W       | Nb     | Ti | Al |
|                                 |                               | –                    | ≤ 0,20          | 0,62...<br>0,70 |                 | ≤ 0,25          |                 |         | –      |    |    |
|                                 |                               | Fe                   | Mn              | Si              | Zr              | Ce              | B               | S       | P      | N  | Co |
|                                 |                               | –                    | 0,9...<br>1,2   | 0,17...<br>0,37 |                 | –               |                 | ≤ 0,035 |        |    | –  |

Продолжение табл. 1.2

| Марка материала           | ГОСТ, ТУ        | Химический состав, % |               |                 |                 |               |                 |                 |                 |        |    |
|---------------------------|-----------------|----------------------|---------------|-----------------|-----------------|---------------|-----------------|-----------------|-----------------|--------|----|
|                           |                 | V                    | Cu            | C               | Cr              | Ni            | Mo              | W               | Nb              | Ti     | Al |
| 50ХФА                     | –               | 0,1...<br>0,2        | ≤ 0,20        | 0,46...<br>0,54 | 0,8...<br>1,1   | ≤ 0,25        |                 |                 | –               |        |    |
| 50ХФА                     | –               | Fe                   | Mn            | Si              | Zr              | Ce            | B               | S               | P               | N      | Co |
|                           |                 | –                    | 0,5...<br>0,8 | 0,17...<br>0,37 |                 | –             |                 | ≤ 0,025         |                 |        | –  |
| Марка материала           | ГОСТ, ТУ        | Химический состав, % |               |                 |                 |               |                 |                 |                 |        |    |
|                           |                 | Ca                   | Cu            | C               | Cr              | Ni            | Mo              | W               | Nb              | Ti     | Al |
| 60С2А                     | ГОСТ 14959–79   | –                    | ≤ 0,2         | 0,58...<br>0,63 | ≤ 0,3           | ≤ 0,25        |                 |                 | –               |        |    |
|                           |                 | Fe                   | Mn            | Si              | Zr              | Ce            | B               | S               | P               | N      | Co |
|                           |                 | –                    | 0,6...<br>0,9 | 1,6...<br>2,0   |                 | –             |                 | ≤ 0,025         |                 |        | –  |
| Марка материала           | ГОСТ, ТУ        | Химический состав, % |               |                 |                 |               |                 |                 |                 |        |    |
|                           |                 | V                    | Cu            | C               | Cr              | Ni            | Mo              | W               | Nb              | Ti     | Al |
| 13Х14Н3В2ФР<br>(ЭИ 736)   | ГОСТ 5632–72    | 0,18...<br>0,28      | –             | 0,10...<br>0,16 | 13...15         | 2,8...<br>3,4 | –               | 1,6...2,2       | –               | ≤ 0,05 | –  |
|                           |                 | Fe                   | Mn            | Si              | Zr              | Ce            | B               | S               | P               | N      | Co |
|                           |                 | Основа               | ≤ 0,6         |                 |                 | –             | 0,004*          | ≤ 0,025         |                 |        | –  |
| Марка материала           | ГОСТ, ТУ        | Химический состав, % |               |                 |                 |               |                 |                 |                 |        |    |
|                           |                 | V                    | Cu            | C               | Cr              | Ni            | Mo              | W               | Nb              | Ti     | Al |
| 10Х11Н2МБФ<br>(ЭП 609)    | ТУ 14-1-931–74  | 0,15...<br>0,25      | –             | 0,05...<br>0,09 | 10,5...<br>12,0 | 1,4...<br>1,8 | 0,35...<br>0,50 | –               | 0,05...<br>0,15 |        | –  |
|                           |                 | Fe                   | Mn            | Si              | Zr              | Ce            | B               | S               | P               | N      | Co |
|                           |                 | Основа               | ≤ 0,6         |                 |                 | –             |                 | ≤ 0,02          | ≤ 0,03          |        | –  |
| Марка материала           | ГОСТ, ТУ        | Химический состав, % |               |                 |                 |               |                 |                 |                 |        |    |
|                           |                 | V                    | Cu            | C               | Cr              | Ni            | Mo              | W               | Nb              | Ti     | Al |
| 15Х12Н2АМФВАБ<br>(ЭП 517) | ТУ 14-1-1161–75 | 0,18...<br>0,30      | –             | 0,13...<br>0,18 | 1,0...<br>12,5  | 1,7...<br>2,1 | 1,35...<br>1,65 | 0,65...<br>1,00 | 0,20...<br>0,35 |        | –  |
|                           |                 | Fe                   | Mn            | Si              | Zr              | Ce            | B               | S               | P               | N      | Co |

Окончание табл. 1.2

| Марка материала                | ГОСТ, ТУ        | Химический состав, % |       |                 |                 |               |                 |                 |                 |                 |               |
|--------------------------------|-----------------|----------------------|-------|-----------------|-----------------|---------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------------|
|                                |                 | V                    | Cu    | C               | Cr              | Ni            | Mo              | W               | Nb              | Ti              | Al            |
| 15X12H2AMФВАБ<br>(ЭП 517)      | ТУ 14-1-1161-75 | Основа               | ≤ 0,5 |                 |                 | —             |                 | ≤ 0,015         | ≤ 0,030         | 0,02...<br>0,08 | —             |
| 15X16H2AM<br>(ЭП 479)          | ГОСТ, ТУ        | Ca                   | Cu    | C               | Cr              | Ni            | Mo              | W               | Nb              | Ti              | Al            |
|                                |                 | —                    | —     | 0,12...<br>0,18 | 15,0...<br>16,5 | 2,0...<br>2,5 | 0,9...<br>1,3   |                 |                 |                 |               |
|                                |                 | Fe                   | Mn    | Si              | Zr              | Ce            | B               | S               | P               | N               | Co            |
|                                |                 | Основа               | ≤ 0,6 |                 |                 | —             |                 | ≤ 0,02          | ≤ 0,03          | 0,03...<br>0,10 | —             |
| 14X17H2 (ЭИ 268)               | ГОСТ, ТУ        | Ca                   | Cu    | C               | Cr              | Ni            | Mo              | W               | Nb              | Ti              | Al            |
|                                |                 | —                    | —     | 0,11...<br>0,17 | 16...18         | 1,5...<br>2,5 |                 |                 | —               |                 |               |
|                                |                 | Fe                   | Mn    | Si              | Zr              | Ce            | B               | S               | P               | N               | Co            |
|                                |                 | Основа               | ≤ 0,8 |                 |                 | —             |                 | ≤ 0,025         | ≤ 0,030         |                 | —             |
| 16X20K6H2MBФ<br>(ЭП 768)       | ГОСТ, ТУ        | V                    | Cu    | C               | Cr              | Ni            | Mo              | W               | Nb              | Ti              | Al            |
|                                |                 | 0,18...<br>0,30      | —     | 0,14...<br>0,18 | 18,5...<br>20,5 | 2,0...<br>2,5 | 1,1...<br>1,4   | 0,3...<br>0,6   |                 | —               |               |
|                                |                 | Fe                   | Mn    | Si              | Zr              | Ce            | B               | S               | P               | N               | Co            |
|                                |                 | Основа               | ≤ 0,5 |                 |                 | —             |                 | ≤ 0,02          |                 | —               | 5,5...<br>6,5 |
| 15X16K5H2MBФА<br>Б<br>(ЭП 866) | ГОСТ, ТУ        | V                    | Cu    | C               | Cr              | Ni            | Mo              | W               | Nb              | Ti              | Al            |
|                                |                 | 0,18...<br>0,30      | —     | 0,13...<br>0,18 | 15,0...<br>16,5 | 1,7...<br>2,1 | 1,35...<br>1,65 | 0,65...<br>1,00 | 0,20...<br>0,35 | —               |               |
|                                |                 | Fe                   | Mn    | Si              | Zr              | Ce            | B               | S               | P               | N               | Co            |
|                                |                 | Основа               | ≤ 0,6 |                 |                 |               | —               |                 |                 | 0,03...<br>0,08 | 4,5...<br>5,5 |

\* Вводятся по расчету.

1.3. Режимы термической обработки и механические свойства основных деформируемых сталей и сплавов на основе железа

| Марка материала     | Вид полуфабриката | Термообработка                                                                                    | ГОСТ, ТУ       | Механические свойства |                      |              |
|---------------------|-------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|-----------------------|----------------------|--------------|
|                     |                   |                                                                                                   |                | $\sigma_B$ , МПа      | $\sigma_{0,2}$ , МПа | $\delta$ , % |
| 12X13               | Прутки            | Закалка при 1050 °С на воздухе или в масле; отпуск при 700...790 °С, охлаждение в масле           | ТУ 14-1-378-72 | 600                   | 420                  | 20           |
| 20X13               |                   | Закалка при 1050 °С на воздухе или в масле; отпуск при 600...700 °С, охлаждение в масле           |                | 850                   | 650                  | 10           |
| 30X13               |                   | Закалка при 1000...1050 °С на воздухе или в масле; отпуск при 200...300 °С, охлаждение на воздухе |                | —                     |                      |              |
| 40X13               |                   | Закалка при 1050...1100 °С в масле; отпуск при 200...300 °С, охлаждение на воздухе                |                |                       |                      |              |
| 2X18N10B2 (ЭП 610)  |                   | Отжиг при 820 °С, выдержка 2 ч, охлаждение на воздухе                                             | ТУ 14-1-204-72 | 750                   | 320                  | 20           |
| 12X17Г9АН4 (ЭИ 878) | Листы, полосы     | Закалка при 1050...1100 °С, охлаждение в воде                                                     | ТУ 14-1-377-72 | 700                   | 350                  | 45           |
| 12X18N10T           |                   | Закалка при 1050...1100 °С, охлаждение в воде, на воздухе, в масле                                | ТУ 14-1-378-72 | 550                   | 200                  | 40           |
| X20N6MD2T (ЭП 309)  |                   | Закалка при 1000...1050 °С, охлаждение на воздухе                                                 | ТУ 14-1-892-74 | 700...900             | 500                  | 8            |

Продолжение табл. 1.3

| Марка материала      | Вид полуфабриката | Термообработка                                                                                                                                                                                                                                                                   | ГОСТ, ТУ                                   | Механические свойства |                      |              |
|----------------------|-------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------|----------------------|--------------|
|                      |                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                            | $\sigma_B$ , МПа      | $\sigma_{0,2}$ , МПа | $\delta$ , % |
| 13X11H2B2MФ (ЭИ 961) | Прутки            | Закалка при 1000...1020 °С, охлаждение в масле; отпуск при 500 °С, выдержка 1 ч, охлаждение на воздухе                                                                                                                                                                           | ТУ 14-1-933–74                             | ≤ 850                 | ≤ 700                | ≥ 25         |
| X11H23T3MP (ЭП 33)   |                   | Закалка при 1000...1010 °С в течение 1...2 ч, охлаждение в масле; старение при 750...780 °С, выдержка 16 ч, второе старение при 640...660 °С в продолжение 16 ч                                                                                                                  | ТУ 14-1-116–74, 14-1-3957–85 и 14-1-312–72 |                       | 785                  | 13           |
| X15H27T3MP (ЭП 700)  |                   | Закалка при (1000±10) °С в течение 3 ч, охлаждение в масле; старение при (750±10) °С в продолжение 16 ч, второе старение при (650±10) °С в течение 10 ч                                                                                                                          | ТУ 14-131-128–73 и 14-1-4481–88            | 1080                  | –                    | 12           |
| 40XH2MA              |                   | Закалка при 835...865 °С, охлаждение в масле; отпуск при 570...670 °С, охлаждение в воде                                                                                                                                                                                         | ГОСТ 4543–71                               |                       | 930                  | 10           |
| 18X2H4MA             |                   | Закалка при 855...885 °С, охлаждение в масле; отпуск при 550...650 °С, охлаждение в воде или масле<br>Первая закалка при 935...965 °С, охлаждение на воздухе; вторая закалка при 845...875 °С, охлаждение на воздухе, отпуск при 500...600 °С, охлаждение на воздухе или в масле |                                            |                       |                      | 8            |
|                      |                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                            | 1030                  | 785                  | 12           |



Продолжение табл. 1.3

|                      |                                                                                                                     |                               |        |        |     |
|----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|--------|--------|-----|
| 65Г                  | Закалка при 815...845 °С, охлаждение в масле; отпуск при 450...510 °С, охлаждение на воздухе                        | ГОСТ 14959–79                 | 980    | 785    | 8   |
| 50ХФА                |                                                                                                                     |                               | 1270   | 1080   |     |
| 60С2                 |                                                                                                                     |                               |        | 1175   |     |
| 13Х14Н3В2ФР (ЭИ 736) | Закалка при 870 °С, охлаждение в масле; отпуск при 470 °С, охлаждение на воздухе                                    | ТУ 14-1-3297–82, ГОСТ 5949–75 | 1150   | 900    | 12  |
| 10Х11Н2МБФ (ЭП 609)  |                                                                                                                     |                               |        |        |     |
| 15Х12Н2МФАВ (ЭП 517) |                                                                                                                     |                               |        |        |     |
| 03Х11Н10М2Т (ЭП 678) |                                                                                                                     |                               |        |        |     |
| 03Х11Н10М2Т (ЭП 679) |                                                                                                                     |                               |        |        |     |
| Прутки               | Закалка при 1050 °С, охлаждение в масле; отпуск при 540...580 °С, охлаждение на воздухе                             | ТУ 14-1-931–74 и 14-1-2918–80 | 930    | 800    | 14  |
|                      | Закалка при 1000...1050 °С, охлаждение в масле; отпуск при 640...670 °С, охлаждение на воздухе                      |                               |        |        |     |
| Прутки, проволока    | Нормализация при 1130 °С; отпуск при 750...780 °С; закалка при 1120 °С, охлаждение в масле; отпуск при 670...720 °С | ТУ 14-1-1161–75               | 1050   | 850    | 8   |
|                      | Закалка при 860 °С, охлаждение на воздухе; старение при 500 °С в течение 2 ч                                        |                               |        |        |     |
| Прутки, проволока    | Закалка при 860 °С, охлаждение на воздухе; старение при 500 °С в течение 2 ч                                        | ТУ 14-130-12–73               | ≥ 1450 | ≥ 1300 | 2,5 |
|                      | Сталь нагартованная и состаренная при 500 °С, выдержка 1 ч                                                          |                               |        |        |     |

Продолжение табл. 1.3

| Марка материала         | Вид полуфабриката | Термообработка                                                                                                                         | ГОСТ, ТУ                                   | Механические свойства |                      |              |
|-------------------------|-------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------|----------------------|--------------|
|                         |                   |                                                                                                                                        |                                            | $\sigma_B$ , МПа      | $\sigma_{0,2}$ , МПа | $\delta$ , % |
| 95X18 (ЭИ 229)          | Прутки            | Закалка при 1000...1050 °С, охлаждение в масле; отпуск при 200...300 °С, охлаждение на воздухе или в масле                             | ТУ 14-1-377-72, 14-1-595-73 и 14-1-3957-85 | —                     |                      |              |
| 1X15N4AM3-Ш (ЭП 310-Ш)  |                   | Закалка с 1070 °С, охлаждение на воздухе, в воде или масле; обработка холодом при 70 °С, выдержка 2 ч; отпуск при 450 °С, выдержка 1 ч | ТУ 14-1-940-74                             | 1450                  | 1050                 | 15           |
| 15X16N2AM (ЭП 479)      |                   | Закалка с 1040 °С, охлаждение в масле; отпуск при 550...590 °С                                                                         | ТУ 14-1-978-74                             | 1150                  | 950                  | 12           |
| MX17N2 (ЭИ 268)         |                   | Закалка с 975...1040 °С, охлаждение в масле; отпуск при 275...350 °С                                                                   | ТУ 14-1-377-72                             | 1100                  | 850                  | 10           |
| 16X20K6N2MBФ (ЭП 768)   |                   | Закалка с 1060 °С, охлаждение в масле; обработка холодом при -70 °С, 2 ч; отпуск при 640 °С, выдержка 3 ч                              | ТУ 14-1-957-74                             | 1000                  | 750                  | 11           |
| 15X16K5N2MBФAB (ЭП 866) |                   | Нормализация при 1090 °С; отпуск при 650...700 °С; закалка с 1100 °С, охлаждение в масле; отпуск при 650...700 °С                      | ТУ 14-1-2756-79 и 14-1-5112-92             | 1100                  | 850                  | 12           |

Продолжение табл. 1.3

| Марка материала      | Вид полуфабриката | Термообработка                                                                                         | ГОСТ, ТУ       | Механические свойства |                                        |                |
|----------------------|-------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|-----------------------|----------------------------------------|----------------|
|                      |                   |                                                                                                        |                | ψ, %                  | $a_{K^*}$ ,<br>(КТС-М)/см <sup>2</sup> | $d_{отп}$ , мм |
| 12X13                | Прутки            | Закалка при 1050 °С на воздухе или в масле; отпуск при 700...790 °С, охлаждение в масле                | ТУ 14-1-378—72 | 60                    | 9                                      | ≥ 4,6          |
| 20X13                |                   | Закалка при 1050 °С на воздухе или в масле; отпуск при 600...700 °С, охлаждение в масле                |                | 50                    | 6                                      | 3,9...4,3      |
| 30X13                |                   | Закалка при 1000...1050 °С на воздухе или в масле; отпуск при 200...300 °С, охлаждение на воздухе      |                |                       |                                        | HRC ≥ 48       |
| 40X13                |                   | Закалка при 1050...1100 °С в масле; отпуск при 200...300 °С, охлаждение на воздухе                     |                |                       |                                        |                |
| 2X18N10B2 (ЭП 610)   |                   | Отжиг при 820 °С, выдержка 2 ч, охлаждение на воздухе                                                  | ТУ 14-1-204—72 | 35                    | 7                                      | ≥ 3,5          |
| 12X17Г9АН4 (ЭИ 878)  |                   | Закалка при 1050...1100 °С, охлаждение в воде                                                          | ТУ 14-1-377—72 | 55                    | —                                      |                |
| 12X18N10T            |                   | Закалка при 1050...1100 °С, охлаждение в воде, на воздухе, в масле                                     | ТУ 14-1-378—72 |                       |                                        |                |
| X20N6МД2Т (ЭП 309)   | Листы, полосы     | Закалка при 1000...1050 °С охлаждение на воздухе                                                       | ТУ 14-1-892—74 | —                     |                                        |                |
| 13X11N2B2МФ (ЭИ 961) | Прутки            | Закалка при 1000...1020 °С, охлаждение в масле; отпуск при 500 °С, выдержка 1 ч, охлаждение на воздухе | ТУ 14-1-933—74 | ≥ 65                  | —                                      |                |

Продолжение табл. 1.3

| Марка материала     | Вид полуфабриката | Термообработка                                                                                                                                                             | ГОСТ, ТУ                                   | Механические свойства |                                          |                |
|---------------------|-------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------|------------------------------------------|----------------|
|                     |                   |                                                                                                                                                                            |                                            | ψ, %                  | $a_{K\sigma}$<br>(кгс·м)/см <sup>2</sup> | $d_{отп}$ , мм |
| X11H23T3MP (ЭП 33)  | Прутки            | Закалка при 1000...1010 °С в течение 1...2 ч, охлаждение в масле; старение при 750...780 °С, выдержка 16 ч, второе старение при 640...660 °С в продолжение 16 ч            | ТУ 14-1-116-74, 14-1-3957-85 и 14-1-312-72 | 20                    | 4,0                                      | 3,3...3,6      |
| X15H27T3MP (ЭП 700) |                   | Закалка при (1000±10) °С в течение 3 ч, охлаждение в масле; старение при (750±10) °С в продолжение 16 ч, второе старение при (650±10) °С в течение 10 ч                    | ТУ 14-131-128-73 и 14-1-4481-88            | —                     |                                          |                |
| 40XH2MA             |                   | Закалка при 835...865 °С, охлаждение в масле; отпуск при 570...670 °С, охлаждение в воде                                                                                   | ГОСТ 4543-71                               | 450                   | 7                                        | —              |
| 40X2H2MA            |                   | Закалка при 855...885 °С, охлаждение в масле; отпуск при 550...650 °С, охлаждение в воде или масле                                                                         |                                            | 40                    | 70                                       |                |
| 18X2H4MA            |                   | Первая закалка при 935...965 °С, охлаждение на воздухе; вторая закалка при 845...875 °С, охлаждение на воздухе, отпуск при 500...600 °С, охлаждение на воздухе или в масле |                                            | 50                    | 118                                      |                |

Продолжение табл. 1.3

|                      |                                                                                                                     |                                            |    |   |             |
|----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|----|---|-------------|
| 65Г                  | Закалка при 815...845 °С, охлаждение в масле; отпуск при 450...510 °С, охлаждение на воздухе                        | ГОСТ 14959–79                              | 30 | — |             |
|                      |                                                                                                                     |                                            | 35 |   |             |
|                      |                                                                                                                     |                                            | 25 |   |             |
| 50ХФА                | Закалка при 850 °С, охлаждение в масле; отпуск при 470 °С, охлаждение на воздухе                                    | ГОСТ 14959–79                              | 50 | 7 | 3,10...3,35 |
|                      |                                                                                                                     |                                            |    |   |             |
|                      |                                                                                                                     |                                            |    |   |             |
| 60С2                 | Закалка при 870 °С, охлаждение в масле; отпуск при 470 °С, охлаждение на воздухе                                    | ГОСТ 14959–79                              | 60 | 9 | 3,3...3,8   |
|                      |                                                                                                                     |                                            |    |   |             |
|                      |                                                                                                                     |                                            |    |   |             |
| 13Х14Н3В2ФР (ЭИ 736) | Закалка при 1050 °С, охлаждение в масле; отпуск при 540...580 °С, охлаждение на воздухе                             | ТУ 14-1-3297–82, ГОСТ 5949–75              | 55 | 6 | 3,35...3,60 |
|                      |                                                                                                                     |                                            |    |   |             |
|                      |                                                                                                                     |                                            |    |   |             |
| 10Х11Н2МБФ (ЭП 609)  | Закалка при 1000...1050 °С, охлаждение в масле; отпуск при 640...670 °С, охлаждение на воздухе                      | ТУ 14-1-931–74 и 14-1-2918–80              | 35 | 3 | —           |
|                      |                                                                                                                     |                                            |    |   |             |
|                      |                                                                                                                     |                                            |    |   |             |
| 15Х12Н2МФВБ (ЭП 517) | Нормализация при 1130 °С; отпуск при 750...780 °С; закалка при 1120 °С, охлаждение в масле; отпуск при 670...720 °С | ТУ 14-1-1161–75                            | 60 | 9 | 3,3...3,8   |
|                      |                                                                                                                     |                                            |    |   |             |
|                      |                                                                                                                     |                                            |    |   |             |
| 03Х11Н10М2Т (ЭП 678) | Закалка при 860 °С, охлаждение на воздухе; старение при 500 °С в течение 2 ч                                        | ТУ 122–68                                  | 35 | 3 | —           |
|                      |                                                                                                                     |                                            |    |   |             |
|                      |                                                                                                                     |                                            |    |   |             |
| 03Х11Н10М2Т (ЭП 679) | Прутки, проволока                                                                                                   | ТУ 14-130-12–73                            | 60 | — | HRC ≥ 55    |
| 95Х18 (ЭИ 229)       | Прутки                                                                                                              | ТУ 14-1-377–72, 14-1-595–73 и 14-1-3957–85 |    |   |             |

Окончание табл. 1.3

| Марка материала                                                                                                   | Вид полуфабриката | Термообработка                                                                                                                         | ГОСТ, ТУ       | Механические свойства |                                    |                |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|-----------------------|------------------------------------|----------------|
|                                                                                                                   |                   |                                                                                                                                        |                | $\psi$ , %            | $a_k$ ,<br>(кгс·м)/см <sup>2</sup> | $d_{отп}$ , мм |
| 1Х15Н4АМЗ-Ш (ЭП 310-Ш)                                                                                            | Прутки            | Закалка с 1070 °С, охлаждение на воздухе, в воде или масле; обработка холодом при 70 °С, выдержка 2 ч; отпуск при 450 °С, выдержка 1 ч | ТУ 14-1-940–74 | 55                    | 10                                 | —              |
|                                                                                                                   |                   | Закалка с 1040 °С, охлаждение в масле; отпуск при 550...590 °С                                                                         | ТУ 14-1-978–74 | 58                    | 7                                  | 3,15...3,50    |
| Закалка с 975...1040 °С, охлаждение в масле; отпуск при 275...350 °С                                              |                   | ТУ 14-1-377–72                                                                                                                         | 30             | 5                     | 3,1...3,4                          |                |
| Закалка с 1060 °С, охлаждение в масле; обработка холодом при –70 °С, 2 ч; отпуск при 640 °С, выдержка 3 ч         |                   | ТУ 14-1-957–74                                                                                                                         | 48             | 6                     | 3,15...3,50                        |                |
| Нормализация при 1090 °С; отпуск при 650...700 °С; закалка с 1100 °С, охлаждение в масле; отпуск при 650...700 °С |                   | ТУ 14-1-2756–79 и 14-1-5112–92                                                                                                         | 45             | 6                     | 3,20...3,55                        |                |
| 15Х16К5Н2МВФАБ (ЭП 866)                                                                                           |                   |                                                                                                                                        |                |                       |                                    |                |

Условные обозначения:  $\sigma_b$  — временное сопротивление разрыву (предел прочности);  $\sigma_{0,2}$  — предел текучести;  $\delta$  — относительное удлинение;  $\psi$  — относительное сужение;  $a_k$  — ударная вязкость; НВ — твердость;  $d_{отп}$  — диаметр отпечатка шарика.

Характерной особенностью никелевых жаропрочных сплавов является высокая температура рекристаллизации, поэтому отклонение от режима деформирования ведет к образованию в металле полугорячего наклепа, что при последующей термообработке приводит к разно- или грубозернистости. Этот дефект возникает также и при штамповке сплавов в области критических степеней деформации.

Причиной разнотерности проката и поковок может стать наличие остаточной химической микронеоднородности, выраженной в виде полосчатости или фигур, напоминающих дендриты исходных кристаллов. Температура рекристаллизации зависит от степени легирования. Чем она выше, тем значительнее температура рекристаллизации.

Чувствительность жаропрочных никелевых сплавов к перегревам выражается в катастрофическом снижении пластичности.

Для никелевых сплавов следует строго соблюдать степени обжатия за один переход. Причем чем выше степень легирования сплава, тем меньше допустимые степени обжатия при горячей обработке давлением. При высокой степени деформации сплав может локально перегреваться от выделения теплоты при ковке, поэтому верхнюю температуру нагрева под деформацию следует выбирать с учетом последующих степеней обжатия.

Область применения, химический состав, механические свойства и температурный интервал штамповки для наиболее часто применяемых деформируемых никелевых сплавов приведены в табл. 1.4–1.6.

#### 1.4. Основные деформируемые сплавы на основе никеля

| Марка материала      | ГОСТ, ТУ      | Вид полуфабриката | Обработка давлением                                                                                                                | Область применения                                                                       |
|----------------------|---------------|-------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| ЗН77ТЮР<br>(ЭИ 437Б) | ГОСТ 23705–79 | Прутки            | Деформируется в горячем состоянии. Температурный интервал штамповки 1130...980 °С. Охлаждение после горячей деформации на воздухе  | Для рабочих лопаток газовых турбин и компрессоров, работающих при температурах до 750 °С |
| ХН70ВМТЮ<br>(ЭИ 617) |               |                   | Деформируется в горячем состоянии. Температурный интервал штамповки 1180...1050 °С. Охлаждение после горячей деформации на воздухе | Для рабочих лопаток газовых турбин, работающих при температурах до 800 °С                |

Продолжение табл. 1.4

| Марка материала       | ГОСТ, ТУ                        | Вид полуфабриката | Обработка давлением                                                                                                                | Область применения                                                                                                                                                          |
|-----------------------|---------------------------------|-------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ХН62ВМКЮ<br>(ЭИ 867)  | ГОСТ 23705–79                   | Прутки            | Деформируется в горячем состоянии. Температурный интервал штамповки 1180...1060 °С. Охлаждение после горячей деформации на воздухе | Для рабочих лопаток газовых турбин, работающих при температурах до 900 °С                                                                                                   |
| ХН65КЮВМР<br>(ЭП 617) | ТУ 14-1-1492–75                 |                   | Деформируется в горячем состоянии. Температурный интервал штамповки 1160...1040 °С. Охлаждение после горячей деформации на воздухе | Для рабочих лопаток и других высоконагруженных деталей газовых турбин и компрессоров, работающих длительно при температурах до 900 °С и временно при температурах до 950 °С |
| ХН56ВМКЮ<br>(ЭП 109)  | ТУ 14-1-59–73,<br>ГОСТ 23705–79 |                   | Деформируется в горячем состоянии. Температурный интервал штамповки 1180...1070 °С. Охлаждение после горячей деформации на воздухе | Для рабочих лопаток газовых турбин, работающих при температурах до 950 °С                                                                                                   |
| ХН61КМЮВБ<br>(ЭП 874) | ТУ 14-1-2062–76                 |                   | Деформируется в горячем состоянии                                                                                                  |                                                                                                                                                                             |
| ХН73МБТЮ<br>(ЭИ 698)  | ТУ 14-1-1973–77                 |                   | Деформируется в горячем состоянии. Температурный интервал штамповки 1180...1030 °С. Охлаждение после горячей деформации на воздухе | Для дисков турбины и компрессоров, дефлекторов, силовых колец и крепежных болтов с длительным ресурсом, работающих при температуре до 750 °С                                |



Продолжение табл. 1.4

| Марка материала           | ГОСТ, ТУ                       | Вид полуфабриката | Обработка давлением                                                                                                                | Область применения                                                                                                     |
|---------------------------|--------------------------------|-------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ХН62БМКТЮ (ЭП 742)        | ТУ 14-1-3998–85                | Поковки (шайбы)   | Деформируется в горячем состоянии                                                                                                  | Для дисков турбины и компрессоров, работающих при температурах 550...800 °С и высоких напряжениях                      |
| ЭК79 (ЭП 742У)            | ТУ 14-131-561–83               |                   |                                                                                                                                    | Для дисков турбины и компрессоров, работающих при температурах до 800 °С                                               |
| ХН60КМВТЮБ (ЭП 741)       | ТУ 14-131-369–77               |                   |                                                                                                                                    | Для дисков турбины, компрессоров и других тяжело нагруженных деталей двигателей, работающих при температурах до 850 °С |
| ХН60ВМБ (ЭП 886, ВЖ 111)  | ТУ 14-1-4433–88                | Прутки            |                                                                                                                                    | Для жаровых труб, форсажных камер и других деталей, работающих длительно при температурах до 1000 °С                   |
| ХН60ВТ (ЭИ 868, ВЖ 98)    | ТУ 14-1-286–72 и 14-131-644–85 |                   | Деформируется в горячем состоянии. Температурный интервал штамповки 1180...1050 °С                                                 | Для жаровых труб, форсажных камер и других деталей, работающих длительно при температурах до 900...1000 °С             |
| ХН65ВМБЮ (ВЖ 131, ЭП 914) | ТУ 14-1-3986–85                |                   | Деформируется в горячем состоянии                                                                                                  | Для сварных узлов, работающих при температурах до 800 °С                                                               |
| ХН62ВМТЮ (ЭП 708)         | ТУ 14-1-1018–74                |                   | Деформируется в горячем состоянии. Температурный интервал штамповки 1180...1000 °С. Охлаждение после горячей деформации на воздухе | Для сварных силовых узлов, работающих при температурах до 850 °С                                                       |

Окончание табл. 1.4

| Марка материала                | ГОСТ, ТУ        | Вид полуфабриката | Обработка давлением                                                                                                                | Область применения                                                                                                                                             |
|--------------------------------|-----------------|-------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ХН68МВКТЮР<br>(ЭП 693)         | ТУ 14-1-3759–84 | Прутки            | Деформируется в горячем состоянии. Температурный интервал штамповки 1180...980 °С. Охлаждение после горячей деформации на воздухе  | Для силовых сварных конструкций, длительное время работающих при температурах 700...900 °С                                                                     |
| ХН68ВМБТЮК<br>(ЭП 693М, ЭК 58) | ТУ 14-1-3741–84 |                   |                                                                                                                                    | Для силовых сварных узлов, работающих при температурах до 950 °С в конструкциях, к которым предъявляются повышенные требования по жаропрочности и пластичности |
| ХН56ВМТЮ<br>(ЭП 199, ВЖ 101)   | ТУ 14-1-1508–75 |                   | Деформируется в горячем состоянии. Температурный интервал штамповки 1140...1000 °С. Охлаждение после горячей деформации на воздухе | Для сварных силовых узлов, работающих при температурах до 950 °С                                                                                               |
| ХН50МВКТЮР<br>(ЭП 99)          | ТУ 14-1-1476–75 |                   | Деформируется в горячем состоянии. Температурный интервал штамповки 1160...1050 °С. Охлаждение после горячей деформации на воздухе | Для различных силовых сварных конструкций, лопаток, сопловых аппаратов двигателей, работающих при температурах 700...1000 °С                                   |

1.5. Химический состав сплавов на основе никеля

| Марка материала | ГОСТ, ТУ | Химический состав, % |            |           |           |         |         |         |        |        |
|-----------------|----------|----------------------|------------|-----------|-----------|---------|---------|---------|--------|--------|
|                 |          | C                    | Cr         | Al        | Ti        | Ni      | Si      | Mn      | Ce     | Fe     |
|                 |          | ≤ 0,07               | 19...22    | 0,6...1,0 | 2,4...2,8 | Основа  | ≤ 0,6   | ≤ 0,4   | 0,02   | 1      |
|                 |          | Cu                   | B          | Pb        | S         | P       |         |         |        |        |
|                 |          | 0,07                 | ≤ 0,01     | ≤ 0,001   | ≤ 0,007   | ≤ 0,015 |         | –       |        |        |
| Марка материала | ГОСТ, ТУ | Химический состав, % |            |           |           |         |         |         |        |        |
|                 |          | C                    | Cr         | Al        | Ti        | Ni      | Si      | Mn      | Ce     | Fe     |
|                 |          | ≤ 0,12               | 13...16    | 1,7...2,3 | 1,8...2,3 | Основа  | ≤ 0,6   | ≤ 0,5   | ≤ 0,02 | ≤ 5    |
|                 |          | Cu                   | W          | Mo        | V         | B       | S       | P       |        |        |
|                 |          | ≤ 0,07               | 5...7      | 2...4     | 0,1...0,5 | ≤ 0,02  | ≤ 0,01  | ≤ 0,015 | –      |        |
| Марка материала | ГОСТ, ТУ | Химический состав, % |            |           |           |         |         |         |        |        |
|                 |          | C                    | Cr         | Al        | Co        | Ni      | Si      | Ce      | Fe     | Cu     |
|                 |          | ≤ 0,1                | 8,5...10,5 | 4,2...4,9 | 4...6     | Основа  | ≤ 0,6   | ≤ 0,3   | ≤ 4,0  | ≤ 0,07 |
|                 |          | W                    | Mo         | B         | P         |         |         | –       |        |        |
|                 |          | 4,3...6,0            | 9,0...11,5 | ≤ 0,02    | ≤ 0,011   |         |         |         |        |        |
| Марка материала | ГОСТ, ТУ | Химический состав, % |            |           |           |         |         |         |        |        |
|                 |          | C                    | Cr         | Al        | Co        | Ni      | Si      | Mn      | Ce     | Fe     |
|                 |          | ≤ 0,1                | 8,5...10,5 | 4,2...4,9 | 4...6     | Основа  | ≤ 0,6   | ≤ 0,3   | ≤ 0,02 | ≤ 1    |
|                 |          | W                    | Mo         | B         | S         | P       |         |         | –      |        |
|                 |          | 4,5...5,5            | 2,8...3,8  | ≤ 0,02    | ≤ 0,011   | ≤ 0,015 |         | –       |        |        |
| Марка материала | ГОСТ, ТУ | Химический состав, % |            |           |           |         |         |         |        |        |
|                 |          | C                    | Cr         | Al        | Co        | Ni      | Si      | Mn      | Ce     | Fe     |
|                 |          | ≤ 0,1                | 8,5...10,5 | 6,4...6,2 | 11...13   | Основа  | ≤ 0,6   | ≤ 0,3   | ≤ 0,02 | ≤ 1,5  |
|                 |          | Cu                   | W          | Mo        | B         | S       | P       |         | –      |        |
|                 |          | ≤ 0,07               | 6,0...7,5  | 6,5...8,0 | ≤ 0,02    | ≤ 0,01  | ≤ 0,015 |         |        |        |

Продолжение табл. 1.5

| Марка материала       | ГОСТ, ТУ           | Химический состав, % |                 |            |                 |                   |                   |               |                   |         |  |
|-----------------------|--------------------|----------------------|-----------------|------------|-----------------|-------------------|-------------------|---------------|-------------------|---------|--|
|                       |                    | C                    | Cr              | Al         | Co              | Ni                | Si                | Mn            | Ce                | Fe      |  |
| ХН61КМЮВБ<br>(ЭП 874) | ТУ 14-1-2062–76    | 0,01...0,08          | 8,5...10,0      | 5,5...6,2  | 11...15         | Основа            | ≤ 0,3             |               | 0,005...<br>0,002 | ≤ 1     |  |
|                       |                    | Cu                   | W               | Mo         | Nb              | B                 | Zr                | S             | P                 | –       |  |
|                       |                    | ≤ 0,07               | 3,5...6,0       | 4,5...7,0  | 0,8...1,5       | 0,005...<br>0,050 | 0,001...<br>0,100 | ≤ 0,01        | ≤ 0,0015          |         |  |
| Марка материала       | ГОСТ, ТУ           | Химический состав, % |                 |            |                 |                   |                   |               |                   |         |  |
| ХН73МБТЮ<br>(ЭИ 698)  | ТУ 14-1-285–72     | C                    | Cr              | Al         | Ti              | Ni                | Si                | Mn            | Ce                | Fe      |  |
|                       |                    | 0,03...0,07          | 13...16         | 1,45...1,8 | 2,35...<br>2,75 | Основа            | ≤ 0,5             | ≤ 0,4         | ≤ 0,005*          | ≤ 2     |  |
|                       |                    | Mo                   | Nb              | B          | Pb              | S                 | P                 | –             |                   |         |  |
| Марка материала       | ГОСТ, ТУ           | 2,8...3,2            | 1,9...2,2       | ≤ 0,005*   | ≤ 0,001         | ≤ 0,007           | ≤ 0,0015          |               |                   |         |  |
|                       |                    | Химический состав, % |                 |            |                 |                   |                   |               |                   |         |  |
|                       |                    | C                    | Cr              | Al         | Ti              | Ni                | Si                | Mn            | Ce                | Fe      |  |
| ХН62БМКТЮ<br>(ЭП 742) | ТУ 14-1-1998–85    | 0,04...0,08          | 13...15         | 2,4...2,8  |                 | Оснoв             | ≤ 0,3             | ≤ 0,4         | ≤ 0,01*           | ≤ 1     |  |
|                       |                    | Cu                   | W               | Mo         | V               | B                 | La                | S             | P                 | Co      |  |
|                       |                    | ≤ 0,07               | ≤ 0,2           | 4,5...5,5  | ≤ 0,2           | ≤ 0,01*           | ≤ 0,1             | ≤ 0,01        | ≤ 0,015           | 9...11  |  |
|                       |                    | Nb                   | –               |            |                 |                   |                   |               |                   |         |  |
|                       |                    | 2,4...2,8            |                 |            |                 |                   |                   |               |                   |         |  |
| Марка материала       | ГОСТ, ТУ           | Химический состав, % |                 |            |                 |                   |                   |               |                   |         |  |
| ЭЖ 79 (ЭП 742У)       | ТУ 14-1-131-561–83 | C                    | Cr              | Al         | Ti              | Ni                | Fe                | Si            | Mn                | Ce      |  |
|                       |                    | 0,04...0,08          | 10...12         | 2,8...3,3  | 2,4...3,0       | Основа            | ≤ 1               | ≤ 0,4         |                   | ≤ 0,01* |  |
|                       |                    | Nd                   | Co              | W          | Mo              | V                 | B                 | Nb            | La                | S       |  |
|                       |                    | ≤ 0,05*              | 12,5...<br>16,0 | 2...3      | 4...5           | 0,4...<br>0,8     | ≤ 0,01*           | 2,5...<br>3,0 | ≤ 0,05*           | ≤ 0,01  |  |
|                       |                    | P                    | Mg              | –          |                 |                   |                   |               |                   |         |  |
|                       |                    | ≤ 0,015              | ≤ 0,05*         |            |                 |                   |                   |               |                   |         |  |

Продолжение табл. 1.5

| Марка материала              | ГОСТ, ТУ        | Химический состав, % |                 |           |           |          |         |               |         |           |  |
|------------------------------|-----------------|----------------------|-----------------|-----------|-----------|----------|---------|---------------|---------|-----------|--|
|                              |                 | C                    | Cr              | Al        | Ti        | Ni       | Si      | Mn            | Ce      | Fe        |  |
| ХН60КМВТЮБ<br>(ЭП 741)       | ОСТ 1-92111-85  | ≤ 0,06               | 8,0...<br>10,5  | 4,5...5,2 | 1,3...1,7 | Основа   | ≤ 0,5   |               | ≤ 0,01  | ≤ 1       |  |
|                              |                 | Co                   | W               | Mo        | Mg        | B        | Zr      | S             | P       | Nb        |  |
|                              |                 | 14,6...17,5          | 6,3...7,2       | 2,2...3,0 | ≤ 0,05    | ≤ 0,02*  | ≤ 0,025 | ≤ 0,009       | ≤ 0,015 | 1,2...1,6 |  |
| Марка материала              | ГОСТ, ТУ        | Химический состав, % |                 |           |           |          |         |               |         |           |  |
| Х60МВБ (ЭП 886,<br>ВЖ 111)   | ТУ 14-1-2760-79 | C                    | Cr              | Al        | Ti        | Ni       | Si      | Mn            | Ce      | Fe        |  |
|                              |                 | ≤ 0,1                | 23...26         | 0,2...0,7 | 0,2...0,8 | Основа   | ≤ 0,5   | ≤ 0,5*        | ≤ 0,02* | ≤ 5       |  |
|                              |                 | Nb                   | W               | Mo        | Mg        | B        | S       | P             | —       |           |  |
|                              |                 | 0,4...1,0            | 5...7           | 3,0...4,5 | ≤ 0,06*   | ≤ 0,005* | ≤ 0,5*  |               |         |           |  |
| Марка материала              | ГОСТ, ТУ        | Химический состав, % |                 |           |           |          |         |               |         |           |  |
| ХН60ВМБ<br>(ЭИ 868, ВЖ 98)   | ТУ 4-1-1747-76  | C                    | Cr              | Al        | Ti        | Ni       | Si      | Mn            | Fe      | Cu        |  |
|                              |                 | ≤ 0,1                | 23,5...<br>26,5 | ≤ 0,5     | 0,3...0,7 | Основа   | ≤ 0,8   | ≤ 0,5         | ≤ 4     | ≤ 0,07    |  |
|                              |                 | W                    | S               | P         | —         |          |         |               |         |           |  |
| Марка материала              | ГОСТ, ТУ        | Химический состав, % |                 |           |           |          |         |               |         |           |  |
| ХН65ВМБЮ<br>(ЭП 914, ВЖ 131) | ТУ 14-1-2689-79 | C                    | Cr              | Al        | Si        | Ni       | Mn      | Nb            | Fe      | Nd        |  |
|                              |                 | ≤ 0,06               | 17,0...<br>18,5 | 1,5...1,9 | ≤ 0,5     | Основа   | ≤ 0,5   | 4,0...<br>4,7 | ≤ 1,5   | 0,1...0,2 |  |
|                              |                 | W                    | Mo              | B         | S         | P        | —       |               |         |           |  |
|                              |                 | 5,5...7,5            | 3...5           | ≤ 0,006*  | ≤ 0,015   |          |         |               |         |           |  |
| Марка материала              | ГОСТ, ТУ        | Химический состав, % |                 |           |           |          |         |               |         |           |  |
| ХН62ВМТЮ<br>(ЭП 708)         | ТУ 14-1-3556-83 | C                    | Cr              | Al        | Ti        | Ni       | Si      | Mn            | Ce      | Fe        |  |
|                              |                 | 0,05...0,10          | 17,5...<br>20,0 | 1,9...2,3 | 1,0...1,4 | Основа   | ≤ 0,6   | ≤ 0,5         | ≤ 0,03* | ≤ 4       |  |
|                              |                 | W                    | Mo              | B         | S         | P        | —       |               |         |           |  |
|                              |                 | 5,5...7,5            | 4...6           | ≤ 0,008*  | ≤ 0,015   |          |         |               |         |           |  |



1.6. Режимы термической обработки и механические свойства основных деформируемых сплавов на основе никеля

| Марка материала       | Вид полуфабриката    | Термообработка                                                                                                                                | ГОСТ, ТУ                      | Механические свойства |                      |              |             |                                   |                    |
|-----------------------|----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|-----------------------|----------------------|--------------|-------------|-----------------------------------|--------------------|
|                       |                      |                                                                                                                                               |                               | $\sigma_B$ , МПа      | $\sigma_{0,2}$ , МПа | $\delta$ , % | $\psi$ , %  | $a_{K^*}$ (КГС·М)/СМ <sup>2</sup> | НВ, $d_{отп}$ , мм |
| ХН77ТЮР<br>(ЭИ 437Б)  |                      | Закалка при 1080 °С, выдержка 8 ч, охлаждение на воздухе. Старение при 700 °С в течение 16 ч                                                  | ГОСТ 23705–79                 | 950...<br>1100        | 620...<br>700        | 15           | 30          | 6                                 | 3,40...<br>3,45    |
|                       |                      | Первая закалка при 1190 °С, выдержка 2 ч; вторая закалка при 1050 °С, выдержка 4 ч, охлаждение на воздухе. Старение при 800 °С в течение 16 ч |                               | 1140                  | 750                  | 14           | 15          | 1,5...3,0                         | 3,45               |
| ХН62ВМКЮ<br>(ЭИ 867)  | Прутки горячекатаные | Закалка при 1220 °С, выдержка 4...6 ч, охлаждение на воздухе. Старение при 950 °С в течение 8 ч                                               |                               | 1100...<br>1250       | 750...<br>850        | 17           | 20          | 3...5                             | 3,25...<br>3,60    |
| ХН65КЮВМР<br>(ЭП 617) |                      | Закалка при 1220 °С, выдержка 4...6 ч, охлаждение на воздухе. Старение при 850 °С, выдержка 24 ч                                              | ТУ 14-1-1492–75               | 1170...<br>1200       | 830...<br>850        | 15...<br>20  | 16...<br>19 | 3                                 | 3,3...<br>3,6      |
| ХН56ВМКЮ<br>(ЭП 109)  |                      | Закалка при 1220 °С, выдержка 4...6 ч, охлаждение на воздухе. Старение при 925 °С, выдержка 8...10 ч                                          | ГОСТ 23705–79, ТУ 14-1-5,9–73 | 1330                  | 950                  | 16           | –           | 4,5                               | –                  |

Продолжение табл. 1.6

| Марка материала       | Вид полуфабриката    | Термообработка                                                                                                                                                                                                                       | ГОСТ, ТУ                                                           | Механические свойства |                      |              |             |                                      |                           |
|-----------------------|----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|-----------------------|----------------------|--------------|-------------|--------------------------------------|---------------------------|
|                       |                      |                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                    | $\sigma_B$ , МПа      | $\sigma_{0,2}$ , МПа | $\delta$ , % | $\psi$ , %  | $a_{K\alpha}$ (КТС-М)/ $\text{см}^2$ | НВ, $d_{\text{опт}}$ , мм |
| ХН61КМЮВБ<br>(ЭП 874) |                      | Закалка при 1220 °С, выдержка 4 ч, охлаждение на воздухе. Первое старение при 960 °С, выдержка 4 ч, второе старение при 850 °С, выдержка 16 ч                                                                                        | ТУ 14-1-1973–77                                                    | 1100...<br>1250       | 850...<br>950        | 10...<br>15  | 10...<br>15 | 3...6                                | 302...<br>388 НВ          |
|                       |                      | Закалка при 1120 °С, выдержка 8 ч, охлаждение на воздухе; закалка при 1000 °С, выдержка 4 ч, охлаждение на воздухе. Первое старение при 775 °С, выдержка 16 ч; второе старение при 700 °С, выдержка 16...24 ч, охлаждение на воздухе | ТУ 14-1-1973–77,<br>14-1-5329–96,<br>14-1-285–72<br>и 14-1-2792–79 | 1180                  | 740                  | 14           | 16          | 4                                    | 3,5...<br>3,2             |
| ХН62БМКТЮ<br>(ЭП 698) | Прутки горячекатаные |                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                    |                       |                      |              |             |                                      |                           |
| ХН62БМКТЮ<br>(ЭП 742) | Поковки (шайбы)      | Закалка при 1090...1120 °С, выдержка 8 ч, охлаждение на воздухе. Первое старение при 850 °С выдержка 6 ч; второе старение при 780 °С, выдержка 10...16 ч, охлаждение на воздухе                                                      | ТУ 14-1-3998–85                                                    | 1230                  | 770                  | 13           | 14          | 3                                    | 3,15...<br>3,50           |
|                       |                      |                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                    |                       |                      |              |             |                                      |                           |



Продолжение табл. 1.6

|                                 |                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                    |                |               |             |  |           |                 |
|---------------------------------|--------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|----------------|---------------|-------------|--|-----------|-----------------|
| ЭК 79<br>(ЭП 724 У)             | Поковки<br>(шайбы) | Отжиг при 1040 °С, вы-<br>держка 42 ч, охлажде-<br>ние на воздухе. Закалка<br>при 1120...1160 °С, вы-<br>держка 8 ч, охлаждение<br>на воздухе. Первое ста-<br>рение при 850 °С, вы-<br>держка 6 ч; второе ста-<br>рение при 780 °С, вы-<br>держка 10...16 ч,<br>охлаждение на воздухе | ТУ 14-1-131-561-83 | 1300           | 900           | 14          |  | 3,5       | 3,15...<br>3,45 |
|                                 |                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                    |                |               |             |  |           |                 |
| ХН60КМВТЮБ<br>(ЭП 741)          |                    | Первая закалка с<br>1180 °С, выдержка 5 ч,<br>охлаждение на воздухе;<br>вторая закалка с<br>1050 °С, выдержка 4 ч,<br>охлаждение на воздухе.<br>Старение при 910 °С,<br>12 ч                                                                                                          | ТУ 14-131-369-77   | 1400..<br>1500 | 950..<br>1050 | 25...<br>30 |  | 4,0...4,5 | 3,20...<br>3,45 |
|                                 |                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                    |                |               | 20..<br>25  |  |           |                 |
| ХН60ВТ<br>(ЭИ 868, ВЖ 98)       | Прутки             | Закалка при<br>1150...1200 °С, выдержи-<br>ка 1 ч, охлаждение на<br>воздухе                                                                                                                                                                                                           | ТУ 14-1-286-72     | 750            | —             | 30          |  | —         |                 |
|                                 |                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                    |                |               |             |  |           |                 |
| ХН65ВМБЮ<br>(ЭП 914,<br>ВЖ 131) |                    | Закалка с 1110 °С, ох-<br>лаждение на воздухе.<br>Старение при 800 °С,<br>выдержка 15 ч                                                                                                                                                                                               | ТУ 14-1-3986-85    | 1000           | 700           | 35          |  | 10        | —               |
|                                 |                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                    |                |               |             |  |           |                 |
| ХН62ВМТЮ<br>(ЭП 708)            |                    | Закалка с 1140 °С, ох-<br>лаждение на воздухе.<br>Старение при 800 °С,<br>выдержка 15 ч                                                                                                                                                                                               | ТУ 14-1-1018-74    | 1100           |               | 18          |  | 20        | —               |
|                                 |                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                    |                |               |             |  |           |                 |

Окончание табл. 1.6

| Марка материала                                                                                            | Вид полуфабриката | Термообработка                                                                                     | ГОСТ, ТУ        | Механические свойства     |                      |              |            |                                          |           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|---------------------------|----------------------|--------------|------------|------------------------------------------|-----------|
|                                                                                                            |                   |                                                                                                    |                 | $\sigma_{\text{в}}$ , МПа | $\sigma_{0,2}$ , МПа | $\delta$ , % | $\psi$ , % | $a_{\text{K}}$ , (кгс·м)/см <sup>2</sup> | НВ, d, мм |
| ХН68МВКТЮР<br>(ЭП 693)                                                                                     | Прутки            | Закалка при 1080...1110 °С, выдержка 2 ч, охлаждение на воздухе. Старение при 900 °С, выдержка 5 ч | ТУ 14-1-3759–84 | 950                       | 530                  | 32           | 37         | —                                        |           |
|                                                                                                            |                   | Закалка при 1000 °С, выдержка 4 ч, охлаждение на воздухе. Старение при 700 °С, выдержка 16 ч       |                 | 1050                      | 680                  | 25           | 30         |                                          |           |
|                                                                                                            |                   | Закалка при 1150 °С, выдержка 3 ч, охлаждение на воздухе. Старение при 800 °С, выдержка 16 ч       | ТУ 14-1-3741–84 | 1100...1150               | 670...700            | 35...40      |            |                                          |           |
| ХН56ВМТЮ<br>(ЭП 199, ВЖ 101)                                                                               |                   | Закалка при 1150...1200 °С, охлаждение на воздухе                                                  | ТУ 14-1-1508–75 | 1050                      | —                    | 25           | —          |                                          |           |
| Закалка с 1080...1100 °С, выдержка 2...4 ч, охлаждение на воздухе. Старение при 760 °С, выдержка 12...16 ч |                   | ТУ 14-1-2786–79                                                                                    | 1250            | 800                       | 20                   | 22           | 3          |                                          |           |
| ХН50МВКТЮР<br>(ЭП 99)                                                                                      |                   |                                                                                                    | ТУ 14-1-1476–75 | 1200                      |                      | 17           | 19         | 2,5                                      | —         |

### 1.3. СПЛАВЫ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ

#### 1.3.1. Сплавы на основе алюминия

Алюминиевые сплавы очень широко применяются в авиационной промышленности для изготовления как планера, так и авиационных двигателей. Они подразделяются на деформируемые и литейные. Последние в данной главе не рассматриваются. Деформируемые алюминиевые сплавы в зависимости от химического состава подразделяют на семь групп: например, сплавы алюминия с магнием и марганцем, алюминия с медью, магнием и марганцем и др.

Деформируемые алюминиевые сплавы делят на упрочняемые и неупрочняемые термической обработкой.

Термически неупрочняемые сплавы — это сплавы алюминия с марганцем (АМц) и алюминия с магнием и марганцем (АМг). Они обладают умеренной прочностью, высокой коррозионной стойкостью, хорошими свариваемостью и пластичностью.

Термически упрочняемые алюминиевые сплавы приобретают высокие механические свойства и высокую коррозионную стойкость только в результате термической обработки. Наиболее распространены сплавы алюминия с медью, магнием и марганцем (дюралюмины) и алюминия с медью, магнием и марганцем и цинком (сплавы высокой прочности). Дюралюмины маркируют буквой Д, после которой стоит цифра, обозначающая условный номер сплава.

Термическая обработка алюминиевых сплавов включает в себя закалку и естественное или искусственное старение.

#### 1.3.2. Сплавы на основе магния

В зависимости от способа получения изделий магниевые сплавы подразделяют на литейные и деформируемые.

Деформируемые магниевые сплавы предназначены для изготовления полуфабрикатов (листов, прутков, профилей) обработкой давлением. Их маркируют буквами МА и цифрами, обозначающими порядковый номер сплава, например МА5. Сплавы магния применяют для изготовления различных деталей в авиационной промышленности. Ввиду низкой коррозионной стойкости магниевых сплавов детали из них подвергают оксидированию с последующим нанесением лакокрасочных покрытий.

#### 1.3.3. Сплавы на основе меди

Медные сплавы подразделяют главным образом на латуни и бронзы. Латуни — это сплавы меди с цинком, являющимся основным легирующим элементом. Введение цинка позволяет повысить механические свойства меди, пределы прочности, текучести, пропорциональности, твердость и удлинение. Латуни отличаются высокими технологичностью и литейными свойствами, высокой пластичностью, удовлетворительно обрабатываются резанием.

Бронзы представляют собой сплавы меди, содержащие в качестве основного легирующего элемента какой-либо другой металл, кроме цинка.

1.7. Основные деформируемые сплавы на основе алюминия, меди и магния

| Марка материала | ГОСТ, ТУ                         | Вид полуфабриката      | Обработка давлением                                                                                                                    | Область применения                                                                                                                                                                       |
|-----------------|----------------------------------|------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Д1              | ГОСТ 21488–97                    | Прутки<br>прессованные | Деформируется в горячем и холодном состояниях. Температурный интервал деформации: на прессе при 470...420 °С, на моте при 450...380 °С | Элементы конструкций самолета средней прочности: детали каркаса, штампованные узлы крепления, стойки, лопасти воздушных винтов; детали, изготавливаемые высадкой; болты; заклепки        |
| Д16             | ГОСТ 21488–97,<br>ОСТ 1.90048–90 |                        | Деформируется в горячем и холодном состояниях. Температурный интервал деформации 450...380 °С                                          | Основные силовые элементы конструкции самолета (детали каркаса, обшивка, шпангоуты, нервюры, лонжероны), за исключением штампованных деталей                                             |
| Д19             | ОСТ 1.90048–90<br>и 1.90395–91   |                        | Деформируется в горячем и холодном состояниях. Температурный интервал деформации на прессе при 470...400 °С, на моте при 450...380 °С  | Рекомендуется применение в виде профилей в конструкциях, работающих при температурах 125...250 °С                                                                                        |
| Д20             |                                  |                        | Деформируется в горячем и холодном состояниях. Температурный интервал деформации 470...350 °С                                          | Детали, работающие при температурах 250...350 °С (диски, лопатки турбореактивных двигателей); сварные детали, емкости и т.д., работающие при комнатной и высоких температурах: до 300 °С |

Продолжение табл. 1.7

|       |                |                        |                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|-------|----------------|------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| АВ    | ГОСТ 21488–97  | Прутки<br>прессованные | Деформируется в горячем и холодном состояниях. Температурный интервал деформации 470...350 °С                                            | Детали самолетов и двигателей, для изготовления которых необходимы высокопластичные в холодном и горячем состояниях материалы с высокой коррозионной стойкостью: лопасти вертолетов, штампованные и кованые детали сложной формы, работающие в интервале температур –70...+50 °С |
| ВД17  | ОСТ 1.90395–91 |                        | Деформируется в горячем и холодном состояниях. Температурный интервал деформации: на прессе при 470...400 °С; на молоте при 450...380 °С | Лопатки осевых компрессоров турбореактивных двигателей, работающие при температурах до 250 °С                                                                                                                                                                                    |
| АК4   | ГОСТ 21488–97  |                        | Деформируется в горячем состоянии. Температурный интервалковки 450...350 °С                                                              | Лопатки компрессора, крыльчатки, диски, кольца, поршни и другие детали двигателя, работающие при высоких температурах                                                                                                                                                            |
| АК4-1 |                |                        | Деформируется в горячем состоянии. Температурный интервал деформации 470...350 °С                                                        | Крыльчатки, заборники, диски, обшивка и силовой набор фюзеляжей сверхзвуковых самолетов; поршни авиационных двигателей                                                                                                                                                           |
| АК6   |                |                        | Деформируется в горячем и холодном состояниях. Температурный интервал деформации 470...350 °С                                            | Штампованные и кованые детали сложной формы                                                                                                                                                                                                                                      |

Продолжение табл. 1.7

| Марка материала | ГОСТ, ТУ      | Вид полуфабриката      | Обработка давлением                                                                                                         | Область применения                                                                                                                                                                          |
|-----------------|---------------|------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| АМц             | ГОСТ 21488–97 | Прутки<br>прессованные | Деформируется в горячем и холодном состояниях. Температурный интервал деформации 470...320 °С                               | Сварные авиабаки, бензо- и маслопроводы и другие машинонагруженные детали, изготавливаемые глубокой вытяжкой                                                                                |
| АМг2            |               |                        |                                                                                                                             | Сварные авиабаки, бензо- и маслопроводы и другие средненагруженные детали самолета                                                                                                          |
| АМг5            |               |                        |                                                                                                                             | Нагруженные коррозионно-стойкие сварные конструкции                                                                                                                                         |
| АМг6            |               |                        | Деформируется в горячем и холодном состояниях. Температурный интервал деформации 430...320 °С                               | Нагруженные коррозионно-стойкие сварные конструкции. Сплав может быть рекомендован для деталей, работающих в холодном состоянии, сварных емкостей, силовых деталей, обшивки деталей каркаса |
| АК8             |               |                        | Деформируется в горячем состоянии. Температурный интервал деформации на прессе при 470...400 °С, на молоте при 450...380 °С | Высоконагруженные штампованные и кованые детали самолета: рамы, фитинги, высоконагруженные детали конструкции                                                                               |

Продолжение табл. 1.7

|      |               |                        |                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                |
|------|---------------|------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| АД31 | ГОСТ 21488–97 | Прутки<br>прессованные | Деформируется в горячем состоянии. Температурный интервал деформации 470...380 °С | Детали, от которых требуется высокая коррозионная стойкость и хороших декоративный вид, работающие в интервале температур –70...+50 °С. Сплав применяется для отделки кабин самолетов и вертолетов с различными цветowymi покрытиями           |
| АД33 |               |                        |                                                                                   | Детали средней прочности для работы в интервале температур –70...+50 °С, коррозионно-стойкие во влажной и морской среде; лопасти вертолетов, барабаны колес гидросамолетов. Сплав применяется также в судостроении и гражданском строительстве |
| АД35 |               |                        |                                                                                   | Рекомендуется для деталей, работающих в интервале температур –70...+50 °С, от которых требуется повышенная коррозионная стойкость и равномерная структура практически без крупнокристаллического обода                                         |
| АД1  |               |                        |                                                                                   | Несилловые элементы конструкции, в том числе детали вентиляционной системы самолета, защитные трубки электропроводки, прокладки и т.д.                                                                                                         |

Продолжение табл. 1.7

| Марка материала | ГОСТ, ТУ       | Вид полуфабриката            | Обработка давлением                                                                                                                                    | Область применения                                                                                                                                                             |
|-----------------|----------------|------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| В95             | ГОСТ 21488—97  | Прутки прессованные          | Деформируется в горячем и холодном состояниях. Температурный интервал деформации: на прессе при 430...350 °С, на молоте при 400...320 °С               | Основные силовые элементы конструкции самолета: лонжероны, стрингеры, шпангоуты, обшивки, нервюры, стыковые гребенки, рамы, детали шасси и т.д.                                |
|                 |                |                              | При обработке давлением выдерживает без промежуточных отжигов обжатие до 85...95 %. Температура горячей обработки 800...900 °С                         | Шины, контакты и другие тоководущие детали, трубопроводы, шайбы, заклепки, ниппели, прокладки и др.                                                                            |
|                 |                |                              | Обрабатывается давлением в горячем и холодном состояниях. Температура прессования иковки 640...780 °С                                                  | Трубы, стопоры, винты, штифты, шпильки, ниппели, футорки, корпусы кранов, прокладки, кольца, гайки, распылители, жиглеры, тройники, тяги, втулки, сужари, угольники, контровки |
|                 |                |                              | Обрабатывается давлением в горячем и холодном состояниях. Температура прессования 650...800 °С. В отожженном состоянии пригодна для глубокой штамповки | Трубопроводы, прокладки, шайбы, кольца, футорки, штифты, заклепки, контровки, оплетки шлангов и др.                                                                            |
| Л63             | ГОСТ 2060—2006 | Прутки тянутые прессованные  | Обрабатывается давлением в горячем и холодном состояниях. Температура прессования 950...1150 °С                                                        | Детали, работающие в агрессивных средах: рабочие колеса насосов, корпусы, клапаны, тройники, втулки, краны и т.п.                                                              |
| НМЖМп28-2,5-1,5 | ГОСТ 1525—91   | Прутки тянутые горячекатаные |                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                |



Продолжение табл. 1.7

|                |               |                                            |                                                                                                                      |                                                                                                                                       |
|----------------|---------------|--------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| БрАЖ9-4        |               |                                            | Обрабатывается давлением в горячем состоянии. Температура прессования иковки 750...850 °С                            | Шестерни, шайбы, фланцы, упорные кольца, опорные пяты, ниппеля, диски, гайки, секторы управления, кронштейны, коронки станоблизаторов |
| БрАЖН10-4-4    | ГОСТ 1628–78  | Прутки тянутые горячекатаные               | Обрабатывается давлением при температуре 875...900 °С                                                                | Детали, работающие при высоких температурах: шестерни, втулки, гайки, шаровые пяты и фланцы                                           |
| БрАЖМц10-3-1,5 |               |                                            | Обрабатывается давлением при температуре 775...825 °С                                                                | Коромысла, втулки, маховики, диски, обоймы и гайки крепления подшипников, направляющие траверсы, ниппеля, шестерни                    |
| БрОФ6,5-0,15   |               | Прутки тянутые холоднокатаные прессованные | Обрабатывается давлением при температуре 750...800 °С                                                                | Пружинные контакты, мембраны, шайбы антифрикционного назначения, подшипники                                                           |
| БрБ2           | ГОСТ 15835–70 | Прутки тянутые прессованные                | Обрабатывается давлением в горячем и холодном состояниях (после закалки). Температура горячей обработки 750...800 °С | Особо ответственные плоские пружины, пружинящие контакты и мембраны, радиаторные трубки, сильфоны                                     |
| МА1            | ГОСТ 18351–73 | Прутки горячепрессованные                  | Деформируется в горячем и холодном состояниях. Температурный интервал горячей деформации 300...480 °С                | Сварные и штампованные детали, детали арматуры бензо- и масляным и детали несложной конфигурации, не несущие больших нагрузок         |

Продолжение табл. 1.7

| Марка материала | ГОСТ, ТУ      | Вид полуфабриката        | Обработка давлением                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | Область применения                                                                                                                                                         |
|-----------------|---------------|--------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| МА2             | ГОСТ 18351–73 | Прутки горячепресованные | Деформируется в горячем состоянии:<br>— ковка при 440...350 °С;<br>— прессование при 380...320 °С;<br>— рубка на молоте при 440...320 °С;<br>— штамповка на молоте и механическом ко- вочном прессе при 430...340 °С;<br>— штамповка на гид- равлическом и фрик- ционном прессе при 420...320 °С;<br>— нагартовка на молоте и прессе при 230...250 °С | Кованые и штампованные детали сложной формы для длительной работы при тем- пературах до 150 °С и крат- ковременной работы — в условиях нагрева до 200 °С                   |
|                 |               |                          | Деформируется в горячем состоянии:<br>— прессование при 320...360 °С;<br>— ковка на прессе при 300...380 °С;<br>— штамповка при 300...380 °С                                                                                                                                                                                                          | Нагруженные детали (под- моторные рамы, качалки, кронштейны и другие по- добные детали), работаю- щие длительно при темпе- ратурах до 150 °С и крат- коременно — до 200 °С |

1.8. Химический состав основных деформируемых сплавов на основе алюминия, меди и магния

| Марка материала | ГОСТ, ОСТ       | Химический состав, % |           |           |             |             |             |
|-----------------|-----------------|----------------------|-----------|-----------|-------------|-------------|-------------|
|                 |                 | Al                   | Si        | Fe        | Cu          | Mn          | Mg          |
| Д1              | ГОСТ 4784–97    |                      | 0,2...0,8 | 0,7       | 3,5...4,5   | 0,4...1,0   | 0,4...0,8   |
| Д16             |                 |                      | 0,5       |           | 3,8...4,9   | 0,3...0,9   | 1,2...1,8   |
| Д19             | ОСТ 1.90048–90  |                      | 0,3       |           | 3,8...4,3   | 0,5...1,0   | 1,7...2,3   |
| Д20             |                 |                      |           |           | 6...7       | 0,4...0,8   | 0,05        |
| АВ              | ГОСТ 4784–97    |                      | 0,5...1,2 | 0,5       | 0,1...0,5   | 0,15...0,35 | 0,45...0,90 |
| ВД17            | ОСТ 1.90048–90  |                      | 0,3       |           | 2,6...3,2   | 0,45...0,70 | 2,0...2,4   |
| АК4             |                 |                      | 0,5...1,2 | 0,8...1,3 | 1,9...2,5   | 0,2         | 1,4...1,8   |
| АК4-1           |                 |                      | 0,35      | 0,8...1,4 | 1,9...2,7   |             | 1,2...1,8   |
| АК-6            |                 |                      | 0,7...1,2 | 0,7       | 1,8...2,6   | 0,4...0,8   | 0,4...0,8   |
| АМц             |                 |                      | 0,6       |           | 0,05...0,20 | 1,0...1,5   | —           |
| АМг2            |                 |                      | 0,4       | 0,5       | 0,15        | 0,1...0,5   | 1,7...2,4   |
| АМг5            |                 |                      | 0,5       |           | 0,1         | 0,3...0,8   | 4,8...5,8   |
| АМг6            | ГОСТ 4784–97    |                      | 0,4       |           |             | 0,5...0,8   | 5,8...6,8   |
| АК8             |                 |                      |           |           |             | 0,4...1,0   | 0,2...0,8   |
| АД31            |                 |                      | 0,06      | 0,5       | 0,1         | 0,1         | 0,45...0,90 |
| АД33            |                 |                      | 0,4...0,8 | 0,7       |             |             | 0,8...1,2   |
| АД35            |                 |                      | 0,7...1,3 | 0,5       | 0,1         | 0,4...1,0   | 0,6...1,2   |
| АД1             |                 |                      | 0,3       |           | 0,05        | 0,025       | 0,05        |
| В95             |                 |                      |           |           | 1,4...2,0   | 0,2...0,6   | 1,8...2,8   |
| М1              | ГОСТ 859–2001   | Cu+Ag 99,9           | Bi 0,001  | 0,005     | Sn 0,002    | Sb 0,002    | As 0,002    |
| М2              |                 | Cu+Ag 99,7           | Bi 0,002  | 0,05      | Sn 0,05     | Sb 0,005    | As 0,01     |
| М3              |                 | Cu+Ag 99,5           | Bi 0,003  |           |             | Sb 0,05     | As 0,05     |
| ЛС59-1          | ГОСТ 15527–2004 | —                    | Bi 0,003  | 0,5       | 57...60     | Sb 0,01     | —           |
| Л63             |                 |                      | Bi 0,002  | 0,2       | 62...65     | Sb 0,005    |             |

Продолжение табл. 1.8

| Марка материала  |  | ГОСТ, ОСТ      | Химический состав, % |      |             |              |                   |               |
|------------------|--|----------------|----------------------|------|-------------|--------------|-------------------|---------------|
|                  |  |                | Al                   | Si   | Fe          | Cu           | Mn                | Mg            |
| НМЖМц2-8-2,5-1,5 |  | ГОСТ 492–2006  | –                    | 0,05 | 2...3       | 27...29      | 1,2...1,8         | 0,1           |
| БрАЖ9-4          |  | ГОСТ 18175–78  | 8...10               | 0,1  | 2...4       | Остальное    | 0,5               | –             |
| БрАЖН10-4-4      |  |                | 9,5...11,0           |      | 3,5...5,5   |              | 0,3               |               |
| БрАЖМц10-3-1,5   |  |                | 9...11               |      | 2...4       |              | 1...2             |               |
| БрОФ6,5-0,15     |  | ГОСТ 5017–2006 | 0,002                |      | 0,02        |              | Остальное         | Р 0,26...0,40 |
| БрБ2             |  | ГОСТ 18175–78  | 0,15                 |      | 0,05        | Be 1,8...2,1 |                   | –             |
| МА1              |  | 0,1            |                      |      |             | 1,3...2,5    |                   |               |
| МА2              |  | 3...4          |                      |      |             | 0,15...0,50  | Основа            |               |
| МА5              |  | 7,8...9,2      |                      |      |             |              |                   |               |
|                  |  |                | Химический состав, % |      |             |              |                   |               |
| Марка материала  |  | ГОСТ, ОСТ      | Cr                   | Zn   | Ti          | Ni           | Другие элементы   |               |
| Д1               |  | ГОСТ 4784–97   | 0,1                  | 0,25 | 0,15        | –            | Ti+Zr 0,2         |               |
| Д16              |  |                |                      |      |             |              |                   |               |
| Д19              |  | ОСТ 1.90048–90 | –                    | 0,1  | 0,1...0,2   |              | Be 0,0002...0,005 |               |
| Д20              |  |                |                      |      |             |              | ГОСТ 4784–97      | 0,1           |
| АВ               |  | ГОСТ 4784–97   | 0,25                 | 0,1  | 0,8...1,3   | –            |                   |               |
| ВД17             |  | ОСТ 1.90048–90 | –                    |      |             |              |                   |               |
| АК4              |  |                |                      |      |             |              |                   |               |
| АК4-1            |  | ГОСТ 4784–97   | 0,1                  | 0,3  | 0,02...0,10 | 0,8...1,4    | –                 |               |
| АК-6             |  |                |                      |      |             |              |                   |               |
| АМц              |  |                | –                    | 0,1  | 0,1         | 0,1          |                   |               |
| АМГ2             |  |                |                      |      |             |              |                   |               |
| АМГ5             |  | ГОСТ 4784–97   | 0,05                 | 0,15 | 0,15        | –            | Be 0,0002...0,005 |               |
|                  |  |                |                      | –    | 0,2         | 0,02...0,1   | –                 |               |

Окончание табл. 1.8

|                  |                 |              |           |                    |           |                     |
|------------------|-----------------|--------------|-----------|--------------------|-----------|---------------------|
| АМг6             | ГОСТ 4784–97    | 0,1          | –         |                    | –         | –                   |
| АК8              |                 |              | 0,25      | 0,15               |           |                     |
| АД31             |                 |              | 0,2       |                    |           |                     |
| АД33             |                 |              | 0,25      |                    |           |                     |
| АД35             | ГОСТ 4784–97    | 0,25         | 0,20      | 0,1                | –         | –                   |
| АД1              |                 | –            | 0,1       | 0,15               |           |                     |
| В95              |                 | 0,10...0,25  | 5...7     | 0,05               |           |                     |
| М1               |                 | Pb 0,005     | 0,004     | S0,004             |           |                     |
| М2               | ГОСТ 859–2001   | Pb 0,01      | –         | S 0,01             | 0,2       | O <sub>2</sub> 0,05 |
| М3               |                 | Pb 0,05      |           |                    |           | O <sub>2</sub> 0,07 |
| ЛС59-1           | ГОСТ 15527–2004 | Pb 0,8...1,9 | Остальное | Sn 0,3             | P 0,02    | O <sub>2</sub> 0,08 |
| Л63              |                 | 0,07         |           |                    | P 0,01    |                     |
| НМЖМц2-8-2,5-1,5 | ГОСТ 492–2006   | –            |           | Ni+Co<br>остальное |           | –                   |
| БрАЖ9            | ГОСТ 18175–78   | –            | 1,0       | P 0,01             | Sn 0,1    | Pb 0,01             |
| БрАЖН10-4-4      |                 | Sn 0,1       | 0,3       |                    | 3,5...5,5 | Pb 0,02             |
| БрАЖМц10-3-1,5   |                 | –            | 0,5       |                    | Sn 0,1    | Pb 0,03             |
| БрОФ6,5-0,15     | ГОСТ 5017–2006  | Pb 0,02      | 0,03      | Sb 0,002           | 0,1...0,2 | Bi 0,002            |
| БрБ2             | ГОСТ 18175–78   | Pb 0,005     | –         | –                  | 0,2...0,5 | –                   |
| МА1              | ГОСТ 14957–76   | –            | 0,3       |                    | 0,007     | Be 0,002            |
| МА2              |                 |              | 0,2...0,8 |                    | 0,005     |                     |
| МА5              |                 |              |           |                    |           |                     |

1.9. Режимы термической обработки и механические свойства основных деформируемых сплавов на основе алюминия, меди и магния

| Марка материала | Вид полуфабриката   | Термообработка                                                                                                                                                                                                            | ГОСТ, ОСТ      | Механические свойства, не менее |                      |              |    |
|-----------------|---------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|---------------------------------|----------------------|--------------|----|
|                 |                     |                                                                                                                                                                                                                           |                | $\sigma_B$ , МПа                | $\sigma_{0,2}$ , МПа | $\delta$ , % | НВ |
| Д1              |                     | Закалка с 495...510 °С в воде и последующее естественное старение $\geq 4$ сут                                                                                                                                            | ГОСТ 21488–97  | 355                             | 195                  | 10           |    |
|                 |                     | Закалка с 495...500 °С в воде и последующее естественное старение $\geq 4$ сут                                                                                                                                            |                |                                 |                      |              |    |
| Д16             |                     |                                                                                                                                                                                                                           |                |                                 | 245                  | 6            |    |
| Д19             | Прутки прессованные | Закалка с 495...505 °С в воде и последующее естественное старение $\geq 5$ сут                                                                                                                                            | ОСТ 1.90395–91 | 390                             | 275                  | 10           | —  |
|                 |                     | Закалка с (535 $\pm$ 5) °С в воде и последующее искусственное старение при 165...175 °С в течение 10...16 ч (для деталей, работающих кратковременно) и при 200...220 °С – 12 ч (для деталей, работающих длительное время) |                |                                 |                      |              |    |
| Д20             |                     |                                                                                                                                                                                                                           |                | 355                             | 235                  | 8            |    |

Продолжение табл. 1.9

|                     |                                                                                                                                    |                |                                          |                                          |                                         |
|---------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|------------------------------------------|------------------------------------------|-----------------------------------------|
| АВ                  | Закалка с 515...525 °С в воде и естественное старение в течение 10...15 сут или искусственное при 165±5 °С в продолжение 10...12 ч | ГОСТ 21488—97  | При закалке + естественном старении 175  | При закалке и естественном старении 100  | При закалке и естественном старении 14  |
|                     |                                                                                                                                    |                | При закалке + искусственном старении 295 | При закалке + искусственном старении 225 | При закалке + искусственном старении 12 |
| ВД17                | Закалка с (500±5) °С в воде и искусственное старение при (195±5) °С в течение 8...12 ч                                             | ОСТ 1.90395—91 | 430                                      | 275                                      | 10                                      |
| АК4                 | Закалка с 520...540 °С в воде, искусственное старение при температуре (170±5) °С в течение 16 ч                                    | ГОСТ 21488—97  | 335                                      | —                                        | 8                                       |
|                     | Закалка с (530±5) °С в воде, искусственное старение при 190...200 °С в течение 12...16 ч                                           |                | 390                                      | 315                                      | 6                                       |
| АК6                 | Закалка с 500...515 °С в воде и искусственное старение при 150...165 °С в течение 10...15 ч                                        |                | 335                                      | —                                        | 12                                      |
| Прутки прессованные |                                                                                                                                    |                |                                          |                                          |                                         |
| —                   |                                                                                                                                    |                |                                          |                                          |                                         |

Продолжение табл. 1.9

| Марка материала             | Вид полу-<br>фабриката      | Термообработка                                                                                                                                     | ГОСТ, ОСТ     | Механические свойства, не менее                     |                                                              |                                                     |    |  |
|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|-----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|----|--|
|                             |                             |                                                                                                                                                    |               | $\sigma_{\text{в}}$ , МПа                           | $\sigma_{0,2}$ , МПа                                         | $\delta$ , %                                        | НВ |  |
| АМц                         | Прутки<br>прессован-<br>ные | Термической обра-<br>боткой сплав не<br>упрочняется                                                                                                | ГОСТ 21488—97 | Без термооб-<br>работки 100                         | —                                                            | 20                                                  |    |  |
|                             |                             |                                                                                                                                                    |               | Без термооб-<br>работки 175                         |                                                              | Без термооб-<br>работки 13                          |    |  |
| Отоженные<br>265            |                             |                                                                                                                                                    |               | Отожен-<br>ные 120                                  | Отоженные<br>15                                              |                                                     |    |  |
| Без термооб-<br>работки 245 |                             |                                                                                                                                                    |               | Без термо-<br>обработки<br>110                      | Без термообра-<br>ботки 10                                   |                                                     |    |  |
| Отоженные<br>315            |                             |                                                                                                                                                    |               | Отожен-<br>ные 155                                  | Отоженные<br>15                                              |                                                     |    |  |
| Без термооб-<br>работки 90  |                             |                                                                                                                                                    |               | Без термо-<br>обработки<br>60                       | Без термообра-<br>ботки 15                                   |                                                     |    |  |
| АК8                         |                             | Закалка с<br>490...505 °С в воде,<br>искусственное ста-<br>рение при 150...165<br>°С в течение<br>10...15 ч                                        |               | 460                                                 | 335                                                          | 8                                                   | —  |  |
|                             |                             |                                                                                                                                                    |               | При закалке +<br>естествен-<br>ное старение<br>135  | При закал-<br>ке + есте-<br>ственное<br>старение 70          | При закалке +<br>естествен-<br>ное старение<br>13   |    |  |
| АД31                        |                             | Закалка с (520±5) °С<br>в воде и естественное<br>старение в течение<br>10...15 сут или искус-<br>ственное при<br>(165±5) °С в течение<br>10...12 ч |               | При закалке +<br>искусствен-<br>ное старение<br>291 | При закал-<br>ке + ис-<br>кусствен-<br>ное старе-<br>ние 145 | При закалке +<br>искусст-<br>венное старе-<br>ние 8 |    |  |
|                             |                             |                                                                                                                                                    |               |                                                     |                                                              |                                                     |    |  |



Продолжение табл. 1.9

|      |                     |                                                                                                                                |               |                                          |                                          |                                         |
|------|---------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|------------------------------------------|------------------------------------------|-----------------------------------------|
| АД33 |                     | Закалка с (520±5) °С в воде и естественное старение в течение 10...15 сут или искусственное при (165±5) °С в течение 10...12 ч | ГОСТ 21488—97 | При закалке + естественное старение 175  | При закалке + естественное старение 110  | При закалке + естественное старение 15  |
|      |                     |                                                                                                                                |               | При закалке + искусственное старение 265 | При закалке + искусственное старение 225 | При закалке + искусственное старение 10 |
| АД35 | Прутки прессованные |                                                                                                                                |               | При закалке + естественное старение 195  | При закалке + естественное старение 110  | При закалке + естественное старение 112 |
|      |                     |                                                                                                                                |               | При закалке + искусственное старение 315 | При закалке + искусственное старение 245 | При закалке + искусственное старение 8  |
| АД1  |                     | Термической обработкой сплав не упрочняется                                                                                    |               | Без термообработки 60                    | Без термообработки —                     | Без термообработки 25                   |
| В95  |                     | Закалка с 465...480 °С в воде и искусственное старение при 135...145 °С                                                        |               | 490                                      | 390                                      | 6                                       |

Продолжение табл. 1.9

| Марка материала | Вид полу-<br>фабриката       | Термообработка                                                                 | ГОСТ, ОСТ      | Механические свойства, не менее                                                            |                                                                                        |           |
|-----------------|------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
|                 |                              |                                                                                |                | $\sigma_{0,2}$ , МПа                                                                       | $\delta$ , %                                                                           | НВ        |
| М1              |                              |                                                                                | ГОСТ 1535–2006 | Тянутые мягкие — 200; тянутые полутвердые — 240; тянутые твердые — 270; прессованные — 190 | Тянутые мягкие — 35; тянутые полутвердые — 10; тянутые твердые — 5; прессованные — 30  |           |
| М2              |                              |                                                                                |                |                                                                                            |                                                                                        |           |
| М3              |                              |                                                                                |                |                                                                                            |                                                                                        |           |
| ЛС59-1          | Прутки тянутые прессованные  | Термической обработкой не упрочняется                                          | ГОСТ 2060–2006 | Прессованные — 360; тянутые мягкие — 340; тянутые полутвердые — 430; тянутые твердые — 490 | Прессованные — 23; тянутые мягкие — 32; тянутые полутвердые — 14; тянутые твердые — 12 | —         |
| Л63             |                              |                                                                                |                | Прессованные — 290; тянутые мягкие — 290; тянутые полутвердые — 370; тянутые твердые — 440 | Прессованные — 39; тянутые мягкие — 46; тянутые полутвердые — 27; тянутые твердые — 14 |           |
| НМЖМц28-2,5-1,5 | Прутки тянутые горячекатаные | Закалка с 900 °С, нагрев 2 ч, охлаждение в воде; отпуск 400 °С, выдержка 1,5 ч | ГОСТ 1525–91   | Тянутые мягкие — 440; тянутые твердые — 590                                                | Тянутые мягкие — 25; тянутые твердые — 10                                              | 110...180 |
| БрАЖ9-4         | Прутки прессованные          |                                                                                | ГОСТ 1628–78   | Без термообработки 640                                                                     | 5                                                                                      | 170...220 |

Окончание табл. 1.9

|                |                                                                |                                                                                                                                                       |               |                                                                                                                                                                      |    |                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                              |
|----------------|----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| БрАЖМц10-3-1,5 | Прутки тя-<br>нутые го-<br>рячеката-<br>ные                    | Закалка с<br>850...880 °С, охлаж-<br>дение в воде и от-<br>пуск при<br>300...350 °С                                                                   | ГОСТ 1628-78  | Без термооб-<br>работки 590                                                                                                                                          |    | 12                                                                                                                                                       | 130...200                                                                                                                                                                    |
| БрОФ6,5-0,15   | Прутки тя-<br>нутые хо-<br>лодноката-<br>ные пресс-<br>ованные | Термической обра-<br>боткой не упрочня-<br>ется                                                                                                       | ГОСТ 10025-78 | Тянутые хо-<br>лоднокатаные:<br>— мягкие —<br>353;<br>— полу-<br>твердые —<br>392;<br>— твердые —<br>470;<br>— особо<br>твердые —<br>548.<br>Прессован-<br>ные — 343 | —  | Тянутые хо-<br>лоднокатаные:<br>— мягкие —<br>40;<br>— полутвер-<br>дые — 18;<br>— твердые —<br>12;<br>— особо<br>твердые — 6.<br>Прессован-<br>ные — 55 | Тянутые хо-<br>лодноката-<br>ные:<br>— мяг-<br>кие — 70;<br>— полу-<br>твердые —<br>120;<br>— твердые<br>— 140;<br>— особо<br>твердые —<br>150.<br>Прессо-<br>ванные —<br>70 |
|                |                                                                |                                                                                                                                                       |               |                                                                                                                                                                      |    | 2,0                                                                                                                                                      | 340                                                                                                                                                                          |
|                |                                                                |                                                                                                                                                       |               |                                                                                                                                                                      |    | 2,0                                                                                                                                                      | —                                                                                                                                                                            |
| БрБ2           | Прутки<br>прессован-<br>ные                                    | Закалка при 780 °С (в<br>воздушной среде или<br>в среде диссоцииро-<br>ванного аммиака<br>охлаждение в воде),<br>отпуск при 315 °С<br>в течение 3,5 ч | ГОСТ 15835-70 | 1180                                                                                                                                                                 |    |                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                              |
| МА1            |                                                                | Термической<br>обработкой не<br>упрочняется                                                                                                           | ГОСТ 18351-73 | 170                                                                                                                                                                  | 13 | 2,0                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                              |
| МА2            |                                                                | Закалка с<br>410...425 °С, вы-<br>держка 2...4 ч, охла-<br>ждение на воздухе                                                                          |               | 176,4                                                                                                                                                                | —  | 5,0                                                                                                                                                      | —                                                                                                                                                                            |
| МА5            |                                                                |                                                                                                                                                       |               |                                                                                                                                                                      |    |                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                              |

Медные сплавы, легированные никелем: мельхиор (МН19), нейзильбер (МНц 15-20), монель (НМЖМц 28-2,5-1,5).

Медь и ее сплавы (простые и специальные латуни, оловянистые и безоловянистые бронзы), а также медные сплавы, содержащие значительное количество никеля, применяются в авиадвигателестроении для изготовления деталей различного назначения, требующих повышенной коррозионной стойкости, специальных физических свойств и высокой технологичности. Все сплавы на основе меди высоко технологичны, хорошо свариваются, паяются, удовлетворительно обрабатываются резанием и пластической деформацией.

Основные деформируемые сплавы на основе алюминия, магния и меди приведены в табл. 1.7. Химический состав этих сплавов представлен в табл. 1.8, а режимы термической обработки и физико-механические свойства — в табл. 1.9.

#### 1.4. СПЛАВЫ НА ОСНОВЕ ТИТАНА

Титан — серебристо-белый металл с малой плотностью ( $4,5 \text{ г/см}^3$ ) и высокой температурой плавления ( $1672^\circ\text{C}$ ). Титан имеет две аллотропические модификации:  $\alpha$ -низкотемпературную с плотно упакованной гексагональной решеткой и  $\beta$ -высокотемпературную с кубической объемно-центрированной решеткой. Температура  $\alpha$ - $\beta$ -перехода равна  $882^\circ\text{C}$ .

В настоящее время известны несколько классификаций титановых сплавов, которые основаны на видах, типах структур в отожженном и закаленном состоянии. При этом в закаленном состоянии сплавы разделяют на две подгруппы: твердеющие при закалке, когда в результате ее получают твердую  $\alpha'$ -мартенситную структуру с той же кристаллической решеткой, что и  $\alpha$ -фаза, и мягкие после закалки, когда неравновесным состоянием является  $\alpha$ -фаза. Среди титановых сплавов выделяют стареющие сплавы, т. е. упрочняемые за счет фазовых переходов и термически неупрочняемые.

Сплавы со структурой  $\beta$ -фазы, получаемой в результате закалки, подразделяют на следующие  $\beta$ -сплавы: термически стабильные; механически стабильные и механически нестабильные.

По назначению титановые сплавы классифицируют на конструкционные, жаростойкие, жаропрочные и сплавы с особыми свойствами.

По способам получения различают литейные и деформируемые сплавы. По прочности все титановые сплавы делят на три группы: малопрочные ( $\sigma_b \leq 60 \text{ кгс/мм}^2$ ), средней прочности ( $\sigma_b = 60 \dots 100 \text{ кгс/мм}^2$ ) и высокой прочности ( $\sigma_b > 100 \text{ кгс/мм}^2$ ). Но основным видом классификации титановых сплавов является классификация по структуре сплава в отожженном состоянии. Эта классификация наиболее распространена.

Перечень марок деформируемых титановых сплавов, условия деформирования и области применения приведены в табл. 1.10. Химический состав основных деформируемых титановых сплавов представлен в табл. 1.11, а режимы термической обработки и механические свойства сплавов — в табл. 1.12.

**1.10. Деформируемые титановые сплавы**

| Марка материала | Вид полуфабриката | Обработка давлением                                                                                                       | Область применения                                                                                                                                                                                            |
|-----------------|-------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| BT5             | Прутки            | Деформируется в горячем состоянии. Температурный интервал штамповки 1020...900 °С. Охлаждение после деформации на воздухе | Сварные узлы и детали, длительно (до 10 000 ч) работающие при температурах до 350...400 °С                                                                                                                    |
| BT5-1           | Листы             | Штамповка в горячем состоянии в интервале температур 600...750 °С                                                         | Сварные силовые детали и узлы, длительно (до 10 000 ч) работающие при температурах до 400...450 °С                                                                                                            |
|                 | Прутки            | Деформируется в горячем состоянии. Температурный интервал штамповки 1020...900 °С. Охлаждение после деформации на воздухе |                                                                                                                                                                                                               |
| OT4-0           | Листы             | Возможна штамповка в холодном состоянии. Штамповка в горячем состоянии в интервале температур 550...700 °С                | Сварные узлы и детали, длительно (до 5000 ч) работающие при температурах до 300 °С. Детали, для изготовления которых требуется высокая технологическая пластичность при холодной штамповке                    |
|                 | Прутки            | Деформируется в горячем состоянии. Температурный интервал штамповки 890...700 °С. Охлаждение после деформации на воздухе  |                                                                                                                                                                                                               |
| OT4-1           | Листы             | Возможна штамповка в холодном состоянии. Штамповка в горячем состоянии в интервале температур 550...700 °С                | Сварные узлы, детали и изделия, длительно (до 30 000 ч) работающие при температурах до 300 °С и при 350 °С (до 2000 ч).<br>Тонкостенные детали сложных форм, обшивки и т.п.<br>Лопатки направляющих аппаратов |
|                 | Прутки            | Деформируется в горячем состоянии. Температурный интервал штамповки 920...750 °С. Охлаждение после деформации на воздухе  |                                                                                                                                                                                                               |

*Продолжение табл. 1.10*

| Марка материала | Вид полуфабриката | Обработка давлением                                                                                                       | Область применения                                                                                                                                                                                                                     |
|-----------------|-------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ОТ4             | Листы             | Штамповка в горячем состоянии в интервале температур 550...700 °С                                                         | Сварные узлы и детали, длительно (до 30 000 ч) работающие при температурах до 300 °С и при 350...400 °С (до 2000 ч); детали и обшивки планера и газотурбинных двигателей; лопатки входного направляющего аппарата                      |
|                 | Прутки            | Деформируется в горячем состоянии. Температурный интервал штамповки 950...800 °С. Охлаждение после деформации на воздухе  |                                                                                                                                                                                                                                        |
| ВТ6             | Листы             | Штамповка в горячем состоянии в интервале температур 650...800 °С                                                         | Сварные тяжелонагруженные детали и узлы, длительно (до 10 000 ч) работающие при температурах до 450 °С; авиационные детали: статоры, кожухи, камеры низкого давления и планеры самолетов; крепежные детали                             |
|                 | Прутки            | Деформируется в горячем состоянии. Температурный интервал штамповки 940...800 °С. Охлаждение после деформации на воздухе  |                                                                                                                                                                                                                                        |
| ВТ20            | Листы             | Штамповка в горячем состоянии в интервале температур 700...900 °С                                                         | Сварные узлы и детали, длительно (до 6000 ч) работающие при температурах до 450...500 °С; обшивки крыла, корпусные детали газотурбинных двигателей и т.п.                                                                              |
|                 | Прутки            | Деформируется в горячем состоянии. Температурный интервал штамповки 1020...850 °С. Охлаждение после деформации на воздухе |                                                                                                                                                                                                                                        |
| ВТ22            | Прутки            | Деформируется в горячем состоянии. Температурный интервал штамповки 920...750 °С. Охлаждение после деформации на воздухе  | Силовые детали и сварные узлы, длительно (до 10 000 ч) работающие при температурах до 350 °С. Крупногабаритные и крепежные детали. Тяжелонагруженные крупногабаритные детали фюзеляжа, крыла шасси, детали системы управления самолета |

*Окончание табл. 1.10*

| Марка материала | Вид полуфабриката | Обработка давлением                                                                                                       | Область применения                                                                                                                                              |
|-----------------|-------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| BT3-1           | Прутки            | Деформируется в горячем состоянии. Температурный интервал штамповки 970...850 °С. Охлаждение после деформации на воздухе  | Детали, длительно (до 6000 ч) работающие при температурах до 400...450 °С. Диски, лопатки компрессора, силовые и крепежные детали, сварные узлы                 |
| BT8             |                   | Деформируется в горячем состоянии. Температурный интервал штамповки 990...850 °С. Охлаждение после деформации на воздухе  | Детали, длительно (до 6000 ч) работающие при температурах до 500 °С. Детали газотурбинных двигателей (диски, лопатки компрессора, силовые детали, сварные узлы) |
| BT9             |                   |                                                                                                                           |                                                                                                                                                                 |
| BT25            |                   | Деформируется в горячем состоянии. Температурный интервал штамповки 1020...850 °С. Охлаждение после деформации на воздухе | Детали, длительно (до 6000 ч) работающие при температурах до 500 °С. Сварные узлы. Детали газотурбинных двигателей (диски и лопатки камеры высокого давления)   |

1.11. Химический состав основных деформируемых титановых сплавов

| Марка материала | Химический состав, % (по ГОСТ 1.90013–81) |           |           |           |           |           |             |           |           |           |
|-----------------|-------------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------------|-----------|-----------|-----------|
|                 | Al                                        | Mn        | V         | Mo        | Cr        | Fe        | Si          | Sn        | Zr        | W         |
| BT5             | 4,3...6,2                                 |           |           |           |           | –         |             |           |           |           |
| BT5-1           | 4...6                                     |           |           | –         |           |           |             | 2...3     |           | –         |
| OT4-0           | 0,2...1,4                                 | 0,2...1,3 |           |           |           |           |             |           |           |           |
| OT4-1           | 1,0...2,5                                 | 0,7...2,0 |           |           |           | –         |             |           |           |           |
| OT4             | 3,5...5,0                                 | 0,8...2,0 |           |           |           |           |             |           |           |           |
| BT6             | 5,5...7,0                                 |           | 4,2...6,0 |           |           | –         |             |           |           |           |
| BT20            | 5,5...7,5                                 |           | 0,8...1,8 | 0,5...2,0 |           | –         |             |           | 1,5...2,5 | –         |
| BT22            | 4,4...5,9                                 |           | 4,0...5,5 |           | 0,5...2,0 | 0,5...1,5 |             | –         |           |           |
| BT3-1           | 5,5...7,0                                 | –         |           |           | 0,8...2,3 | 0,2...0,7 | 0,15...0,40 |           | –         |           |
| BT8             | 6,0...7,3                                 |           |           |           |           |           | 0,2...0,4   |           |           |           |
| BT9             | 5,8...7,0                                 |           | –         | 2,8...3,8 |           | –         | 0,20...0,35 | –         | 0,8...2,5 | –         |
| BT25            | 6,2...7,2                                 |           |           | 1,5...2,5 |           |           | 0,15...0,40 | 0,8...2,5 |           | 0,5...1,5 |

1.12. Режимы термической обработки и механические свойства основных деформируемых титановых сплавов

| Марка материала | Термообработка                               | Вид полуфабриката | ГОСТ, ОСТ, ТУ                                                                 |  | Механические свойства     |                      |
|-----------------|----------------------------------------------|-------------------|-------------------------------------------------------------------------------|--|---------------------------|----------------------|
|                 |                                              |                   |                                                                               |  | $\sigma_{\text{в}}$ , МПа | $\sigma_{0,2}$ , МПа |
| BT5             | Прутки, штамповки.<br>Отжиг при 800...850 °С | Прутки            | ТУ 1-805-135–83 и 1-809-988–92,<br>ОСТ 1.90107–73, 1.90173–75 и<br>1.90266–78 |  | 720                       |                      |
|                 |                                              | Штамповки         | ОСТ 1.90000–70                                                                |  | 730...950                 |                      |
|                 |                                              | Кольца            | ОСТ 1.90099–73                                                                |  | 700...950                 |                      |



Продолжение табл. 1.12

|       |                                                  |                      |                                                                               |            |         |
|-------|--------------------------------------------------|----------------------|-------------------------------------------------------------------------------|------------|---------|
| BT5-1 | Листы, трубы, профили.<br>Отжиг при 700...750 °С | Листы                | ГОСТ 22178-76, ОСТ 190218-76                                                  | 700...950  | 50      |
|       |                                                  | Плиты                | ГОСТ 23755-79, ОСТ 1.90024-94                                                 |            | 50...60 |
|       | Прутки, штамповки.<br>Отжиг при 800...850 °С     | Прутки               | ТУ 1-805-135-83 и 1-809-988-92,<br>ОСТ 1.90107-73, 1.90173-75 и<br>1.90266-78 | 760...1000 | 750     |
|       |                                                  | Штамповки            | ОСТ 1.90000-70                                                                |            |         |
| OT4-0 | Листы, трубы, профили.<br>Отжиг при 590...640 °С | Листы                | ГОСТ 22178-76,<br>ОСТ 190218-76                                               | 500...650  | 50      |
|       |                                                  | Плиты                | ГОСТ 23755-79,<br>ОСТ 1.90024-94                                              |            |         |
|       | Прутки, штамповки.<br>Отжиг при 690...740 °С     | Прутки               | ТУ 1-805-135-83 и 1-809-988-92,<br>ОСТ 1.90107-73, 1.90173-75 и<br>1.90266-78 | 450...650  | —       |
|       |                                                  | Штамповки            | ОСТ 1.90000-70                                                                |            |         |
| OT4-1 | Листы, трубы, профили.<br>Отжиг при 640...690 °С | Листы                | ГОСТ 22178-76,<br>ОСТ 190218-76                                               | 600...750  | 570     |
|       |                                                  | Плиты                | ГОСТ 23755-79,<br>ОСТ 1.90024-94                                              |            |         |
|       | Прутки, штамповки.<br>Отжиг при 740...790 °С     | Прутки               | ТУ 1-805-135-83 и 1-809-988-92,<br>ОСТ 1.90107-73, 1.90173-75<br>и 1.90266-78 | 550...800  | —       |
|       |                                                  | Прутки<br>лопаточные | ОСТ 1.90006-86                                                                |            |         |
|       |                                                  | Штамповки            | ОСТ 1.90000-70                                                                | 550...750  |         |

Продолжение табл. 1.12

| Марка материала | Термообработка                                   | Вид полуфабриката | ГОСТ, ОСТ, ТУ                                                              | Механические свойства |                        |
|-----------------|--------------------------------------------------|-------------------|----------------------------------------------------------------------------|-----------------------|------------------------|
|                 |                                                  |                   |                                                                            | σ <sub>в</sub> , МПа  | σ <sub>0,2</sub> , МПа |
| ОТ4-1           | Прутки, штамповки.<br>Отжиг при 740...790 °С     | Лопатки           | ОСТ 1.90002-86                                                             | 600...800             | —                      |
|                 |                                                  | Кольца            | ОСТ 1.90099-73                                                             |                       |                        |
|                 | Листы, трубы, профили.<br>Отжиг при 660...710 °С | Листы             | ГОСТ 22178-76, ОСТ 190218-76                                               | 750...900             | 700                    |
|                 |                                                  | Плиты             | ГОСТ 23755-79, ОСТ 1.90024-94                                              | 700...900             | —                      |
| ОТ4             | Прутки, штамповки.<br>Отжиг при 740...790 °С     | Прутки            | ТУ 1-805-135-83 и 1-809-988-92,<br>ОСТ 1.90107-73, 1.90173-75 и 1.90266-78 | 650...900             | 820                    |
|                 |                                                  | Прутки лопаточные | ОСТ 1.90006-86                                                             | 700...900             | —                      |
|                 |                                                  | Штамповки         | ОСТ 1.90000-70                                                             | 650...900             |                        |
|                 |                                                  | Лопатки           | ОСТ 1.90002-86                                                             | 700...900             |                        |
|                 |                                                  | Кольца            | ОСТ 1.90099-73                                                             |                       |                        |
|                 |                                                  | Трубы             | —                                                                          |                       |                        |
| ВТ6             | Листы, трубы, профили.<br>Отжиг при 750...800 С  | Листы             | ГОСТ 22178-76, ОСТ 1.90218-76                                              | 900...1100            | 800                    |
|                 |                                                  | Плиты             | ГОСТ 23755-79, ОСТ 1.90024-94                                              | 850...1100            | —                      |
|                 | Прутки, штамповки.<br>Отжиг при 750...900 С      | Прутки            | ТУ 1-805-135-83 и 1-809-988-92,<br>ОСТ 1.90107-73, 1.90173-75 и 1.90266-78 | 850...1120            | 900                    |
|                 |                                                  | Прутки лопаточные | ОСТ 1.90006-86                                                             | 920...1150            | —                      |
|                 |                                                  | Штамповки         | ОСТ 1.90000-70                                                             | 850...1100            |                        |
|                 |                                                  | Диски             | ОСТ 1.90197-89                                                             | 920...1150            |                        |

Продолжение табл. 1.12

|           |                                                                                                                                                                                                                                       |                                                  |                                                                               |                               |                                                                                                |
|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| BT6       | Прутки, штамповки.<br>Отжиг при 750...900 °C                                                                                                                                                                                          | Лопатки                                          | ОСТ 1.90002–86                                                                | 950...1200                    | —                                                                                              |
|           |                                                                                                                                                                                                                                       | Кольца                                           | ОСТ 1.90099–73                                                                | 950...1100                    |                                                                                                |
|           |                                                                                                                                                                                                                                       | Листы, трубы, профили.<br>Отжиг при 700...800 °C | Листы                                                                         | ГОСТ 22178–76, ОСТ 1.90218–76 | 950...1200                                                                                     |
| BT20      | Прутки, штамповки.<br>Отжиг при 700...800 °C                                                                                                                                                                                          | Плиты                                            | ГОСТ 23755–79, ОСТ 1.90024–94                                                 | 950...1150                    | —                                                                                              |
|           |                                                                                                                                                                                                                                       | Прутки                                           | ТУ 1-805-135–83 и 1-809-988–92,<br>ОСТ 1.90107–73, 1.90173–75 и<br>1.90266–78 | 900...1150                    |                                                                                                |
|           |                                                                                                                                                                                                                                       | Прутки<br>лопаточные                             | ОСТ 1.90006–86                                                                | 950...1150                    | 850...1000                                                                                     |
|           |                                                                                                                                                                                                                                       | Штамповки                                        | ОСТ 1.90000–70                                                                | 900...1150                    |                                                                                                |
|           |                                                                                                                                                                                                                                       | Лопатки                                          | ОСТ 1.90002–86                                                                | 950...1150                    |                                                                                                |
|           |                                                                                                                                                                                                                                       | Кольца                                           | ОСТ 1.90099–73                                                                | 950                           |                                                                                                |
|           |                                                                                                                                                                                                                                       | BT22                                             | Листы, трубы, профили.<br>Отжиг при 740...760 °C                              | Прутки                        | ТУ 1-805-135–83 и 1-809-988–92,<br>ОСТ 1.90107–73, 1.90173–75<br>и 1.90266–86, ТУ 1-805-286–91 |
| Штамповки | ОСТ 1.90000–70                                                                                                                                                                                                                        |                                                  |                                                                               | 1100                          | —                                                                                              |
| Диски     | ОСТ 1.90197–89, ТУ 1-92-116–87                                                                                                                                                                                                        |                                                  |                                                                               | 1200...1350                   |                                                                                                |
| Лопатки   | ОСТ 1.90002–86, ТУ 1-92-116–87                                                                                                                                                                                                        | 1100                                             |                                                                               |                               |                                                                                                |
| BT22      | Прутки, штамповки.<br>Нагрев до 820...850 °C,<br>выдержка 1...3 ч, охлаж-<br>дение с печью до<br>740...760 °C, выдержка<br>1...3 ч, охлаждение на<br>воздухе. Нагрев до<br>500...650 °C, выдержка<br>2...6 ч охлаждение на<br>воздухе |                                                  | Плиты                                                                         | ГОСТ 23755–79, ОСТ 1.90024–94 | —                                                                                              |
|           |                                                                                                                                                                                                                                       | Профили                                          |                                                                               |                               |                                                                                                |

Продолжение табл. 1.12

| Марка материала | Термообработка                                                                                                                                                             | Вид полуфабриката | ГОСТ, ОСТ, ТУ                                                           | Механические свойства     |                      |
|-----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|-------------------------------------------------------------------------|---------------------------|----------------------|
|                 |                                                                                                                                                                            |                   |                                                                         | $\sigma_{\text{в}}$ , МПа | $\sigma_{0,2}$ , МПа |
| ВТЗ-1           | Прутки и штамповки. Изотермический отжиг: нагрев до 900...950 °С, выдержка 1 ч, перенос в другую печь с температурой 550...680 °С, выдерж- жка 2 ч, охлаждение на воздухе. | Прутки            | ТУ 1-805-135-83 и 1-809-988-92, ОСТ 1.90107-73, 1.90173-75 и 1.90266-78 | 950...1200                | 930...1150           |
|                 |                                                                                                                                                                            | Прутки лопаточные | ОСТ 1.90006-86                                                          | 1000...1200               | —                    |
|                 |                                                                                                                                                                            | Штамповки         | ОСТ 1.90000-70                                                          | 950...1200                |                      |
|                 |                                                                                                                                                                            | Диски             | ОСТ 1.90197-89                                                          | 960...1180                |                      |
|                 |                                                                                                                                                                            | Лопатки           | ОСТ 1.90002-86                                                          | 1000...1250               |                      |
|                 |                                                                                                                                                                            | Кольца            | ОСТ 1.90000-73                                                          | 1000...1200               |                      |
| ВТ8             | Прутки, штамповки. Двойной отжиг: нагрев до 900...950 °С, выдержка 1 ч, охлаждение на воз- духе. Старение при 550...600 °С, выдержка 2...5 ч, охлаждение на воздухе        | Плиты             | —                                                                       | —                         |                      |
|                 |                                                                                                                                                                            | Прутки            | ТУ 1-805-135-83 и 1-809-988-92, ОСТ 1.90107-73, 1.90173-75 и 1.90266-86 | 950...1200                | 950                  |
|                 |                                                                                                                                                                            | Прутки лопаточные | ОСТ 1.90006-86                                                          | 1000...1200               | —                    |
|                 |                                                                                                                                                                            | Штамповки         | ОСТ 1.90000-70                                                          | 950...1250                |                      |
|                 |                                                                                                                                                                            | Диски             | ОСТ 1.90197-89                                                          | 960...1180                |                      |
|                 |                                                                                                                                                                            | Лопатки           | ОСТ 1.90002-86                                                          | 1000...1300               |                      |

Продолжение табл. 1.12

|      |                                                                                                                                                                 |                   |                                                                         |             |            |
|------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|-------------------------------------------------------------------------|-------------|------------|
| BT8  | Прутки, штамповки.<br>Двойной отжиг: нагрев до 950...980 °С, выдержка 1 ч охлаждение на воздухе. Старение при 590 °С, выдержка 1...2 ч, охлаждение на воздухе   | Кольца            | ОСТ 1.90099–73                                                          | 950...1250  | –          |
|      |                                                                                                                                                                 | Плиты             | –                                                                       |             |            |
| BT9  | Прутки, штамповки.<br>Двойной отжиг: нагрев до 950...980 °С, выдержка 1 ч, охлаждение на воздухе. Старение при 530 °С, выдержка 2...12 ч, охлаждение на воздухе | Прутки            | ТУ 1-805-135–83 и 1-809-988–92, ОСТ 1.90107–73, 1.90173–75 и 1.90266–78 | 950...1250  | 950...1150 |
|      |                                                                                                                                                                 | Прутки лопаточные | ОСТ 1.90006–86                                                          | 1050...1250 |            |
|      |                                                                                                                                                                 | Штамповки         | ОСТ 1.90000–70                                                          | 950...1250  |            |
|      |                                                                                                                                                                 | Диски             | ОСТ 1.90197–89                                                          | 1030...1250 |            |
|      |                                                                                                                                                                 | Лопатки           | ОСТ 1.90002–86                                                          | 1050...1300 | –          |
|      |                                                                                                                                                                 | Кольца            | ОСТ 1.90099–73                                                          | 1000...1250 |            |
|      |                                                                                                                                                                 | Плиты             | –                                                                       |             |            |
| BT25 | Прутки, штамповки.<br>Двойной отжиг: нагрев до 950...980 °С выдержка 1 ч, охлаждение на воздухе. Старение при 530 °С, выдержка 6 ч, охлаждение на воздухе       | Трубы             | –                                                                       |             |            |
|      |                                                                                                                                                                 | Прутки            | ТУ 1-805-135–83                                                         | 1050...1250 | 950...1150 |
|      |                                                                                                                                                                 | Прутки лопаточные | ТУ 1-92-51–77                                                           | 1000...1250 |            |
|      |                                                                                                                                                                 | Штамповки         | СТУ                                                                     | 1000...1200 | –          |
|      |                                                                                                                                                                 | Диски             | ОСТ 1.90197–89                                                          | 1100...1300 |            |
|      |                                                                                                                                                                 | Лопатки           | –                                                                       |             |            |

Продолжение табл. 1.12

| Марка материала | Термообработка                                | Вид полуфабриката | ГОСТ, ОСТ, ТУ                                                          | Механические свойства |                                                                        |                              |                           |
|-----------------|-----------------------------------------------|-------------------|------------------------------------------------------------------------|-----------------------|------------------------------------------------------------------------|------------------------------|---------------------------|
|                 |                                               |                   |                                                                        | δ, %                  | ψ, %                                                                   | КСУ, (кгс·м)/см <sup>2</sup> | НВ, d <sub>отп</sub> , мм |
|                 |                                               |                   |                                                                        |                       |                                                                        |                              |                           |
| ВТ5             | Прутки, штамповки.<br>Отжиг при 800...850 °С  | Прутки            | ТУ 1-805-135—83, 1-809-988—92, ОСТ 1.90107—73, 1.90173—75 и 1.90266—78 | 6...10                | 16...25                                                                | 3...5                        | 3,4...4,0                 |
|                 |                                               | Штамповки         | ОСТ 1.90000—70                                                         | 5...10                | 15...25                                                                | 3,0...4,5                    |                           |
|                 |                                               | Кольца            | ОСТ 1.90099—73                                                         | 10                    | 25                                                                     |                              |                           |
| ВТ5-1           | Листы, трубы, профили. Отжиг при 700...750 °С | Листы             | ГОСТ 22178—76, ОСТ 190218—76                                           | 8...15                | —                                                                      | 3                            | 3,4...4,0                 |
|                 |                                               | Плиты             | ГОСТ 23755—79, ОСТ 1.90024—94                                          | 16                    |                                                                        |                              |                           |
|                 |                                               |                   | Прутки, штамповки.<br>Отжиг при 800...850 °С                           | Прутки                | ТУ 1-805-135—83, 1-809-988—92, ОСТ 1.90107—73, 1.90173—75 и 1.90266—78 | 6...10                       | 16...25                   |
| Штамповки       | ОСТ 1.90000—70                                |                   |                                                                        |                       |                                                                        |                              |                           |
| ОТ4-0           | Листы, трубы, профили. Отжиг при 590...640 °С |                   |                                                                        | Листы                 | ГОСТ 22178—76, ОСТ 190218—76                                           | 20...30                      | —                         |
|                 |                                               | Плиты             | ГОСТ 23755—79, ОСТ 1.90024—94                                          | 11; 12                | 24                                                                     | —                            |                           |

Продолжение табл. 1.12

|       |                                                       |                      |                                                                                     |         |         |           |           |
|-------|-------------------------------------------------------|----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------|---------|-----------|-----------|
| ОТ4-0 | Прутки, штамповки.<br>Отжиг при<br>690...740 °С       | Прутки               | ТУ 1-805-135-83,<br>1-809-988-92,<br>ОСТ 1.90107-73,<br>1.90173-75 и<br>1.90266-78  | 17...20 | 30...45 | 5...7     | 4,2...4,8 |
|       |                                                       | Штамповки            | ОСТ 1.90000-70                                                                      |         |         | —         |           |
| ОТ4-1 | Листы, трубы, про-<br>фили. Отжиг при<br>640...690 °С | Листы                | ГОСТ 22178-76,<br>ОСТ 190218-76                                                     | 13...25 | —       |           |           |
|       |                                                       | Плиты                | ГОСТ 23755-79,<br>ОСТ 1.90024-94                                                    | 9...10  | 21      | —         |           |
|       | Прутки, штамповки.<br>Отжиг при<br>740...790 °С       | Прутки               | ТУ 1-805-135-83<br>и 1-809-988-92,<br>ОСТ 1-90107-73,<br>1.90173-75 и<br>1.90266-78 | 10...15 | 23...35 | 4,0...4,5 | 3,8...4,3 |
|       |                                                       | Прутки<br>лонаточные | ОСТ 1.90006-86                                                                      | 15      | 35      | 4,5       | —         |
|       |                                                       | Штамповки            | ОСТ 1.90000-70                                                                      | 10...15 | 23...35 | 4,0...4,5 | 3,8...4,3 |
| ОТ4   | Прутки, штамповки.<br>Отжиг при<br>740...790 °С       | Лопатки              | ОСТ 1.90002-86                                                                      | 15      | 35      | 4,5       |           |
|       |                                                       | Кольца               | ОСТ 1.90099-73                                                                      | 12...15 | 28...35 | 4,0...4,5 | 3,8...4,3 |
|       | Листы, трубы, про-<br>фили. Отжиг при<br>660...710 °С | Листы                | ГОСТ 22178-76,<br>ОСТ 190218-76                                                     | 12...20 | —       |           |           |

Продолжение табл. 1.12

| Марка материала | Термообработка                                 | Вид полуфабриката             | ГОСТ, ОСТ, ТУ                                                           | Механические свойства |         |                              |                           |
|-----------------|------------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-----------------------|---------|------------------------------|---------------------------|
|                 |                                                |                               |                                                                         | δ, %                  | ψ, %    | КСУ, (кгс·м)/см <sup>2</sup> | НВ, d <sub>отп</sub> , мм |
|                 |                                                |                               |                                                                         | не менее              |         |                              |                           |
| ОТ4             | Листы, трубы, про-фили. Отжиг при 660...710 °С | Плиты                         | ГОСТ 23755–79, ОСТ 1.90024–94                                           | 7; 8                  | 20      | —                            |                           |
|                 |                                                | Прутки                        | ТУ 1-805-135–83 и 1-809-988–92, ОСТ 1.90107–73, 1.90173–75 и 1.90266–78 | 8,5...12,0            | 20...30 | 3,5...4,0                    | 3,6...4,2                 |
|                 | Прутки лопаточные                              | ОСТ 1.90006–86                | 12                                                                      | 32                    | 4       |                              |                           |
|                 | Штамповки                                      | ОСТ 1.90000–70                | 8,5...10,0                                                              | 20...30               | 3,5     |                              |                           |
|                 | Лопатки                                        | ОСТ 1.90002–86                | 12                                                                      | 32                    | 4       |                              |                           |
|                 | Кольца                                         | ОСТ 1.90099–73                | 10                                                                      | 29                    | 3       |                              |                           |
|                 | Трубы                                          | —                             |                                                                         | —                     |         |                              |                           |
|                 | Листы                                          | ГОСТ 22178–76, ОСТ 1.90218–76 | —                                                                       |                       |         |                              |                           |
| Плиты           |                                                | ГОСТ 23755–79, ОСТ 1.90024–94 | 6...10                                                                  | 20...30               | —       |                              |                           |
| ВТ6             | Листы, трубы, про-фили. Отжиг при 750...800 С  | Плиты                         | ГОСТ 23755–79, ОСТ 1.90024–94                                           | 6...10                | 20...30 | —                            |                           |



Продолжение табл. 1.12

|      |                                                       |                      |                                                                                     |        |         |           |           |
|------|-------------------------------------------------------|----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------|---------|-----------|-----------|
| ВТ6  | Прутки, штамповки.<br>Отжиг при<br>750...900 °С       | Прутки               | ТУ 1-805-135-83<br>и 1-809-988-92,<br>ОСТ 1.90107-73,<br>1.90173-75 и<br>1.90266-78 | 6...10 | 20...30 | 3,4       | 3,3...3,8 |
|      |                                                       | Прутки<br>лопаточные | ОСТ 1.90006-86                                                                      | 10     | 35      | 3,5       | —         |
|      |                                                       | Штамповки            | ОСТ 1.90000-70                                                                      | 6...10 | 20...30 | 3         | 3,3...3,8 |
|      |                                                       | Диски                | ОСТ 1.90197-89                                                                      | 9...10 | 25...30 | 4         | —         |
|      |                                                       | Лопатки              | ОСТ 1.90002-86                                                                      |        |         | 3,5       | 3,3...3,8 |
|      |                                                       | Кольца               | ОСТ 1.90099-73                                                                      | 8...10 |         | 2,5...3,0 |           |
| ВТ20 | Листы, трубы, про-<br>фили. Отжиг при<br>700...800 °С | Листы                | ГОСТ 22178-76,<br>ОСТ 1.90218-76                                                    | 6...12 | —       |           |           |
|      |                                                       | Плиты                | ГОСТ 23755-79,<br>ОСТ 1.90024-94                                                    | 6      | 15      | 5         | 3,3...3,8 |
|      |                                                       | Прутки               | ТУ 1-805-135-83<br>и 1-809-988-92,<br>ОСТ 1.90107-73,<br>1.90173-75 и<br>1.90266-78 | 7...10 | 20...25 | 3...5     |           |
|      | Прутки, штамповки.<br>Отжиг при<br>700...800 °С       | Прутки<br>лопаточные | ОСТ 1.90006-86                                                                      | 10     | 25      | 4         | —         |
|      |                                                       | Штамповки            | ОСТ 1.90000-70                                                                      | 8...10 | 20...25 | 3; 4      | 3,3...3,8 |
|      |                                                       | Лопатки              | ОСТ 1.90002-86                                                                      | 10     | 25      | 4         |           |
|      |                                                       | Кольца               | ОСТ 1.90099-73                                                                      | 8      | 20      | 3         |           |

Продолжение табл. 1.12

| Марка материала | Термообработка                                                                                                                                                                                                                               | Вид полуфабриката | ГОСТ, ОСТ, ТУ                                                                       | Механические свойства |         |                              |                           |
|-----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|---------|------------------------------|---------------------------|
|                 |                                                                                                                                                                                                                                              |                   |                                                                                     | δ, %                  | ψ, %    | КСУ, (КТС-М)/см <sup>2</sup> | НВ, d <sub>отп</sub> , мм |
|                 |                                                                                                                                                                                                                                              |                   |                                                                                     | не менее              |         |                              |                           |
| ВТ22            | Листы, трубы, про-<br>фили. Отжиг при<br>740...760 °С                                                                                                                                                                                        | Прутки            | ТУ 1-805-135-83<br>и 1-809-988-92,<br>ОСТ 1.90107-73,<br>1.90173-75 и<br>1.90266-86 | 8...10                | 20...35 | 3                            | 3,1...3,6                 |
|                 |                                                                                                                                                                                                                                              |                   | ОСТ 1.90000-70                                                                      | 6...8                 | 18...20 |                              |                           |
|                 | Прутки, штамповки.<br>Нагрев до 820...<br>850 °С, выдержка<br>1...3 ч, охлаждение с<br>печью до 740...<br>760 °С, выдержка<br>1...3 ч, охлаждение<br>на воздухе. Нагрев<br>до 500...650 °С, вы-<br>держка 2...6 ч охлаж-<br>дение на воздухе | Диски             | ОСТ 1.90197-89,<br>ТУ 1-92-116-87                                                   | 6; 7                  | 16...18 | 2,2                          | —                         |
|                 |                                                                                                                                                                                                                                              | Лопатки           | ОСТ 1.90002-86,<br>ТУ 1-92-116-87                                                   | 7                     | 18      | 2,5                          |                           |
|                 |                                                                                                                                                                                                                                              | Плиты             | ГОСТ 23755-79,<br>ОСТ 1.90024-94                                                    | 6...8                 | 20...25 | 2,2...2,5                    |                           |
| ВТ3-1           | Прутки и штампов-<br>ки. Изотермический<br>отжиг: нагрев до<br>900...950 °С, выдер-<br>жка 1 ч, перенос в<br>другую печь с темпе-<br>ратурой 550...680 °С,<br>выдержка 2 ч,<br>охлаждение на воз-<br>духе.                                   | Прутки            | ТУ 1-805-135-83<br>и 1-809-988-92,<br>ОСТ 1.90107-73,<br>1.90173-75 и<br>1.90266-78 | 8...10                | 20...30 | 3                            | 3,2...3,7                 |
|                 |                                                                                                                                                                                                                                              |                   |                                                                                     |                       |         |                              |                           |

Продолжение табл. 1.12

|       |                                                                                                                                                                         |                   |                                                                         |        |         |           |             |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|-------------------------------------------------------------------------|--------|---------|-----------|-------------|
| BT3-1 | Прутки и штамповки. Изотермический отжиг: нагрев до 900...950 °С, выдержка 1 ч, перенос в другую печь с температурой 550...680 °С, выдержка 2 ч, охлаждение на воздухе. | Прутки лопаточные | ОСТ 1.90006–86                                                          | 12     | 32...35 | 3         | 3,2...3,7   |
|       |                                                                                                                                                                         | Штамповки         | ОСТ 1.90000–70                                                          | 8...10 | 20...25 |           | —           |
|       |                                                                                                                                                                         | Диски             | ОСТ 1.90197–89                                                          |        | 25...30 |           | 3,15...3,70 |
|       |                                                                                                                                                                         | Лопатки           | ОСТ 1.90002–86                                                          |        | 20...25 | 2,5...3,0 | 3,2...3,7   |
|       |                                                                                                                                                                         | Кольца            | ОСТ 1.90000–73                                                          |        |         |           |             |
| BT8   | Плиты<br><br>Двойной отжиг: нагрев до 900...950 °С, выдержка 1 ч, охлаждение на воздухе. Старение при 550...600 °С, выдержка 2...5 ч, охлаждение на воздухе             | —                 |                                                                         |        |         |           |             |
|       |                                                                                                                                                                         | Прутки            | ТУ 1-805-135–83 и 1-809-988–92, ОСТ 1.90107–73, 1.90173–75 и 1.90266–86 | 6...9  | 16...30 | 3         | 3,2...3,7   |
|       |                                                                                                                                                                         | Прутки лопаточные | ОСТ 1.90006–86                                                          | 11     | 28      |           | —           |
|       |                                                                                                                                                                         | Штамповки         | ОСТ 1.90000–70                                                          | 6...9  | 16...25 |           | 3,2...3,7   |
|       |                                                                                                                                                                         | Диски             | ОСТ 1.90197–89                                                          | 8...10 | 20...25 | 3,5       | —           |
|       |                                                                                                                                                                         | Лопатки           | ОСТ 1.90002–86                                                          | 7...10 | 22...30 | 2,7...3,0 | 3,2...3,7   |
|       |                                                                                                                                                                         | Кольца            | ОСТ 1.90099–73                                                          | 8; 9   | 20...30 | 2,5...3,0 |             |

Продолжение табл. 1.12

| Марка материала | Термообработка                                                                                                                                                                           | Вид полуфабриката | ГОСТ, ОСТ, ТУ                                                                       | Механические свойства |         |                              |                           |
|-----------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|---------|------------------------------|---------------------------|
|                 |                                                                                                                                                                                          |                   |                                                                                     | δ, %                  | ψ, %    | KCU, (кгс-м)/см <sup>2</sup> | НВ, d <sub>отп</sub> , мм |
|                 |                                                                                                                                                                                          |                   |                                                                                     | не менее              |         |                              |                           |
| ВТ8             | Прутки, штамповки.<br>Двойной отжиг: на-<br>грев до 950...980 °С,<br>выдержка 1 ч охлаж-<br>дение на воздухе.<br>Старение при<br>590 °С, выдержка<br>1...2 ч, охлаждение<br>на воздухе   | Плиты             | —                                                                                   | —                     |         |                              |                           |
|                 |                                                                                                                                                                                          |                   |                                                                                     |                       |         |                              |                           |
| ВТ9             | Прутки, штамповки.<br>Двойной отжиг: на-<br>грев до 950...980 °С,<br>выдержка 1 ч,<br>охлаждение на воз-<br>духе. Старение при<br>530 °С, выдержка<br>2...12 ч, охлаждение<br>на воздухе | Прутки            | ТУ 1-805-135-83<br>и 1-809-988-92,<br>ОСТ 1.90107-73,<br>1.90173-75 и<br>1.90266-78 | 6...9                 | 14...30 | 3                            | 3,2...3,7                 |
|                 |                                                                                                                                                                                          | Прутки лопаточные | ОСТ 1.90006-86                                                                      | 11                    | 28...33 |                              | —                         |
|                 |                                                                                                                                                                                          | Штамповки         | ОСТ 1.90000-70                                                                      | 6...9                 | 14...25 |                              | 3,2...3,7                 |
|                 |                                                                                                                                                                                          | Диски             | ОСТ 1.90197-89                                                                      | 8                     | 20...22 | 2,5...3,0                    | —                         |
|                 |                                                                                                                                                                                          | Лопатки           | ОСТ 1.90002-86                                                                      | 7...10                | 22...30 |                              |                           |
|                 |                                                                                                                                                                                          | Кольца            | ОСТ 1.90099-73                                                                      | 8                     | 20      | 2,5                          | 3,2...3,7                 |
|                 |                                                                                                                                                                                          | Плиты             | —                                                                                   |                       |         |                              |                           |
|                 |                                                                                                                                                                                          | Трубы             |                                                                                     |                       |         |                              |                           |

Окончание табл. 1.12

|      |                                                                                                                                                                                    |                      |                 |        |         |           |           |
|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|-----------------|--------|---------|-----------|-----------|
| BT25 | Прутки, штамповки.<br>Двойной отжиг: на-<br>грев до 950...980 °С<br>выдержка 1 ч,<br>охлаждение на воз-<br>духе. Старение при<br>530 °С, выдержка<br>6 ч, охлаждение на<br>воздухе | Прутки               | ТУ 1-805-135–83 | 8...10 | 16...20 | 3         | 3,1...3,4 |
|      |                                                                                                                                                                                    | Прутки<br>лопаточные | ТУ 1-92-51–77   | 9...10 | 20...25 |           | —         |
|      |                                                                                                                                                                                    | Штамповки            | СТУ             | 8      | 18      |           | 3,1...3,4 |
|      |                                                                                                                                                                                    | Диски                | ОСТ 1.90197–89  | 6...8  | 14...18 | 2,6...3,0 | —         |
|      |                                                                                                                                                                                    | Лопатки              |                 | —      |         |           |           |

### 1.5. СПЛАВЫ НА ОСНОВЕ ТУГОПЛАВКИХ МЕТАЛЛОВ

Детали из сплавов на основе тугоплавких металлов применяют для работы при значительных нагрузках и температурах  $> 1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , при которых сплавы на основе железа, никеля и кобальта разупрочняются. Поэтому высокожаропрочные хромовые, ниобиевые, молибденовые и вольфрамовые сплавы получили широкое распространение для изготовления деталей летательных аппаратов, в радиоэлектронике и других областях промышленности.

При температурах  $> 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$  пластичность тугоплавких металлов и их сплавов изменяется незначительно в отличие от никелевых сплавов, которые "ползут" даже при небольших нагрузках. Высокое сопротивление ползучести сплавов на основе тугоплавких металлов сохраняется вплоть до  $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Общим недостатком тугоплавких металлов и их сплавов является сильная окисляемость (или поглощение азота) при нагревании на воздухе. Для повышения работоспособности деталей, изготовленных из этих материалов, применяют специальные защитные покрытия.

#### 1.5.1. Сплавы на основе кобальта

Сплавы на основе кобальта по жаропрочности несколько выше, чем сплавы на основе никеля. Наиболее распространенным деформируемым сплавом на основе кобальта является сплав ВК36А (ЭИ 416). Его используют для изготовления турбинных лопаток газотурбинных двигателей, работающих при температурах  $\sim 800\text{ }^{\circ}\text{C}$ . После горячей деформации сплав имеет структуру твердого раствора (аустенит) и карбидов. В процессе термообработки сплав подвергается закалке на твердый раствор с последующим старением. Рекомендуемая термообработка: закалка с нагревом до температуры  $1125\text{ }^{\circ}\text{C}$ , выдержка 1 ч, охлаждение в воде, затем старение при температуре  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ , выдержка 20 ч с охлаждением на воздухе. Механические свойства после термической обработки:  $\sigma_{\text{в}} = 1200\text{ МПа}$ ;  $\sigma_{0,2} = 800\text{ МПа}$ ;  $\delta \geq 13\%$ ;  $\psi \geq 10\%$ ;  $a_{\text{к}} = 0,5\text{ кгс}\cdot\text{м}/\text{см}^2$ .

#### 1.5.2. Сплавы на основе хрома

Сплавы на основе хрома обладают высокой жаростойкостью в атмосфере воздуха и применяются для изготовления деталей, длительно работающих в газовых и жидких агрессивных средах при температурах  $1100\ldots 1150\text{ }^{\circ}\text{C}$ , кратковременно до  $1500\ldots 1600\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Наиболее широкое распространение получили деформируемые сплавы на основе хрома марок ВХ-1, ВХ-1Н. Химический состав сплавов приведен в табл. 1.13.

Механические свойства сплава ВХ-1 представлены в табл. 1.14.

**1.13. Химический состав сплавов ВХ-1, ВХ-1Н**

| Марка сплава | Химический состав, % |             |             |               |                |
|--------------|----------------------|-------------|-------------|---------------|----------------|
|              | Cr                   | O           | N           | H             | Прочие примеси |
| ВХ-1         | 99,7                 | 0,02...0,04 | 0,02...0,04 | 0,001...0,003 | 0,25           |
| ВХ-1Н        | 99,2                 | $\leq 0,5$  |             | 0,001...0,03  | $\leq 0,3$     |

**1.14. Механические свойства сплава ВХ-1**

| Марка сплава | Вид полуфабриката | Механические свойства |                      |              |            |                                 |           |
|--------------|-------------------|-----------------------|----------------------|--------------|------------|---------------------------------|-----------|
|              |                   | $\sigma_B$ , МПа      | $\sigma_{0,2}$ , МПа | $\delta$ , % | $\psi$ , % | $a_K$ , (кгс·м)/см <sup>2</sup> | НВ        |
| ВХ-1         | Прутки            | 290                   | 200                  | 4            | 6          | 0,1                             | 100...120 |

**1.5.3. Сплавы на основе ниобия**

Сплавы на основе ниобия при температурах  $> 200$  °С насыщаются газами и окисляются на воздухе. Для повышения работоспособности деталей применяют различные покрытия. Температура плавления сплавов – 2400 °С. Температура рекристаллизации 1225...1260 °С. Сплавы удовлетворительно обрабатываются резанием, свариваются аргонодуговой, контактной и электронно-лучевой сваркой.

Технологические свойства и область применения сплавов на основе ниобия приведены в табл. 1.15.

Механические свойства сплавов при комнатной температуре представлены в табл. 1.16.

Химический состав сплава ВН-2, %: С до 0,1; Сг до 0,1; Мо 3,8...5,2; Nb – основа.

**1.15. Сплавы на основе ниобия**

| Марка сплава | Вид полуфабриката | Обработка давлением                                                                                                                                                                                                                                | Область применения                                                                                                         |
|--------------|-------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ВН-2; ВН-3   | Прутки            | Деформируется в горячем состоянии. Температурный интервал деформирования 1200...1850 °С. Деформация проводится на воздухе в нейтральной среде или вакууме. Нагрев под деформацию осуществляется в вакуумно-защитной среде или в защитных оболочках | Детали, длительно работающие до 1140 °С в вакууме или нейтральной среде, в окислительной среде при наличии ионных покрытий |

**1.16. Механические свойства сплавов на основе ниобия**

| Марка сплава | Вид полуфабриката | Механические свойства |                      |              |            |                                 |           |
|--------------|-------------------|-----------------------|----------------------|--------------|------------|---------------------------------|-----------|
|              |                   | $\sigma_B$ , МПа      | $\sigma_{0,2}$ , МПа | $\delta$ , % | $\psi$ , % | $a_K$ , (кгс·м)/см <sup>2</sup> | НВ        |
| ВН-2         | Прутки            | 750                   | 700                  | 18...28      | 40...47    | 27                              | 180...200 |
| ВН-3         |                   | 750...800             |                      | 16...20      |            | 30                              |           |

1.5.4. Сплавы на основе молибдена

Деформируемые сплавы на молибденовой основе марок ВМ-1 и ВМ-2 в окислительных средах и при температурах > 600 °С нежаростойки. Для повышения работоспособности деталей применяют различные специальные покрытия. Сплавы свариваются электронно-лучевой и аргонодуговой сваркой. Удовлетворительно обрабатываются резанием, кроме операции шлифования.

Химический состав основных деформируемых сплавов на основе молибдена приведен в табл. 1.17.

Основные деформируемые сплавы на основе молибдена, условия деформирования и область их применения представлены в табл. 1.18.

Механические свойства молибденовых сплавов при комнатной температуре см. в табл. 1.19.

1.17. Химический состав деформируемых молибденовых сплавов

| Марка сплава | ТУ на поставку | Химический состав, % |               |         |       |
|--------------|----------------|----------------------|---------------|---------|-------|
|              |                | W                    | C             | Cr      | Ni    |
| ВМ-1         | ТУ ВМ7-153–54  | ≤ 0,6                | ≤ 0,1         | ≤ 0,003 | ≤ 0,4 |
| ВМ-2         |                | ≤ 0,2                | ≤ 0,02        | —       | ≤ 0,2 |
| Марка сплава | ТУ на поставку | Химический состав, % |               |         |       |
|              |                | O                    | Zr            | Mo      |       |
| ВМ-1         | ТУ ВМ7-153–54  | 0,002...0,003        | 0,008...0,250 | Основа  |       |
| ВМ-2         |                | ≤ 0,0035             | 0,25...0,40   |         |       |

1.18. Основные деформируемые сплавы на основе молибдена, технологические особенности и область применения

| Марка сплава | Вид полуфабриката | Обработка давлением                                                                                                           | Область применения                                                                                                                  |
|--------------|-------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ВМ-1, ВМ-2   | Прутки            | Деформируется в горячем состоянии. Температурный интервал штамповки 1450...1200 °С, нагрев под штамповку в атмосфере водорода | Детали, длительно работающие при температурах 1100...1900 °С и кратковременно в продуктах горения топлива с температурой до 3200 °С |

1.19. Механические свойства молибденовых сплавов

| Марка сплава | Вид полуфабриката | Механические свойства |                        |         |         |                                          |           |
|--------------|-------------------|-----------------------|------------------------|---------|---------|------------------------------------------|-----------|
|              |                   | σ <sub>в</sub> , МПа  | σ <sub>0,2</sub> , МПа | δ, %    | ψ, %    | a <sub>к</sub> , (кгс·м)/см <sup>2</sup> | НВ        |
| ВМ-1         | Прутки            | 800                   | 680                    | 10...15 | —       |                                          | 260...290 |
| ВМ-2         |                   | 750...850             | —                      | 10...25 | 30...50 | 0,2                                      | 250...285 |



### 1.5.5. Штамповые стали

Штамповые стали в зависимости от назначения подразделяют на стали, применяемые для изготовления деформирующего инструмента для холодной и горячей обработки материалов давлением.

В табл. 1.20 приведены основные стали, используемые для изготовления штампового инструмента для холодной обработки материалов давлением.

**1.20. Основные штамповые стали, применяемые для изготовления штампов холодной обработки металлов давлением**

| Марка стали        | ГОСТ, ТУ       | Вид полуфабриката | Область применения                                                                                                                                                                              |
|--------------------|----------------|-------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| X6BΦ               | ГОСТ 5950–2000 | Прутки            | Пуансоны и матрицы штампов                                                                                                                                                                      |
| X12                |                |                   | Элементы штампов высокой устойчивости против истирания, не подвергающиеся значительным ударным нагрузкам, волоки, фильеры, пуансоны, матрицы вырубных, просечных штампов и т.п.                 |
| X12Φ1              |                |                   | Пуансоны и матрицы вырубных и просечных штампов, волоки, фильеры и т.п.                                                                                                                         |
| X12MΦ              |                |                   | Пуансоны и матрицы вырубных и просечных штампов, волоки, фильеры, рабочие элементы штампов холодной деформации листовых материалов                                                              |
| X12BMΦ             |                |                   | Элементы штампов высокой устойчивости против истирания, не подвергающиеся значительным ударным нагрузкам, волоки, фильеры, гибочные формовочные пуансоны и матрицы вырубных и просечных штампов |
| 7XГ2BMΦ            |                |                   | Рабочие элементы штампов объемного деформирования и вырубной инструмент сложной формы                                                                                                           |
| 6X6B3MΦC (ЭП 569)  |                | Прутки, полосы    | Рабочие элементы штампов: ножи, пуансоны, матрицы и т.п.                                                                                                                                        |
| 8X4B2MΦC2 (ЭП 761) |                |                   | Матрицы и пуансоны штампов объемного деформирования                                                                                                                                             |
| 11X4B2MΦ3C2        |                |                   | Пуансоны и матрицы холодно-высадочных автоматов пуансоны и матрицы штампов для холодного выдавливания                                                                                           |

К штамповым сталям, из которых изготавливают инструмент для горячей обработки давлением, предъявляют следующие основные требования: разгаростойкость, высокие твердость и прочность при повышенных температурах, высокая ударная вязкость.

В табл. 1.21 приведены основные штамповые стали, применяемые для изготовления рабочих элементов штампов для горячей обработки давлением различных материалов.

### 1.21. Основные штамповые стали, применяемые для изготовления штампов горячей обработки материалов давлением

| Марка стали      | ГОСТ, ТУ         | Вид полуфабриката | Область применения                                                                                                                                                                                                                                |
|------------------|------------------|-------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 7ХЗ              | ГОСТ 5950—2000   | Прутки            | Пуансоны и матрицы для горячей высадки крепежа из углеродистых и низколегированных сталей на горизонтально-ковочных машинах, матрицы и пуансоны для горячего прессования выдавливанием указанных материалов на кривошипных прессах                |
| 5ХНМ             |                  |                   | Молотовые штампы паровоздушных и пневматических молотов, прессовые штампы и штампы скоростной штамповки материалов в горячем состоянии, блоки матриц для вставок горизонтально-ковочных машин                                                     |
| 5ХНМ2            | ТУ 108.11.917—87 |                   | Особо ответственные ковочные штампы для горячей штамповки. Детали прессового инструмента (контейнеры) с повышенными требованиями к прочности, работающие при температурах до 450 °С                                                               |
| 4ХМФС (40ХСМФ)   | ГОСТ 5950—2000   |                   | Молотовые штампы паровоздушных и пневматических молотов для деформирования легированных, конструкционных и коррозионно-стойких сталей, прессовый инструмент для обработки алюминиевых сплавов                                                     |
| 4Х5В2ФС (ЭИ 958) |                  | Прутки, полосы    | Молотовые и прессовые вставки (толщиной или диаметром до 250 мм), для горячего деформирования конструкционных сталей, инструмент для высадки заготовок из легированных конструкционных и жаропрочных материалов на горизонтально-ковочных машинах |

*Продолжение табл. 1.21*

| Марка стали        | ГОСТ, ТУ                                       | Вид полуфабриката | Область применения                                                                                                                                                                                                             |
|--------------------|------------------------------------------------|-------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 4Х4ВМФС<br>(ДИ 22) | ГОСТ 5950–2000                                 | Прутки,<br>полосы | Инструмент высокоскоростной штамповки, высадки на горизонтально-ковочных машинах, вставки штампов для горячего деформирования легированных конструкционных сталей и жаропрочных сплавов                                        |
| 27Х2Н2МВФ          | ТУ 108-11-835–85                               | Поковки           | Особо ответственные детали прессового инструмента с повышенной прочностью (втулки контейнеров, пресс-штемпеля, иглы), работающие при температурах до 500 °С                                                                    |
| 4Х5МФС             | ГОСТ 5950–2000                                 | Прутки,<br>полосы | Для мелких молотовых штампов, крупных (толщиной или диаметром до 200 мм) молотовых и прессовых вставок для горячего деформирования конструкционных сталей и цветных сплавов в условиях крупносерийного и массового производств |
| 3Х2В8Ф             | Нормативная документация заводов-изготовителей | Сортовой прокат   | Тяжелонагруженный прессовый инструмент (мелкие вставки штампового ручья, матрицы, пуансоны для выдавливания) для горячего деформирования конструкционных сталей и жаропрочных сплавов                                          |
| 3Х2МНФ             | ГОСТ 5950–2000                                 | Прутки,<br>полосы | Прессовый инструмент, матрицы, контейнеры, работающие при температурах до 500 °С                                                                                                                                               |
| 3Х2Н2МВФ           | ОСТ 24.959.01–69                               | Поковки           | Особо ответственные детали прессового инструмента с высокими механическими свойствами (втулки контейнеров, пресс-штемпеля, иглы и другие детали), работающие при температурах до 500 °С                                        |
| 27Х2Н2М1Ф          | ТУ 24-1-12-180–75                              |                   | Ответственные детали прессового инструмента с повышенной прочностью (втулки контейнеров, кольца, пресс-штемпеля, иглы), работающие при температурах до 500 °С                                                                  |

*Окончание табл. 1.21*

| Марка стали         | ГОСТ, ТУ       | Вид полуфабриката | Область применения                                                                                                                                                                                                                             |
|---------------------|----------------|-------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 5Х3В3МФС<br>(ДИ 23) | ГОСТ 5950–2000 | Прутки,<br>полосы | Тяжелонагруженный прессовый инструмент (типа прошивных и формующих пуансонов), инструмент для высадки, вставки штампов напряженной конструкции, прессовый инструмент сложной формы                                                             |
| 5Х2МНФ<br>(ДИ 32)   |                |                   | Крупногабаритные цельные штампы (со стороной квадрат или диаметром до 600 мм) для штамповки поковок из конструкционных сталей и жаропрочных сплавов на молотах и кривошипных прессах, инструмент для высадки на горизонтально-ковочных штампах |
| 3Х3М3Ф              |                |                   | Инструмент горячего деформирования на кривошипных прессах и горизонтально-ковочных машинах (как правило, для малогабаритного инструмента)                                                                                                      |
| 4Х3ВМФ              |                |                   | Малогабаритные молотовые штампы, молотовые и прессовые вставки (толщиной или диаметром до 400 мм), инструмент для горизонтально-ковочных машин                                                                                                 |
| 4Х5МФ1С<br>(ЭП 572) |                |                   | Молотовые и прессовые вставки (толщиной или диаметром до 250 мм) для горячего деформирования конструкционных сталей, инструмент для горизонтально-ковочных машин                                                                               |

# СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ СЛИТКОВ И ЗАГОТОВОК

## 2.1. МЕТОДЫ ВЫПЛАВКИ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ

### 2.1.1. Получение слитков в вакуумной индукционной печи

Плавка в вакуумной индукционной печи позволяет получать металл высоких чистоты и качества с низким содержанием газов. В оборудование для вакуумно-индукционного переплава входят индукционная печь, помещенная в вакуумную камеру, источник питания и насосная система. Вакуумная камера снабжена смотровыми окнами и приспособлениями, управляемыми снаружи и позволяющими вводить легирующие добавки, брать пробы для химического анализа, включать разливочный штор и опрокидывать печь для разливки металла.

Процесс плавки в вакуумной индукционной печи начинают с загрузки печи исходной шихтой, герметизации вакуумной камеры и выполнения вакуумирования. Затем следуют индукционный нагрев и расплавление шихты. Непрерывному перемешиванию металла способствует пониженное давление, которое создается путем вакуумирования камеры. Процесс вакуумно-индукционной плавки заканчивают заливкой металла в изложницу, находящуюся также в вакуумной камере.

### 2.1.2. Получение слитков в вакуумно-дуговой печи с расходуемым электродом

Слитки, получаемые при переплаве в вакуумно-дуговой печи с расходуемым электродом, отличаются высоким качеством, чистотой и однородностью металла, а также низкой газонасыщенностью. Основные принципы дуговой плавки с расходуемым электродом были сформулированы в 1892 г. изобретателем дуговой сварки Н.Г. Славяновым. Промышленное применение этого вида плавки относится к 1953–1954 гг.

При получении слитков методом вакуумно-дугового переплава в вакуумно-дуговой печи с расходуемым электродом последний должен расплавляться. Водоохлаждаемая медная изложница 3 помещается в вакуумную камеру 1 (рис. 2.1). Эта камера вакуумируется между расходуемым электродом 5 и затравкой (небольшой металлической шайбой), находя-

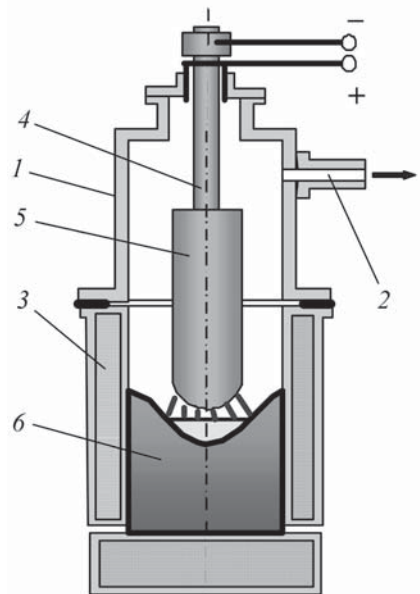


**Рис. 2.1. Схема вакуумно-дуговой печи с расходуемым электродом:**  
 1 – рабочая камера вакуумной печи;  
 2 – патрубок для подключения вакуумных насосов; 3 – охлаждаемая изложница (кристаллизатор); 4 – подвижный шток; 5 – расходуемый электрод; 6 – слиток

щейся на дне медной изложницы 3. При подаче электроэнергии возникает электрическая дуга, которая расплавляет сплав. По мере расходования (расплавления) электрода 5 осуществляется его автоматическое перемещение для того, чтобы поддерживать устойчивое горение электрической дуги. В медной охлаждаемой изложнице 3 расплавленный металл очень быстро затвердевает с минимальными ликвацией и взаимодействием с материалом изложницы 3.

### 2.1.3. Получение слитков электронно-лучевым переплавом

В электронно-лучевых печах можно переплавлять практически любые сплавы (исключение составляют сплавы с повышенным содержанием марганца вследствие его склонности к испарению в условиях высокого вакуума). Металл, полученный методом электронно-лучевого переплава, обладает минимальной газопроницаемостью, максимальной плотностью и наилучшим комплексом механических свойств по сравнению с металлом, полученным другими способами.

При электронно-лучевом переплаве используют принципиально новый для металлургии способ нагрева расплавляемого металла. Подводимая электрическая энергия превращается в тепловую непосредственно в расплавляемом металле в результате соударения с ним электронов, разгоняемых в электрическом поле высокого напряжения. Устройство, в котором разгоняются электроны, называется *электронной пушкой*. Часть потока электронов направляется в расходующийся электрод,

оплавляет его (металл попадает в кристаллизатор), другая их часть поступает в ванну жидкого металла и поддерживает ее в расплавленном состоянии.

В плавильных установках используют одну или несколько электронных пушек. Прохождение пучка электронов возможно только при высоком вакууме ( $\sim 0,013 \dots 0,13$  Па). Плавнение металла электронным пучком было осуществлено в 1879 г. англичанином Уильямом Круксом. Применение электронно-лучевого переплава в промышленности относится к 1958–1963 гг.

Схематично электронно-лучевую печь можно представить как вакуумную камеру, к которой подсоединены электронная пушка, устройство для ввода переплавляемого электрода, кристаллизатор и вакуумная система (рис. 2.2).

Особенностью использования электронно-лучевых плавильных печей является возможность существенного перегрева поверхности жидкого металла, причем длительность выдержки при заданной температуре устанавливается произвольно.

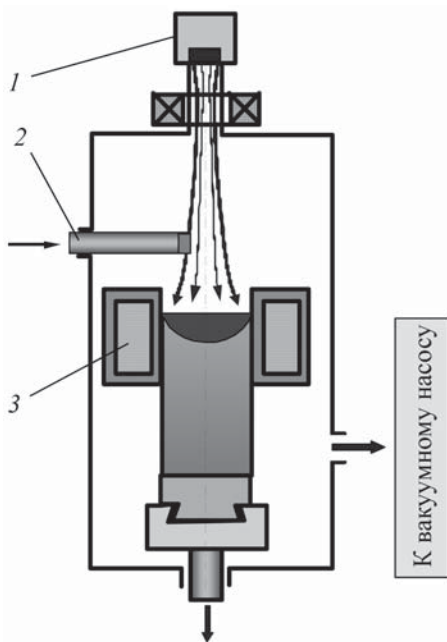


Рис. 2.2. Схема электронно-лучевой печи:

- 1 — электронная пушка;
- 2 — переплавляемый электрод;
- 3 — кристаллизатор

### 2.1.4. Получение слитков плазменно-дуговым переплавом

Сущность способа плазменно-дугового переплава (ПДП) заключается в переплаве расходимых заготовок определенного химического состава в металлическом водоохлаждаемом кристаллизаторе. Источником теплоты в данном способе служит низкотемпературная плазма, получаемая в специальных устройствах — плазматронах, которые позволяют нагреть практически любой газ до 10 000 °С и выше. В металлургии чаще всего применяют дуговые плазматроны, где газ нагревается, проходя через зону горения электрической дуги постоянного тока. В результате нагрева газ расширяется и с большой скоростью устремляется к нагреваемому металлу.

Конструкция печей плазменно-дугового переплава незначительно отличается от печей вакуумно-дуговых и электронно-лучевых. Приоритет в разработке процесса плазменно-дугового переплава принадлежит специалистам института сварки имени Е.О. Патона Академии наук Украины. Первый слиток по этому способу был получен в 1963 г.

На рис. 2.3 показана схема плазменно-дуговой печи. Процесс можно осуществлять как при нормальном давлении, так и при повышенном, а также в вакууме. Металл, выплавленный плазменно-дуговым способом, обладает более высокой плотностью и большей пластичностью, чем металл открытой плавки.

### 2.1.5. Получение слитков методом электрошлакового переплава

Сущность способа электрошлакового переплава заключается в следующем: переплавляемый металл в виде расходимого электрода подключается к источнику питания и погружается в ванну жидкого электропроводящего рафинированного шлака, который наводят в водоохлаждаемой металлической изложнице (кристаллизаторе) расплавлением твердой шлаковой смеси или заливкой жидкого шлака, приготовленного в специальном плавильном агрегате (рис. 2.4).

Переменный (или постоянный) электрический ток проходит от электрода к шлаку и под действием тепловой энергии расплавляет последний с поддержанием его в жидком состоянии при температуре 1600...2000 °С. Часть теплоты, выделяющейся в шлаковой ванне, передается расходимому электроду, торец которого начинает плавиться. Капли жидкого металла проходят через слой шлака и опускаются на дно шлаковой ванны, где образуют металлическую ванну. Металлическая ванна, затвердевая снизу,

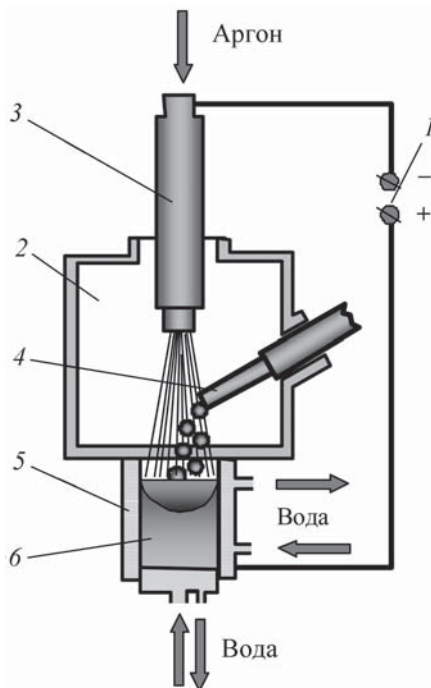


Рис. 2.3. Схема плазменно-дуговой печи:

- 1 — источник питания; 2 — рабочая камера; 3 — плазматрон;
- 4 — переплавляемая заготовка;
- 5 — водоохлаждаемый кристаллизатор;
- 6 — слиток

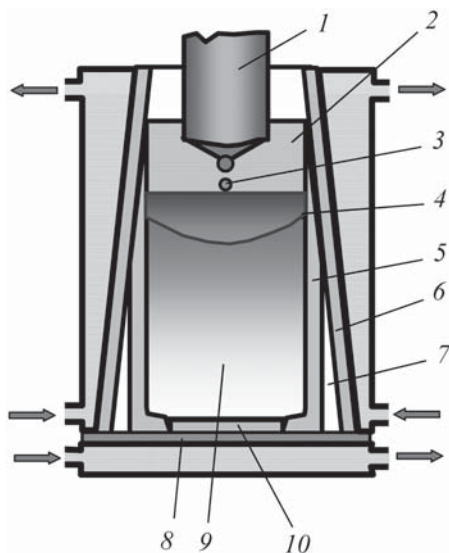


**Рис. 2.4. Схема процесса электрошлакового переплава:**

- 1 — расходный электрод;  
 2 — шлаковая ванна; 3 — капли электродного металла;  
 4 — металлическая ванна; 5 — шлаковая корочка (гарнисаж); 6 — стенка водоохлаждаемого кристаллизатора;  
 7 — зазор; 8 — поддон; 9 — слиток;  
 10 — затравка

образует слиток. По мере оплавления расходный электрод подается в шлаковую ванну, непрерывно пополняя объем кристаллизующейся металлической ванны.

Рафинирующей средой при электрошлаковом переплаве служит шлаковая ванна. При этом имеются три границы взаимодействия жидкого металла со шлаком: пленка металла на торце электрода — шлак; металлическая капля — шлак; поверхность жидкой ванны в кристаллизаторе — шлак. Шлак защищает жидкий металл от воздействия атмосферного воздуха.

Кроме того, в процессе переплава на боковой поверхности слитка образуется шлаковая корочка (гарнисаж) толщиной 1...3 мм, что обеспечивает естественную тепловую и электрическую изоляцию слитка от кристаллизатора и высокую чистоту его поверхности.

Разработчиком электрошлакового переплава является Институт сварки им. Е.О. Патона Академии наук Украины. Впервые этот метод был освоен в 1958 г. на заводе "Днепроспецсталь". Этим способом выплавляются стали и сплавы, цветные металлы и их сплавы.

## 2.2. ПОРОШКОВАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

### 2.2.1. Основные сведения о порошковой металлургии

Методами порошковой металлургии можно получить сплавы из металлов, не растворяющихся друг в друге при расплавлении, а также сплавы из тугоплавких металлов и металлов особо высокой чистоты. Порошковой металлургией изготавливают как заготовки, так и разнообразные детали точных размеров. Порошковая металлургия дает возможность получить пористые материалы и детали из них, а также детали, состоящие из двух (биметаллические) или нескольких слоев различных металлов и сплавов.

Методы порошковой металлургии хорошо зарекомендовали себя в получении материалов и деталей, обладающих высокими жаро- и износостойкостью, твердостью с заданными стабильными магнитными свойствами, особыми физико-химическими свойствами, механическими и технологическими свойствами, которые нельзя получить методами литья или обработкой давлением.

Укрупненно процесс производства деталей и изделий из порошковых материалов заключается в приготовлении металлического порошка, составлении шихты, прессовании и спекании заготовок.



### 2.2.2. Основные методы получения порошков

Металлические порошки получают механическими и физико-химическими методами. При механических методах для этого измельчают твердые или распыляют жидкие металлы без изменения их химического состава. Для измельчения твердых хрупких материалов применяют шаровые, вихревые и вибрационные мельницы. Измельчение исходного материала проводят ударным и истирающим действиями шаров (стальных, чугунных, керамических, фарфоровых). Следует учитывать, что при получении металлических порошков механическими методами возможно их загрязнение.

Шаровая мельница состоит из стального барабана, в который загружаются размалывающие шары и обрабатываемый материал. Частицы порошка, полученные в шаровых мельницах, имеют вид направленных многогранников размерами 100...1000 мкм. Размол в вихревых мельницах более интенсивен, чем в шаровых. В камере вихревой мельницы имеются два пропеллера, которые, вращаясь в противоположные стороны, создают пересекающиеся воздушные потоки. Материал (рубленая проволока, стружка, обрезки и другие мелкие куски), загруженный в камеру, захватывается воздушными потоками и благодаря взаимному соударению дробится на частицы размером 50...200 мкм. Полученные частицы имеют тарельчатую форму и зарубленные края.

Для получения тонких порошков из хрупких карбидов металлов и оксидов применяют вибрационные мельницы. Последние более производительны, чем вихревые и шаровые. Их работа основана на высокочастотном воздействии на измельчаемый материал стальных шаров и цилиндров при совершении барабаном мельницы круговых колебаний высокой частоты.

Порошки из жидкого металла получают в результате использования кинетической энергии воздуха, воды, пара или инертных газов, распыляющей струи расплава. Получаемые частицы порошка имеют размеры 50...350 мкм и форму, близкую к сферической.

При получении порошков физико-химическими методами изменяются химический состав и свойства исходного материала. Основными физико-химическими методами являются химическое восстановление металлов из оксидов, электролиз расплавленных солей, карбонильный метод и метод гидрогенизации.

*Химическое восстановление металлов* из оксидов осуществляется газообразными или твердыми восстановителями. В качестве газообразных восстановителей широко используют природный, доменный и углекислый газы, а также водород. Получаемую при химическом восстановлении металлическую губку размалывают. Среди физико-химических методов получения порошков этот метод наиболее дешевый.

Порошки чистых и редких металлов (тантала, циркония и др.) в виде дендритов величиной 1...100 мкм получают *электролизом расплавленных солей* металлов. Электролиз позволяет получать чистые порошки из загрязненного сырья.

*Карбонильный метод* служит для получения порошков магнитного железа, никеля и кобальта в виде сфероидов величиной 1...800 мкм. Получаемый этим методом продукт при температуре 20...30 °С распадается на порошок металла и оксид углерода.

В основе *метода гидрогенизации* лежит восстановление хрома гидратом кальция. Получаемая при этом известь вымывается водой, а порошок металла состоит из дендритов величиной 8... 20 мкм.

Порошки, полученные физико-химическими методами, наиболее тонкодисперсны и чисты. В зависимости от размера частиц их классифицируют по гранулометрическому составу на: ультратонкие (до 0,5 мкм), очень тонкие (0,5...10 мкм), тонкие (10...40 мкм), средней тонкости (40...150 мкм) и крупные (150...500 мкм). Характеристиками основных технологических свойств порошков являются насыпная масса, текучесть, прессуемость и спекаемость.

*Насыпная масса* – масса 1 см<sup>3</sup> свободно насыпанного порошка в граммах. Если порошок имеет постоянную насыпную массу, то при спекании он будет характеризоваться постоянной усадкой. Один и тот же порошок будет иметь различную насыпную массу в зависимости от способа получения. Для изготовления высокопористых изделий следует использовать порошки с малой насыпной массой, а для деталей приборов и машин – с большой.

*Текучесть* – способность порошка заполнять форму. Она характеризуется скоростью прохождения порошка через отверстие определенного диаметра. С уменьшением диаметра порошка его текучесть ухудшается. Текучесть в большей степени влияет на равномерность заполнения формы порошком и на скорость уплотнения при прессовании.

*Прессуемость* – способность порошка уплотняться под действием внешней нагрузки. Она характеризуется прочностью сцепления частиц порошка после прессования. На прессуемость влияют пластичность материала, размер и форма частиц порошка. С введением в состав порошков поверхностно-активных веществ прессуемость их повышается.

Под *спекаемостью* понимают прочность сцепления частиц, возникающую в результате термической обработки прессованных заготовок.

### **2.2.3. Приготовление шихты, формование заготовок и изделий**

Шихта в порошковой металлургии готовится следующим образом. Дозированные порции порошков определенных химического и гранулометрического состава и технологических свойств смешивают в барабанах, мельницах и других устройствах. При необходимости особо равномерного перемешивания шихты в нее добавляют спирт, бензин, глицерин и дистиллированную воду. Иногда в процессе смешивания вводят технологические присадки различного назначения: пластификаторы, облегчающие прессование (парафин, стеарин, глицерин и др.), легкоплавкие присадки и летучие вещества, позволяющие получать изделие с заданной пористостью.

Следующим этапом в получении порошковых полуфабрикатов является прессование.

Прессование порошков проводят в холодном или горячем состоянии прокаткой и другими способами. При холодном прессовании в матрицу пресс-формы засыпают шихту и рабочим пуансоном проводят прессование. После снятия давления изделие выпрессовывают из матрицы выталкивающим пуансоном. В процессе прессования частицы порошка подвергаются упругой и пластической деформации, при этом резко увеличивается контакт между частицами и уменьшается пористость, что дает возможность получить заготовку нужной формы и достаточной прочности.

Прессование выполняют на гидравлических или механических (эксцентриковых, кривошипных) прессах. Давление прессования составляет 200...1000 МПа в зависимости от состава порошка и назначения изделия.

При горячем прессовании в пресс-форме изделие не только формируется, но и подвергается спеканию, что позволяет получить беспористый материал с высокими физико-механическими свойствами. Горячее прессование можно осуществлять в вакууме, а также в защитной или восстановительной атмосфере в широком интервале температур (1200...1800 °С) и при более низких давлениях, чем холодное. Наложение давления обычно проводится после нагрева порошков до требуемой температуры. Этим методом получают изделия из труднодеформируемых материалов (боридов, карбидов и др.).

Прокатка металлических порошков является непрерывным процессом получения изделий в виде лент, проволоки, полос путем деформирования в холодном или горячем состоянии. Прокатку осуществляют в вертикальном, наклонном и горизонтальном направлениях. Наилучшие условия формования обеспечиваются при вертикальной прокатке.

Процесс осуществляется следующим образом: порошок из бункера поступает в зазор между вращающимися валками и обжимается в заготовку, которая направляется в проходную печь для спекания, а затем прокатывается в чистовых валках. Для обеспечения нормальных условий формования необходимо, чтобы линейная скорость поверхности вращающихся валков была меньше скорости перемещения металлического порошка из бункера в зазор между валками.

Прокаткой получают ленты толщиной 0,025...3 мм и шириной до 300 мм, проволоку диаметром  $\geq 0,25$  мм. Непрерывность процесса обеспечивает высокую производительность и возможность автоматизации. После холодного прессования для придания изделиям необходимых прочности и твердости их подвергают спеканию.

Операция спекания заключается в нагреве изделия до температуры, равной 0,6...0,8 от температуры плавления основного компонента, и выдержке при данной температуре. Спекание выполняют в электропечах, индукторах или непосредственным пропусканием тока через спекаемое изделие. Для предотвращения окисления металлических порошков спекание осуществляют в вакууме, аргоне, гелии или среде водорода. Во избежание коробления тонкие и плоские изделия спекают под давлением. После спекания изделия подвергают отделочным операциям, калибровке, обработке резанием, электрохимической обработке, повторному прессованию и т.п.

## Глава 3

# КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О ФИЗИЧЕСКОЙ СУЩНОСТИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

### 3.1. СТРОЕНИЕ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

#### 3.1.1. Общие вопросы

В расплавленном состоянии атомы металлов и сплавов находятся в непрерывном хаотическом движении. При затвердевании жидкого металла атомы продолжают пребывать в непрерывном движении, но под действием межатомных сил их движение приобретает колебательный характер относительно центров устойчивого равновесия, которые располагаются в строго определенном геометрическом порядке относительно друг друга. Такое строение называется *кристаллическим*.

При комнатной температуре и атмосферном давлении любой металл, за исключением ртути, — это твердое кристаллическое тело. (Ртуть кристаллизуется при  $-39\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Однако при охлаждении с огромными скоростями — порядка 1 млн град/с — можно подавить процесс кристаллизации и сохранить при комнатной температуре взаимное расположение атомов, характерное для жидкого металла. В этом случае получится аморфный металл или металлическое стекло, т.е. твердое, но не кристаллическое тело.)

Кристаллическое строение схематично изображают кристаллической решеткой, которая представляет собой вполне определенное для каждого металла расположение точек — центров устойчивого равновесия (рис. 3.1). Положение этих центров относительно друг друга соответствует положению атомов при минимуме потенциальной энергии. Наименьший многогранник, в вершинах которого размещаются атомы и с помощью которого путем его копирования и последующего перемещения можно построить пространственную сетку кристаллической решетки, называют э л е м е н т а р н о й я ч е й к о й кристаллической решетки.

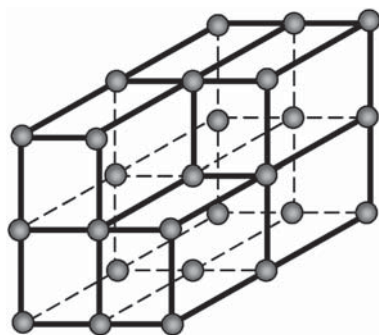


Рис. 3.1. Схема строения  
металлического кристалла

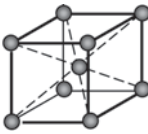
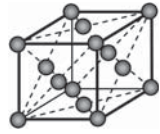
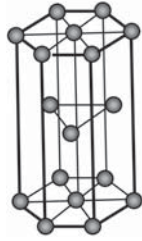
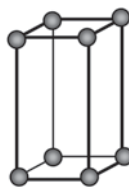
Элементарные кристаллические решетки некоторых материалов приведены в табл. 3.1.

Как видно из табл. 3.1, взаимное расположение атомов и расстояние между ними различно в разных направлениях. Так как свойства веществ (физические, химические и механические) зависят от взаимодействия атомов, взаимное расположение которых неодинаково, то и свойства кристаллов по разным направлениям различно. Различие свойств по разным направлениям называется а н и з о т р о п и е й.

#### 3.1.2. О моно- и поликристаллах

При определенных температурно-скоростных режимах охлаждения (например, при условиях

## 3.1. Элементарные кристаллические решетки некоторых металлов

| Тип решетки                          |                                                                                    | Металлы, имеющие данный тип элементарной кристаллической решетки                                                                          |
|--------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Наименование                         | Схема элементарной кристаллической решетки                                         |                                                                                                                                           |
| Кубическая<br>объемно-центрированная |   | Ванадий, вольфрам, $\alpha$ -железо (при температуре $< 910\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), литий, марганец, молибден, тантал, хром и др.     |
| Кубическая<br>гранецентрированная    |   | Алюминий, $\gamma$ -железо (при температуре $910\text{...}1401\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), золото, медь, никель, платина, свинец, серебро |
| Гексагональная<br>плотноупакованная  |   | Бериллий, кадмий, магний, кобальт, титан, цинк                                                                                            |
| Тетрагональная                       |  | Олово                                                                                                                                     |

метода направленной кристаллизации) жидкий металл переходит в твердое кристаллическое состояние правильной формы — монокристалл. Его строение будет соответствовать набору одной из приведенных выше типов кристаллических решеток. Подобный монокристалл, имеющий неправильную форму, называют кристаллитом (зерном). (Следует различать кристаллиты и кристаллы. У последних в отличие от кристаллитов плоские грани, пересекающиеся под определенными углами.) Для изучения свойств и особенностей деформации монокристаллов их получают достаточно больших размеров. В настоящее время монокристаллы некоторых металлов (германий, кремний и др.) выпускают в промышленном масштабе.

При этом установлено, что монокристаллы различных металлов имеют различные характеристики упругости, сопротивления сдвигу и другие свойства не только в зависимости от рода металла, но и по разным характерным направлениям, мысленно проведенным в исследуемом монокристалле.

Для наглядности представления изменения (анизотропии), например, упругих свойств (модулей упругости) монокристаллов строят пространственные модели (рис. 3.2, *а*), откладывая значения модуля на лучах, проведенных из центра модели.

При испытании монокристаллов обнаружена также значительная анизотропия свойств прочности (рис. 3.2, *в*) и пластичности (рис. 3.2, *г*). Кроме того, установлена анизотропия скорости растворения, магнитных свойств. В металлах с гексагональной решеткой выявлена анизотропия электро- и теплопроводности, теплового расширения. При обработке металлов давлением особенно большое значение имеет анизотропия упругих, прочностных и пластических свойств.

В обычных условиях затвердевание жидкого металла начинается одновременно во всех центрах кристаллизации. Поэтому после затвердевания структура металла состоит из множества отдельных прочно соединенных между собой кристаллитов, беспорядочно ориентированных в объеме. Такой металл называют **поликристаллическим**, или **поликристаллом**.

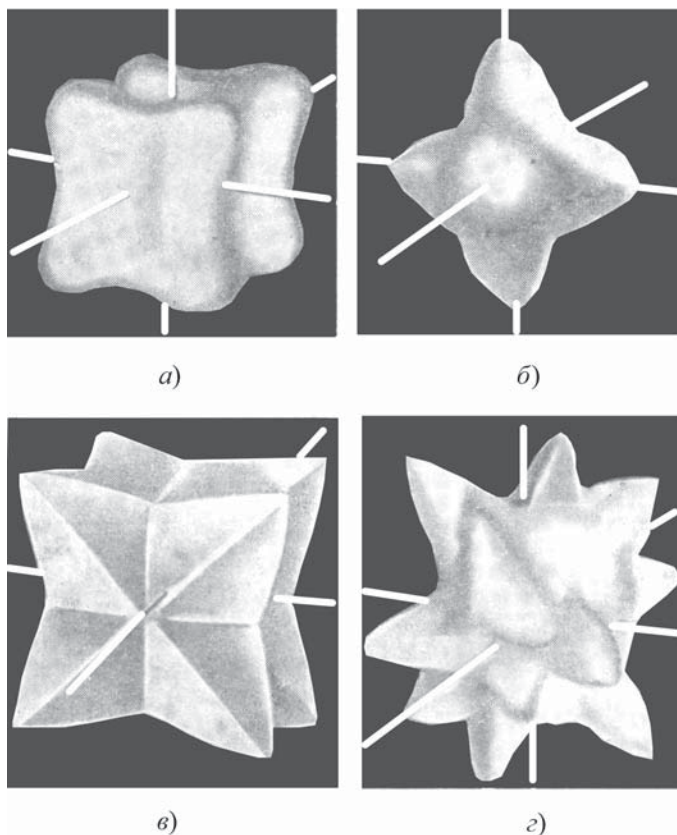


**Рис. 3.2. Объемные модели:**

*а* — модулей упругости железа; *б* — модулей сдвига железа; *в*, *г* — предела прочности и остаточных удлинений соответственно алюминия (по Е. Шмидту)

Свойства поликристалла, состоящего из множества малых, различным образом ориентированных зерен, усредняются и не обнаруживают при испытаниях свойств анизотропии, тело становится как бы изотропным, т.е. квазиизотропным телом.

Большинство металлов и сплавов, применяемых в машиностроении, содержат неметаллические включения в виде оксидов, карбидов, сульфидов и т.д. А так как температура плавления неметаллических включений ниже, чем основного металла, то первоначально кристаллизуется основной металл, образуя зерна поликристаллитного строения. Размеры зерен обычно составляют 0,01...0,1 мм, но иногда, при медленном охлаждении, они могут достигать нескольких миллиметров.

Неметаллические вещества в процессе кристаллизации основного металла как бы выжимаются на границы зерен и располагаются между ними в виде тонкой сетки или отдельных включений разнообразных формы и размеров.

Сплавы так же, как и чистые металлы, являются кристаллическими телами. Тип кристаллической решетки сплава соответствует решетке металла — растворителя, тогда как атомы другого металла (растворимого) располагаются между атомами основного. Сплавы с такой структурой являются твердыми растворами. Компоненты сплава могут образовывать химические соединения со своей особой кристаллической решеткой, концентрация различных компонентов в подобном сплаве постоянна. При определенных концентрациях компонентов возможно образование механической смеси из различных кристаллов (твердых растворов, кристаллов металлов, химических соединений).

Часто сплавы представляют собой металлические соединения, состоящие из кристаллитов (зерен) всех типов, прочно соединенных друг с другом. При этом свойства металлов и сплавов в значительной степени зависят от их кристаллического строения, величины и формы зерен и неметаллических включений.

## 3.2. ФИЗИЧЕСКАЯ ПРИРОДА ДЕФОРМАЦИИ МЕТАЛЛОВ

### 3.2.1. Общие сведения

Кристаллические решетки металлов, образовавшиеся при его затвердевании, обладают способностью в отличие от газов и жидкостей сохранять полученную при затвердевании форму и противостоять достаточно большим внешним силовым воздействиям. Эти свойства кристаллических решеток металлов обеспечиваются силами межатомного взаимодействия. Природа этих сил и законы, их определяющие, достаточно сложны и исследуются методами квантовой механики.

На рис. 3.3 приведена качественная зависимость равнодействующей всех сил, влияющих на два соседних атома, от расстояния между ними. Как видно, сила взаимодействия  $f$  равна нулю в точке, определяющей равновесное расстояние между атомами  $a_0$ . При этом около точки  $a_0$  зависимость силы взаимодействия от расстояния между атомами близка к линейной. Это позволяет создать довольно приближенную, но зато наглядную модель строения кристалла (рис. 3.4).

Кристалл можно представить в виде пружинок, к концам которых прикреплены атомы, образующие узлы решетки. Пружинки можно считать ненагруженными ( $f=0$ ), но если появится внешняя сила, требующая изменения размера тела, они сразу же начнут работать, стремясь сохранить целостность ансамбля атомов. Всякая попытка деформировать или разрушить металл наталкивается на противодействие этих "пружин".



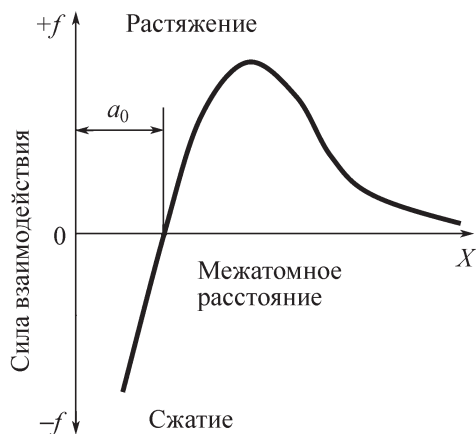


Рис. 3.3. Зависимость равнодействующей сил, наблюдающихся между двумя атомами, от расстояния между ними

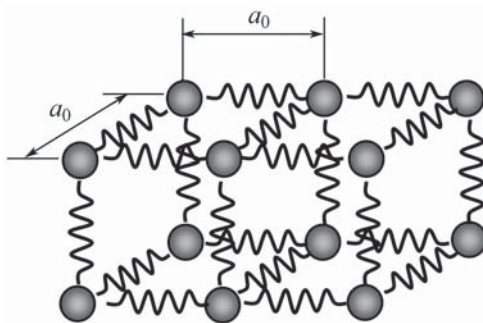


Рис. 3.4. Идеализированная модель кристалла с межатомными связями в виде пружинки

Если попытаться удалить атомы друг от друга, возникнет сила взаимного притяжения ( $+f$ ), которая будет стремиться вернуть атомы на исходные позиции, находящиеся на расстоянии  $a_0$  друг от друга. Попытка сблизить атомы приводит к появлению силы обратного знака ( $-f$ ), стремящейся снова восстановить начальное состояние. Этими особенностями межатомного взаимодействия и обусловлены, во-первых, само свойство упругости металлов, а во-вторых, — закон упругой деформации, известный как закон Гука.

Ранее были рассмотрены основные типы элементарных кристаллических решеток металлов. Взаимное расположение атомов в этих решетках можно представить как упаковку бильярдных шаров (рис. 3.5). Предельная плотность упаковки достигается, когда каждый шар окружен в пространстве 12 такими же шарами.

Этому случаю соответствуют гранецентрированные кубические и гексагональные плотноупакованные решетки. В данных решетках коэффициент заполнения объема атомами равен 0,74 и только 26 % от объема приходится на долю пор между атомами.

Третий распространенный тип решетки металлов — объемно-центрированная кубическая. Коэффициент заполнения объема у металлов с такой решеткой несколько меньше, но это не означает, что больше размеры пустот между атомами. Наоборот, несложные геометрические вычисления показывают, что размеры пор в этой решетке меньше, чем в решетках с предельно плотной упаковкой, просто самих этих пор больше.

Если в кристалле с плотноупакованной решеткой выделить плоскость, в которой атомы наиболее тесно уложены, то получится картина, изображенная на рис. 3.6. При наложении на кристалл внешних сил в нем возникнут касательные напряжения  $\tau$ , которые стремятся сдвинуть один атомный слой относительно соседнего.

Такой способ пластической деформации называется *скольжением* — одни слои кристалла сдвигаются, скользят по другим. Воображаемые плоскости, разделя-



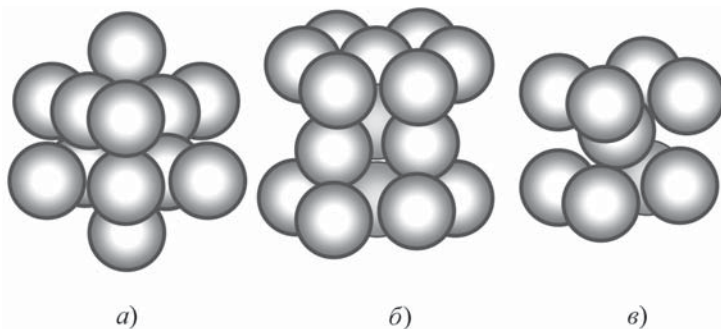


**Рис. 3.5. Упаковка атомов в элементарных кристаллических решетках:**  
*а* — гранецентрированная кубическая; *б* — гексагональная плотноупакованная;  
*в* — кубическая объемно-центрированная

ющие эти слои, именуют *плоскостями скольжения*. Обычно в скольжении участвуют плоскости с наиболее плотной упаковкой атомов, так как расстояния между этими плоскостями в кристаллах максимальны и поэтому их легче сдвигать одну относительно другой.

Расстояние от плоскости, в которой атомы тесно прилегают друг к другу, до следующей такой же плоскости близко к диаметру атома. Если же выбрать другую плоскость, где атомы расположены реже (пара таких плоскостей 4–4 показана на рис. 3.6 пунктиром), то расстояние от нее до следующей такой же будет заметно меньше. Взаимное смещение (скольжение) таких плоскостей требует больших усилий, вызывает большие нарушения правильного атомного строения кристалла в зоне сдвига, чем скольжение вдоль плоскостей плотной упаковки.

Касательные напряжения возникают под действием внешних сил как при растяжении, так и при сжатии. Вызванные ими сдвиги обеспечивают удлинение (рис. 3.7) или сжатие (рис. 3.8) деформируемого тела. Это напоминает сдвиг в стопке монет или колоде карт. Например, при растяжении мы не можем удлинить колоду карт, потянув сразу все карты в продольном направлении, но длина колоды увеличится, если мы будем сдвигать вдоль нее карты одну по другой.

Чтобы при пластической деформации не нарушалась сплошность металла, слои, разделенные плоскостями сдвига, постепенно разворачиваются в направлении

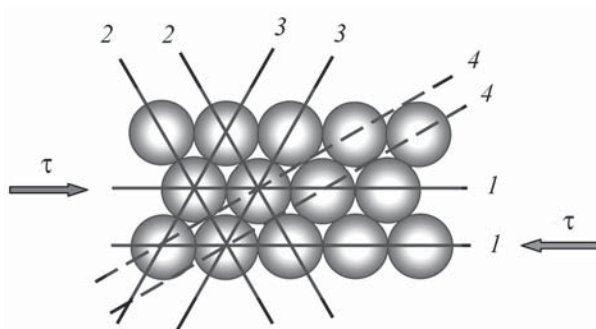


**Рис. 3.6. Плоскости скольжения (1–1...1–4) в кристалле с наиболее плотной упаковкой атомов:**  
 $\tau$  — касательные напряжения

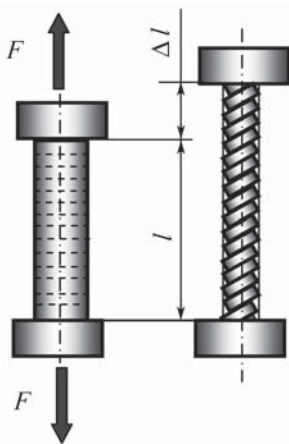


Рис. 3.7. Схема деформации монокристалла при растяжении путем сдвига по плоскостям скольжения

действия нагрузки. Эти сдвиги необратимы — они и вызывают остаточную деформацию. Особенно отчетливо такой характер пластической деформации виден при исследовании металлических образцов — монокристаллов (рис. 3.9).

В кристалле может быть несколько равноправных плотноупакованных пар плоскостей (пары 1–1, 2–2, 3–3 на рис. 3.6). При пластической деформации кристалл окажется перед выбором. Вопрос будет решен в пользу той плоскости скольжения, в которой будет действовать наибольшее касательное напряжение. При данном направлении действия внешней силы первой "заработает" та группа параллельных плотноупакованных плоскостей, которые составляют с осью растяжения угол, как можно более близкий к  $45^\circ$ , поскольку именно на площадках, расположенных под этим углом к оси растяжения, касательные напряжения максимальны.

Несколько сложнее обстоит дело при деформировании обычных поликристаллических металлов, состоящих из множества зерен — монокристаллов, случайным образом ориентированных друг к другу. В поликристаллах деформация каждого зерна должна быть согласована с деформацией всех его непосредственных соседей, иначе на границах зерен будут появляться разрывы, трещины, пустоты. Однако этого не происходит вследствие высокой симметрии кристаллических решеток металлов, имеющих несколько возможных плоскостей скольжения в каждом зерне (рис. 3.10).

Процесс скольжения в поликристаллах требует больших напряжений, чем в монокристаллах, но принципиально картина скольжения не меняется. Происходит сдвиг одних слоев металла в пределах каждого зерна относительно соседних по плоскостям скольжения. Внешняя растягивающая сила диктует необходимость разворота этих слоев в направлении приложения силы, который сопровождает их скольжение друг по другу. В результате каждое зерно вытягивается в осевом направлении и сжимается в двух других.

Так из совместной деформации отдельных зерен складывается общая деформация всего поликристаллического тела. С повышением температуры, увеличивающей амплитуду колебания атомов, в процесс скольжения могут быть вовлечены допол-

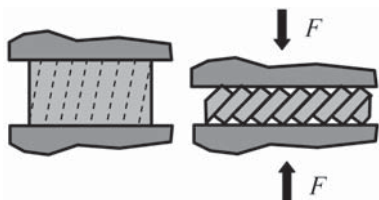


Рис. 3.8. Схема деформации монокристалла при сжатии

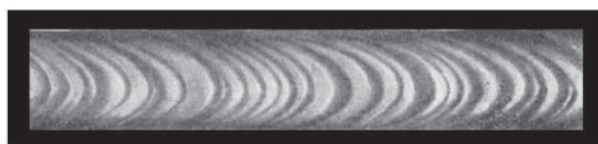


Рис. 3.9. Кристалл цинка, растянутый при  $300^\circ\text{C}$  (по Е. Шмидту)

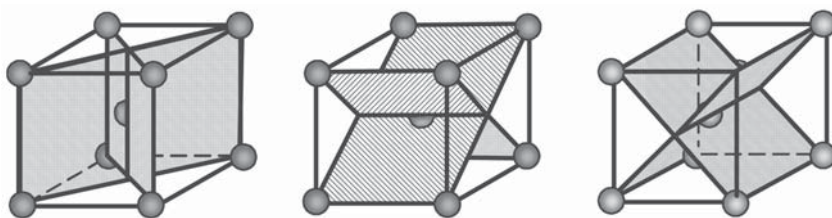


Рис. 3.10. Плоскости скольжения в ячейке кубической объемно-центрированной решетки

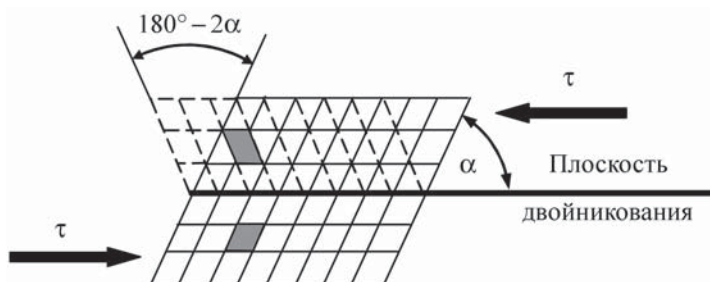


Рис. 3.11. Схема двойникования

нительные плоскости кристаллической решетки, снижая требуемые для деформирования тела нагрузки.

Кроме механизма скольжения пластическая деформация монокристалла и зерен поликристаллов может осуществляться так называемым **двойникованием** — одновременным смещением нескольких слоев атомов, ограниченных параллельными плоскостями, под действием касательных напряжений, т.е. перемещение части кристалла как одного целого в положение, зеркально симметричное с неподвижной частью кристалла (рис. 3.11). Плоскость симметрии, относительно которой осуществлен поворот, называется **плоскостью двойникования**, а переместившаяся часть кристалла — **двойником**. Этот двойник показан на рис. 3.11 пунктирными линиями. Плоскости двойникования часто совпадают с плоскостями скольжения.

### 3.2.2. Дислокации

Теоретические расчеты показывают, что силы взаимодействия между атомами столь велики, что для одновременного сдвига одной части идеального кристалла относительно другой требуются касательные напряжения, в сотни и тысячи раз превышающие напряжения, которые необходимы для этого на практике. Связано это с тем, что в реальных кристаллах имеются зоны ослабленных связей между атомами. Поэтому скольжение происходит не одновременно по всей плоскости скольжения, а последовательно, путем перемещения отдельных групп атомов относительно других. При этом требуются значительно меньшие по величине касательные напряжения.

Ослабление связей между атомами обусловлено наличием несовершенств в строении реальных кристаллов. К этим несовершенствам относятся: наличие примесей,

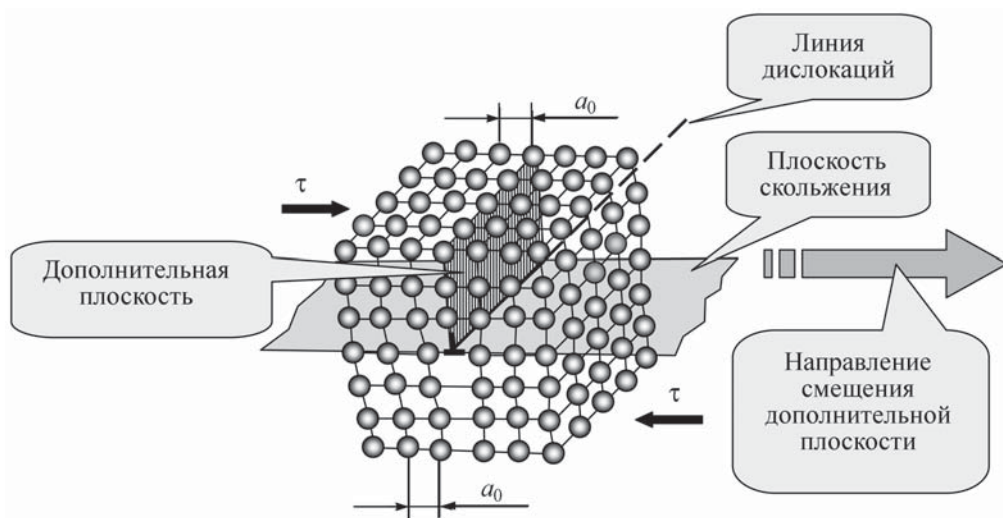


**Рис. 3.12. Краевая дислокация:**  
 $\perp$  — условное обозначение краевой дислокации

отсутствие или избыток в узлах решетки дополнительных атомов и др. Особым видом несовершенств являются д и с л о к а ц и и — краевые (линейные) и винтовые (спиральные).

Краевая дислокация (рис. 3.12) представляет собой несовершенство кристаллической решетки, при котором число атомных плоскостей выше или ниже плоскости скольжения неодинаково. Под действием касательных напряжений  $\tau$  краевая дислокация передвигается. При этом линию дислокаций можно представить в виде "натянутой струны". Смещение дислокаций состоит в последовательном и параллельном перемещениях исходной д о п о л н и т е л ь н о й плоскости от одной соседней плоскости к другой в направлении к краю кристалла. В результате одна часть кристалла сдвигается относительно другой на одно межатомное расстояние.

Начальную стадию этого процесса можно представить так, как показано на рис. 3.13, а. На левой грани кристалла под действием касательного напряжения  $\tau$  уже образовалась ступенька, но сдвиг еще не охватил всю площадь плоскости скольжения. Границей зоны сдвига является краевая дислокация, которая пока находится вблизи левой грани.

Из рис. 3.13, б видно, что перемещение дислокации на одно межатомное расстояние в решетке требует лишь небольшой перегруппировки атомов вблизи дислокационной линии. Здесь жирными кружками показаны положения атомов, соответствующие рис. 3.13, а. В дальнейшем дислокация постепенно перемещается все дальше и дальше вправо и в конце концов выходит на правую грань кристалла, образуя на ней ступеньку.

Как видно, конечный результат получился таким же, как при одновременном сдвиге всей атомной плоскости. Но для достижения этого результата требуются не-

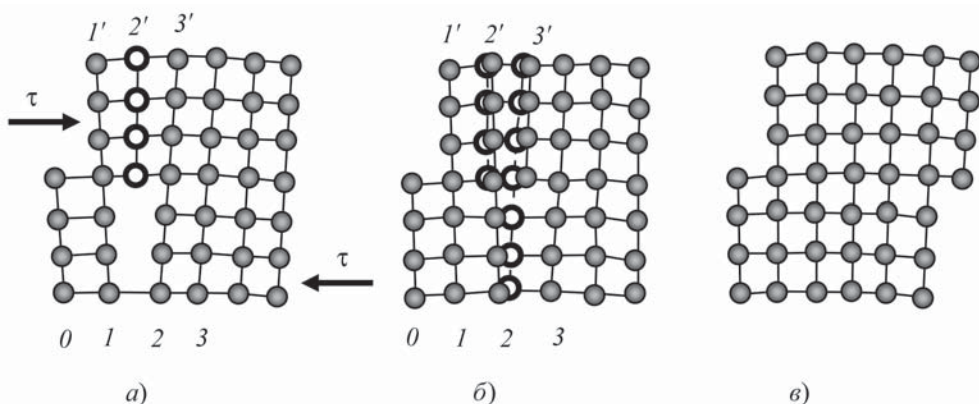


Рис. 3.13. Схема перемещения дислокации в плоскости скольжения

измеримо меньшие напряжения. При переходе от позиции на рис. 3.13, *а* к позиции на рис. 3.13, *б* нарушается только одна связь ( $2-3'$ ) и формируется новая полная атомная плоскость ( $2-2'$ ). Полуплоскость  $3'$  теперь становится лишней, и дислокация сдвигается вправо на одно межатомное расстояние. Таким образом, верхняя плоскость перекачивается по нижней не так, как в модели жесткого сдвига (см. рис. 3.6), а так, как это делала бы гусеница, преодолевая препятствие.

В момент перехода дислокации из одного положения равновесия (когда она находится точно посередине между двумя соседними полными, правильными вертикальными плоскостями) в следующее такое же лишь один атом перекачивается через горку (см. рис. 3.6). Все атомы, участвующие в движении дислокации, как видно, смещаются на расстояния порядка межатомного. Такая же ситуация создается во всех атомных плоскостях, параллельных плоскости рис. 3.13, поэтому, когда мы говорим "один атом", имеется в виду вся цепочка, перпендикулярная к чертежу, — край полуплоскости.

Длина дислокации, т.е. ее размер в направлении, перпендикулярном к чертежу, может быть равна или соизмерима с размером кристалла в этом направлении. В плоскости чертежа все возмущения — отклонения атомов от нормальных позиций, которые они занимали до прихода сюда дислокации, практически полностью гасятся при удалении от оси дислокации на несколько межатомных расстояний. Поэтому дислокации являются линейными дефектами решетки: их размер в одном направлении велик, а в двух других мал.

Сущность винтовой дислокации состоит в том, что кристаллографические плоскости, перпендикулярные к плоскости скольжения (рис. 3.14), имеют изгиб со сдвигом на одно межатомное расстояние. Движение винтовой дислокации дает пластический сдвиг в направлении, перпендикулярном к направлению движения дислокации, и приводит к смещению одной части кристалла относительно другой на одно межатомное расстояние. Особенностью винтовой дислокации является то, что направление пластического сдвига параллельно плоскости скольжения, тог-



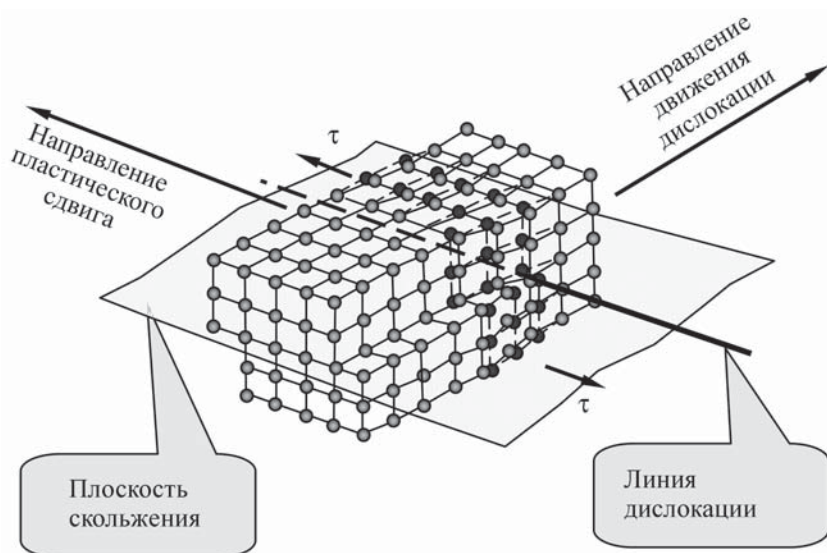


Рис. 3.14. Винтовая дислокация

да как при краевой дислокации сдвиг происходит в направлении, к ней перпендикулярном.

### 3.3. ИЗМЕНЕНИЕ СВОЙСТВ МЕТАЛЛОВ В РЕЗУЛЬТАТЕ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Пластическая деформация заготовки, сопровождающаяся изменением ее формы и размеров, связана с изменением формы каждого отдельного зерна. При обработке давлением зерна вытягиваются (деформация удлинения), а поперечный размер их уменьшается (деформация укорочения). При этом металл приобретает волокнистое строение. Такое направленное расположение зерен называется *текстурой* (слоистостью) *деформации* (рис. 3.15).

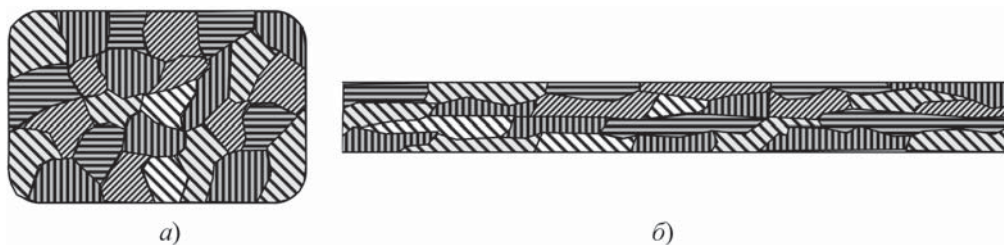


Рис. 3.15. Характерные текстуры металлов и сплавов:  
а — до деформации; б — после пластической деформации

Образующиеся волокна с вытянутыми вдоль них межзеренными прослойками определяют различные свойства деформированного металла или сплава вдоль и поперек волокон. При этом металл, практически изотропный до деформации, после нее становится анизотропным, т.е. обладающим различными свойствами в различных направлениях относительно волокон. Вдоль волокон прочность, особенно пластичность и ударная вязкость, выше, чем поперек волокон. Текстура даже после отжига и рекристаллизации частично остается в металле, и наведенная анизотропия сказывается на дальнейшей обработке давлением, например влияет на процесс образования фестонов при вытяжке листовых заготовок.

Пластическая деформация существенно изменяет механические свойства поликристаллического тела.

### 3.4. ХОЛОДНАЯ И ГОРЯЧАЯ ПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ

При пластическом деформировании металла в холодном состоянии происходит явление упрочнения (наклепа), т.е. прочностные характеристики металла (например, предел прочности  $\sigma_B$ ) растут, а характеристики пластичности (например, относительное удлинение  $\delta$ ) падают (рис. 3.16). Упрочнение есть следствие накопления внутренней энергии в металле за счет искажения пространственной атомной решетки, а также возрастание сопротивлению перемещения дислокаций из-за увеличения их количества в процессе пластической деформации, затруднении их перемещения.

Упрочнение ограничивает возможную степень пластической деформации без разрушения, но повышает резерв прочности, что позволяет создавать более легкие и более прочные конструкции.

При малых степенях деформации в процессе формоизменения металла участвует лишь часть зерен, наиболее благоприятно ориентированных к направлению действия внешней силы (под углом  $45^\circ$  к направлению действия силы). Остальные зерна деформируются упруго. После снятия внешней нагрузки упругодеформированные зерна стремятся вернуться в исходное состояние, чему мешают зерна, деформированные пластически. Вследствие этого появляются внутренние напряжения, называемые остаточными. Внутренние остаточные напряжения иногда достигают существенных значений (100...150 МПа) и служат причиной растрескивания полых штампованных деталей. Металлы, в которых действуют остаточные напряжения, более подвержены коррозии.

Если холоднодеформированный металл нагревать, то в нем начинают происходить процессы разупрочнения. Основные разупрочняющие процессы – это возврат и рекристаллизация.

Возвратом, или отпуском, называется процесс частичного разупрочнения и, соответственно, частичного восстановления свойств, которые металл имел до деформации. Для чистых металлов возврат проявляется при

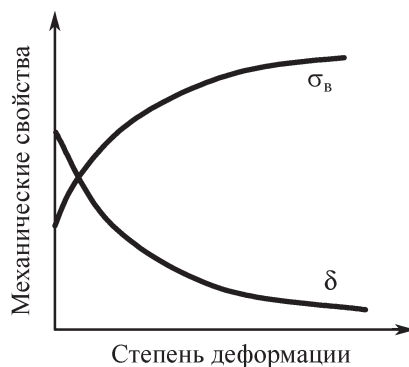


Рис. 3.16. Кривые упрочнения

абсолютной (по шкале Кельвина) температуре, равной 0,25...0,30 от температуры плавления металла. Растворимые примеси в металле повышают температуру возврата. Деформирование при температуре возврата сопровождается упрочнением, хотя интенсивность его несколько меньше, чем при холодной пластической деформации. Возврат не влияет на размеры и форму зерен, которые металл получил в результате пластической деформации или при проведении пластической деформации при температурах возврата (текстура деформации при возврате сохраняется).

**Рекристаллизация.** Если нагреть деформированный металл до температуры выше температуры возврата или проводить его деформацию при температуре выше этой температуры, то в металле происходит явление, называемое рекристаллизацией.

Сущность рекристаллизации заключается в том, что благодаря воздействию температуры повышается кинетическая энергия атомов (они становятся более подвижными). Деформированные зерна неустойчивы, и при определенной температуре подвижность атомов становится достаточной для того, чтобы образовывались новые центры кристаллизации и росли новые недеформированные зерна.

Центрами образования новых зерен могут являться мельчайшие обломки зерен, располагающихся на границах и плоскостях скольжения (сдвига).

Атомы, из которых состоят деформированные зерна, пристраиваются к решетке (нового центра) мельчайшего обломка, образуя новое недеформированное зерно.

Минимальная температура, при которой может происходить полная рекристаллизация, называется *температурой рекристаллизации*.

В табл. 3.2 приведены значения температур рекристаллизации для некоторых металлов.

Ориентировочно считают, что температура рекристаллизации  $T_p \approx 0,4T_{пл}$ , где  $T_p$  и  $T_{пл}$  — абсолютные температуры соответственно рекристаллизации и плавления. Явление рекристаллизации позволяет уточнить понятия "горячая" и "холодная" деформация ("горячая" и "холодная" штамповка).

Принято деформацию, проводимую при температуре ниже температуры рекристаллизации, называть *холодной деформацией*, а деформацию, проводимую при температуре выше температуры рекристаллизации, — *горячей деформацией*.

Таким образом (см. табл. 3.2), деформация свинца при комнатной температуре является горячей деформацией, а деформация вольфрама при температуре 1000 °С — холодной.

Связь между величиной зерна после деформации с рекристаллизацией, температурой и степенью деформации принято представлять объемными диаграммами рекристаллизации (рис. 3.17). Эти диаграммы строят для каждого металла и сплава по результатам специальных экспериментов. Но вид диаграмм носит общий характер и

### 3.2. Температура рекристаллизации

| Параметр                         | Металл |        |     |     |      |
|----------------------------------|--------|--------|-----|-----|------|
|                                  | Pb, Zn | Al, Mg | Fe  | Ni  | W    |
| Температура рекристаллизации, °С | 0      | 150    | 450 | 620 | 1210 |



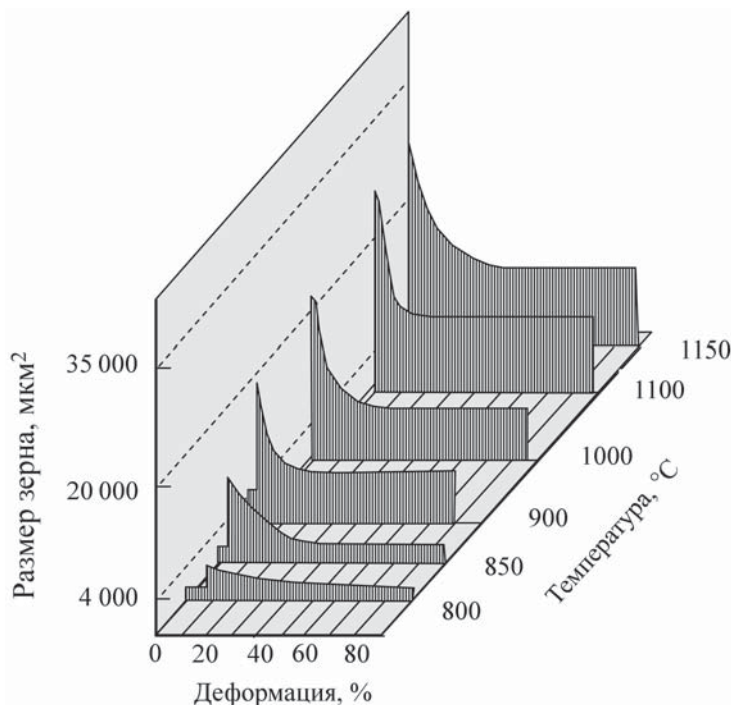


Рис. 3.17. Диаграмма рекристаллизации малоуглеродистой стали

не зависит от рода металла. Общим является наличие некоторого порога рекристаллизации. Он соответствует 8...10 % деформации и называется *критической деформацией* (характеризуется резким увеличением размеров рекристаллизованных зерен).

Это связано с тем, что при малой степени деформации еще мало число обломков кристаллитов, служащих центрами рекристаллизации, но межкристаллитное вещество уже начинает разрушаться и у кристаллитов появляется возможность объединения. При дальнейшем увеличении степени деформации растет число центров рекристаллизации, что при неизменном объеме тела приводит к уменьшению рекристаллизованных зерен металла. Для получения мелкозернистой структуры следует избегать деформирования металлов с малыми степенями деформации.

## Глава 4

# НАГРЕВ И НАГРЕВАТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

---

---

### 4.1. ТРЕБОВАНИЯ К НАГРЕВУ

#### 4.1.1. Общие вопросы

Любая нагревательная печь должна удовлетворять требованиям технологического процесса, для которого она предназначена, т.е. обеспечивать нужные температуру и качество нагрева.

Неравномерно нагретый металл при горячей пластической деформации будет деформироваться по-разному: более нагретые слои станут деформироваться интенсивнее, чем холодные. В результате этого возникает неоднородное деформированно-напряженное состояние металла, которое ведет к разнотекучности и браку поковки.

Неравномерность нагрева заготовок может быть вызвана отклонениями в работе отдельных горелок в пламенных печах (или электронагревателей в электропечах), неравномерным их расположением в печи, подсосом в печь холодного атмосферного воздуха и т.п.

Кроме равномерности нагрева особое место в технологии нагрева металла занимает скорость нагрева. С ее повышением увеличивается производительность печи, снижается расход топлива на единицу нагреваемого металла и уменьшается окисление и обезуглероживание стали. При нагреве в окислительной (воздушной) среде окисляется поверхность нагреваемого металла. При окислении на поверхности металла (заготовок) образуется слой оксидов железа ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $\text{FeO}$ ) – окалина, которая по сравнению со сталью имеет в ~20 раз меньшую теплопроводность и поэтому является тепловой изоляцией, замедляющей поступление теплоты в заготовку.

Наличие окалины нежелательно и при горячей пластической деформации, так как она ухудшает качество поверхности штамповок и поковок, а также может быть заштампована в тело поковки. Поэтому опытные кузнецы удаляют окалину перед горячей штамповкой с помощью ударов молота по поковке и стряхивания окалины.

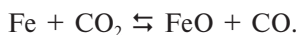
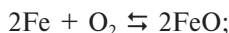
С поверхности готовых штамповок (поковок) окалина обычно удаляется механическим путем (в галтовочных барабанах или песко- и дробеструйных камерах и т.п.) или травлением поковки (штамповки) в растворах кислот или щелочей.

На практике часто применяют комбинированный метод очистки поверхности штамповок от окалины: химическое ее разрыхление, а затем механическое удаление дробеструйной или иной обработкой. Вследствие образования окалины размеры заготовки под штамповку приходится увеличивать.

Как и окисление, обезуглероживание стали является нежелательным процессом. При обезуглероживании стали в ее поверхностных слоях уменьшается содержание углерода, что снижает механические свойства металла. Обезуглероженный слой удаляется, например, при последующей обработке заготовки резанием. Для того чтобы поковки (штамповки) имели минимальный по толщине окисленный и обезуглероженный слой, необходимо качественно выполнить процесс нагрева заготовки.

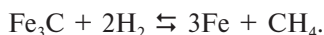
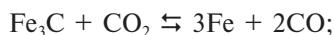
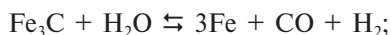
#### 4.1.2. Окисление и обезуглероживание стали и меры борьбы с ними

Под окислением стали понимают процесс окисления железа — основной составляющей стали, печными газами содержащими кислород ( $O_2$ ), водяной пар ( $H_2O$ ) и оксид углерода ( $CO_2$ ) по следующим реакциям:



Кроме  $FeO$ , называемого вюститом, в процессах окисления образуются оксиды железа  $Fe_3O_4$  (магнетит),  $Fe_2O_3$  (гематит). Непосредственно к слою стали примыкает слой вюстита (~ 80 % железа), затем располагается магнетит (~ 82 % железа) и гематит (~ 70 % железа) (рис. 4.1). Кроме того, наружные слои содержат повышенное содержание кислорода.

Количество окисленного металла называют угаром и относят к единице поверхности нагреваемой заготовки (измеряют в граммах на квадратный сантиметр). Углерод в сталях находится в химическом соединении с железом, называемым цементитом ( $Fe_3C$ ). Окисление цементита при нагреве происходит по следующим реакциям:



В результате этих химических реакций, протекающих на поверхности при нагреве стали, происходит ее обезуглероживание, т.е. снижение содержания углерода в поверхностном слое. Обезуглероживание особенно опасно для шарикоподшипниковых, пружинных, инструментальных и некоторых других марок сталей. Обезуглероженный слой с поверхности изделия удаляют обработкой резанием (точением, шлифованием и т.п.). Процессы окисления и обезуглероживания диффузионные, поэтому они зависят от времени, температуры поверхности стали, ее химического состава и состава атмосферы печи.

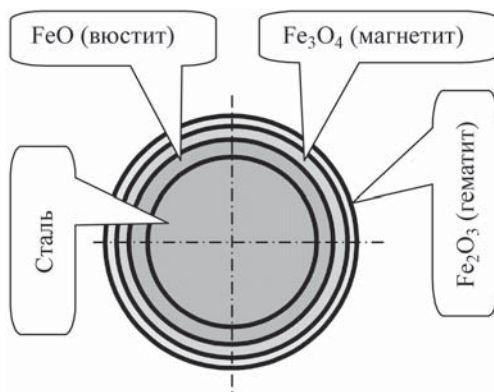


Рис. 4.1. Схема расположения окисных слоев на заготовке из стали

Большое влияние на скорость протекания окисления и обезуглероживания оказывает температура поверхности стали. Окисление и обезуглероживание начинаются при достижении поверхностью стали температуры 700...800 °С. Эти процессы протекают одновременно, но с различными скоростями. До температур, близких к 1000 °С, скорость процесса обезуглероживания опережает скорость окисления. При температуре нагрева > 1000 °С скорость окисления, наоборот, опережает скорость обезуглероживания. При нагреве стали > 1300 °С угар резко возрастает.

Различные газы, содержащиеся в печной атмосфере, разным образом взаимодействуют с железом и углеродом. Интенсивнее всего окисляет железо и обезуглероживает сталь кислород  $O_2$ , слабее — оксид углерода  $CO_2$ . Последний восстанавливает оксиды железа. Восстановитель — водород, однако он вызывает обезуглероживание стали. Метан способствует науглероживанию. Направление реакции зависит от соотношения окислителей и восстановителей  $CO_2/CO$  и  $H_2O/H_2$  в атмосфере печи, а также и температуры нагрева стали.

Учитывая данное обстоятельство, при подборе состава атмосферы печи можно полностью исключить как окисление, так и обезуглероживание. Нагрев в специальных контролируемых атмосферах чаще используется в термических печах для термообработки изделий, ранее подвергнутых обработке резанием. Контролируемый состав атмосферы печи обычно получают разложением (диссоциацией) аммиака на водород и азот или путем неполного сжигания природного газа за счет коэффициента расхода воздуха  $\alpha^*$ , который меняется от 0,25 (для эндотермических смесей) до 0,95 (для экзотермических).

Контролируемый состав атмосферы получают в специальных установках — эндогенераторах. В печах для нагрева стали под горячую пластическую деформацию топливо сжигают с коэффициентом расхода воздуха  $\alpha > 1$ . Поэтому в продуктах сгорания восстановительные газы  $CO$  и  $H_2$  практически отсутствуют. С увеличением коэффициента избытка воздуха от 1 до 1,3 угар возрастает пропорционально росту  $\alpha$ . Поэтому с целью снижения угара необходимо выбирать горелки, обеспечивающие устойчивое горение с минимальным избытком воздуха в печной атмосфере.

Наиболее эффективным способом защиты заготовок в кузнечных печах является создание газовой завесы, которая окутывает нагреваемый металл продуктами неполного горения газообразного топлива (рис. 4.2). Газовая завеса образуется струями газа, подаваемого из сплюснутых и охлаждаемых водой сопел горелки 4, направленных под небольшим углом к поверхности нагреваемых заготовок 1. Защитный газ смешивается затем с воздухом, поданным через горелки в избыточном количестве, и сгорает.

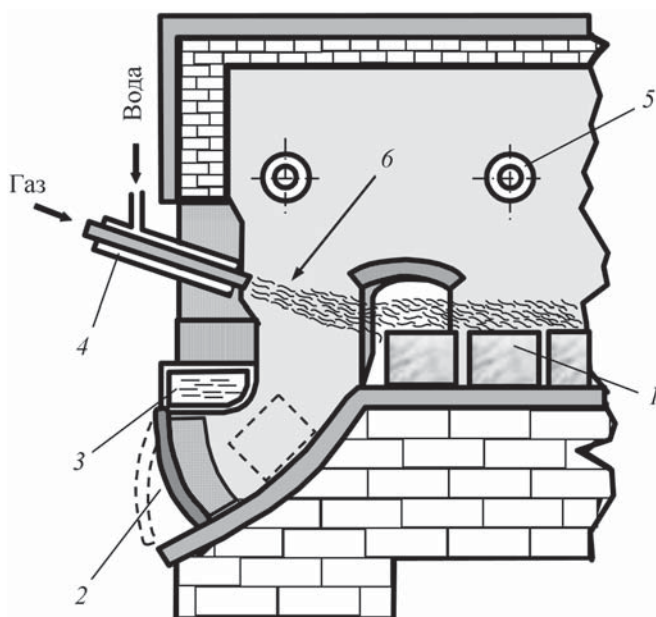
При отоплении печей природным газом через завесу подают 10...20 % от всего топлива, расходуемого на отопление печи. Газ сжигают с коэффициентом расхода воздуха  $\alpha = 0,6$ . Это позволяет получить атмосферу печи следующего состава, %: 6  $CO_2$ ; 8  $CO$ ; 13  $H_2$ ; 2  $CH_4$ , остальное — азот (N). Также эффективным способом снижения окисления и обезуглероживания стали является сжигание газа с изменением коэффициента расхода воздуха  $\alpha$ . В начальный период нагрева газ сжигают с  $\alpha > 1$ , после достижения поверхностью заготовок температур 900...950 °С уменьшают

---

\*  $\alpha = V_r V_b$ , где  $V_r$  и  $V_b$  — объемы газа и воздуха, участвующие в процессе горения, соответственно.

**Рис. 4.2. Часть методической печи с газовой завесой (схема):**

- 1 – заготовки; 2 – откидная заслонка;  
3 – водоохлаждаемая торцевая емкость;  
4 – горелки для создания газовой завесы; 5 – горелки для отопления печи;  
6 – газовая завеса



коэффициент расхода воздуха  $\alpha$  до 0,85...0,95. Полностью процессы окисления и обезуглероживания можно исключить в случае применения нагрева заготовок в жидких средах (расплавленных солях, стеклах, щелочах и металлах).

Уменьшить окисление и обезуглероживание можно также с помощью высокоскоростных процессов нагрева стали в индукционных и электроконтактных установках.

## 4.2. ВИДЫ ТОПЛИВА И УСТРОЙСТВА ДЛЯ ЕГО СЖИГАНИЯ

Топливо — это горючее вещество, выделяющее при сгорании значительное количество теплоты и используемое как источник получения тепловой энергии. По агрегатному состоянию топливо подразделяют на твердое, жидкое и газообразное. Оно может быть естественным, используемым в том состоянии, в котором оно находится в природе, и искусственным, переработанным из естественных видов топлива. К твердому естественному топливу, применяемому для отопления различных печей, относят дрова, торф, антрацит, бурые и каменные угли; к твердому искусственному топливу — древесный уголь, кокс, термоантрацит, брикеты и пыль от бурого и каменного углей.

В качестве жидкого искусственного топлива используют мазут и различные жидкотекучие смолы. Газообразное топливо может быть естественным, например природный газ, и искусственным, например газы, получаемые в доменных печах (доменный или колошниковый), коксовых печах (коксовый) и газогенераторах (генераторный). Для отопления кузнечных, прокатных и термических печей применяют только газообразные и жидкие виды топлива.

### 4.2.1. Жидкое топливо

Жидкие топлива представляют собой вещества органического происхождения. Основные составляющие элементы жидких топлив: углерод, водород, кислород, азот и сера, которые образуют многочисленные химические соединения.

*Углерод* (C) — основной тепловыделяющий элемент: при сгорании 1 кг углерода выделяется 34 000 кДж теплоты. В мазуте содержится до 80 % углерода, образующего различные соединения.

*Водород* (H) — второй наиболее важный элемент жидкого топлива: при сгорании 1 кг водорода выделяется 125 000 кДж теплоты, т.е. почти в 4 раза больше, чем при сгорании углерода. В жидких топливах имеется ~10 % водорода.

*Азот* (N) и *кислород* (O<sub>2</sub>) содержатся в жидком топливе в небольших количествах (~3 %). Они входят в состав сложных органических кислот и фенолов.

*Сера* (S) обычно присутствует в углеводородах (до 4 % и более). Она является вредной примесью в топливе.

В состав жидкого топлива также входят влага и до 0,5 % золы. Влага и зола уменьшают процентное содержание горючих составляющих жидкого топлива, что снижает его теплотворность.

### 4.2.2. Газообразное топливо

Газообразное топливо — это смесь различных газов: метана, этилена и других углеводородов, оксида углерода, диоксида углерода или углекислого газа, азота, водорода, сероводорода, кислорода и других газов, а также водяных паров.

*Метан* (CH<sub>4</sub>) — основная составляющая часть многих природных газов. Его содержание в природных газах достигает 93...98 %. При сгорании 1 м<sup>3</sup> метана выделяется ~35 800 кДж теплоты.

В газообразных топливах также может содержаться небольшое количество *этилена* (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>). Сгорание 1 м<sup>3</sup> этилена дает ~59 000 кДж теплоты.

В газообразном топливе кроме метана и этилена присутствуют также углеводородные соединения, например пропан (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>), бутан (C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>) и др. При горении этих углеводородов выделяется больше теплоты, чем при сгорании этилена, но в горючих газах их количество незначительно.

*Водород* (H<sub>2</sub>) в 14,5 раза легче воздуха. При сгорании 1 м<sup>3</sup> водорода выделяется ~10 800 кДж теплоты. Многие горючие газы, кроме коксового, содержат относительно небольшое количество водорода. В коксовом газе его содержание может достигать 50...60 %.

*Оксид углерода* (CO) — основная горючая составляющая доменного газа. При сгорании 1 м<sup>3</sup> этого газа образуется ~12 770 кДж теплоты. Этот газ не имеет ни цвета, ни запаха и очень ядовит.

*Сероводород* (H<sub>2</sub>S) — тяжелый газ с неприятным запахом, отличается высокой токсичностью. При наличии в газе сероводорода повышается коррозия металлических частей печи и газопровода. Вредное действие сероводорода усиливается наличием в газе кислорода и влаги. При сгорании 1 м<sup>3</sup> сероводорода выделяется ~23 400 кДж теплоты.

Остальные газы: CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> и пары воды — балластные составляющие, так как при повышении содержания этих газов в топливе снижается содержание его горючих составляющих. Их присутствие приводит к снижению температуры горения

топлива. Содержание в газообразном топливе  $>0,5$  % свободного кислорода считается опасным по условиям техники безопасности.

### 4.2.3. Топливосжигающие устройства

Сгорание топлива (газообразного, жидкого) осуществляют с помощью специальных топливосжигающих устройств: горелок и форсунок.

Горелки для газа и форсунки для мазута предназначены для ввода топлива и воздуха в топку или рабочее пространство печи, перемешивания горючего с кислородом и воспламенения горючей смеси. Основная задача топливосжигающих устройств — обеспечение условий образования горючей смеси топлива с воздухом. Смесеобразование осуществляется путем молекулярной и турбулентной диффузии. Молекулярная диффузия является медленным процессом по сравнению с турбулентной диффузией. Турбулентность достигается путем использования рассекателей, диффузоров, завихрителей потоков.

Процесс горения мазута более сложен, чем процесс горения газообразного топлива. При горении жидкого топлива можно выделить следующие стадии: распыление топлива и смешивание его с воздухом, подогрев смеси и испарение легких фракций, термическое расширение и горение газовой фазы. Горелки с предварительным перемешиванием называют *беспламенными*, так как при этом в рабочее пространство печи поступают продукты горения без видимого факела.

Широкое распространение получили беспламенные горелки с инжекционными смесителями, в которых необходимое количество воздуха для горения подсасывается благодаря энергии газа, подаваемого струей с высокой скоростью. При работе инжекционные горелки забирают холодный воздух непосредственно из помещения, подсасывая его в количестве, пропорциональном подаваемому газу. На рис. 4.3 приведена двухпроводная инжекционная горелка.

Недостаток беспламенных горелок заключается в том, что при снижении скорости подачи смеси в тоннель печи возможен проскок пламени (отрыв его от горелки). беспламенные горелки характеризуются концентрированным горением (коротким факелом) и непригодны для печей, где требуются растянутый факел и высокая теп-

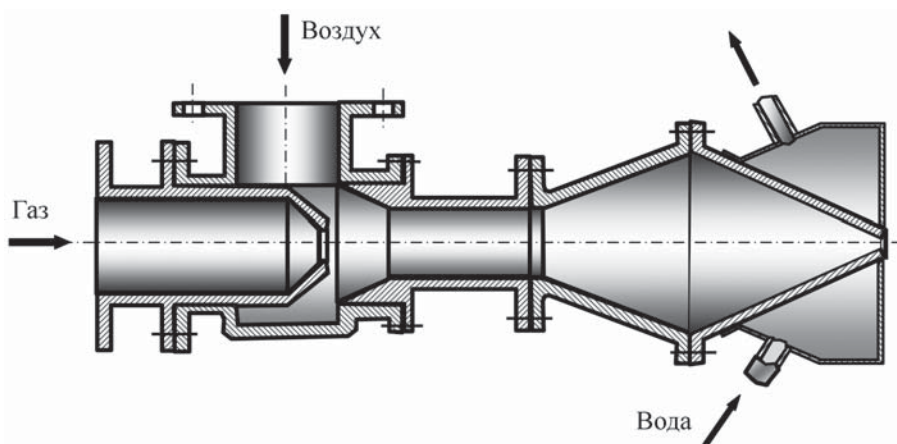


Рис. 4.3. Двухпроводная инжекционная горелка



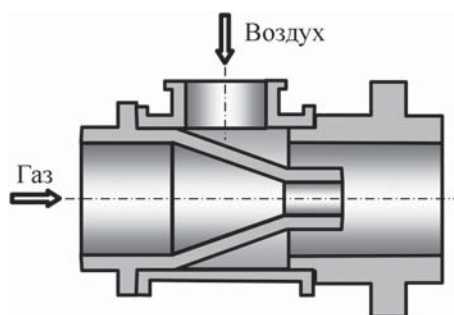


**Рис. 4.4. Двухпроводная горелка малой мощности**

ловая напряженность. В двухпроводных инжекционных горелках инжектирующая среда — газ, а инжектируемая — подогретый воздух. Для исключения деформации носка горелки в данной конструкции предусмотрено его охлаждение водой. Однако при всех недостатках метод беспламенного сжигания газа высокоэффективен.

Пламенные горелки осуществляют факельное сжигание топливной смеси без предварительного перемешивания газа и воздуха и работают только вследствие придания газовому и воздушному потокам необходимых скоростей и направлений. Процессы перемешивания и горения совме-

щены и выполняются непосредственно в рабочем пространстве печи. В пламенных горелках обычно используют подогретый воздух с  $\alpha \leq 1,05$ . При сжигании газа факел получается длинный и зона высоких температур удалена от кладки.

Пламенные горелки оказываются более эффективными, когда в печи надо обеспечить заданное распределение температур, интенсивную теплоотдачу в рабочем объеме или заданный состав продуктов горения. Промышленность выпускает пламенные горелки двух типов: с частичным внутренним перемешиванием (тип ГНП), рассчитанные на сжигание природного газа с теплотой сгорания 36 МДж/м<sup>3</sup> при коэффициенте расхода воздуха  $\alpha = 1,05$ ; с внешним перемешиванием (типы ДВМ, ДНМ, ДВС, ДНС, ДВБ, ДНБ и др. Буквенные обозначения соответствуют названиям: Д — двухпроводные; В, Н — высокая и низкая расчетная теплота сгорания газа; М, С, Б — малая, средняя и большая мощности). На рис. 4.4 приведена двухпроводная горелка малой мощности.

При нагреве металла в среде защитного газа не допускается попадания в нее продуктов горения и поэтому печи должны иметь косвенный обогрев. Это достигается муфелированием (защитой) нагреваемого металла, что связано с большим расходом окалиностойкой стали, или муфелированием пламени.

Муфелирование пламени (в бесмуфельных печах) осуществляется радиационными трубами. Каждая радиационная труба — это независимый нагреватель, внутри которого происходит сжигание топлива — преобразование химической энергии в тепловую.

Передача теплоты проводится сложным путем. Так, передача теплоты от продуктов сгорания непосредственно к стенкам трубы выполняется путем радиационно-конвективного теплообмена, а от трубы к нагреваемым заготовкам — в основном радиацией, откуда и название этого вида нагревателей — радиационные. Они обеспечивают максимальную рабочую температуру 1000...1050 °С. Удельный теплосъем с поверхности нагревателя может достигать 23...46 кВт/м<sup>2</sup>.

Радиационные трубы могут работать на газовом и жидком топливах и вместо горелок (форсунок) могут быть оборудованы электронагревателями, размещенными внутри труб. Радиационные трубы изготавливают из жаропрочных материалов диаметром 80...200 мм, с толщиной стенки 4...15 мм. Габаритные длины радиационных труб могут быть 1...3,5 м. Корпус радиационных труб может иметь различную фор-



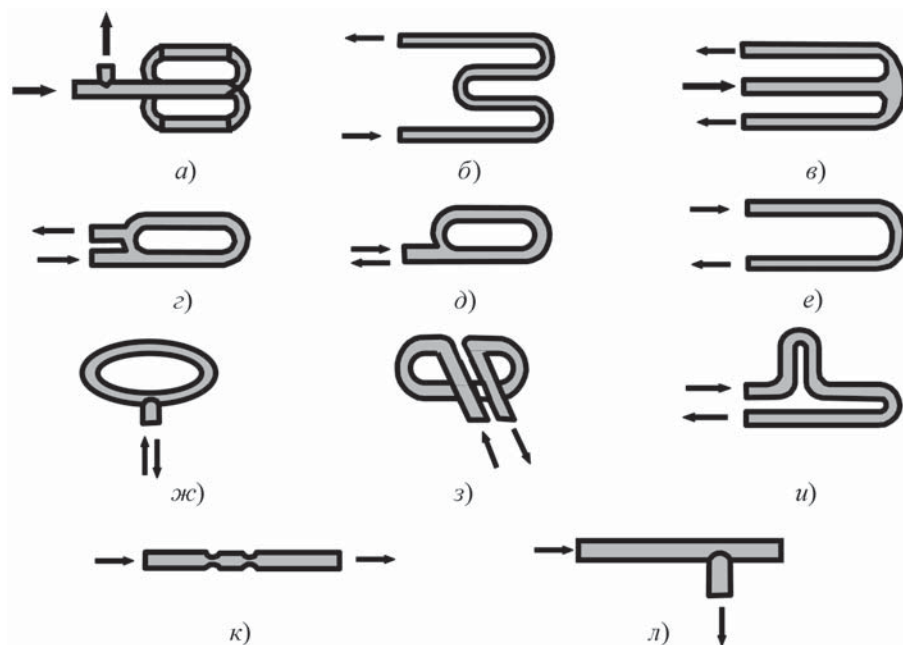


**Рис. 4.5. Формы радиационных труб:**

*а* — двухкольцевая (Ф-образная); *б* — W-образная; *в* — m-образная; *г* — однокольцевая;  
*д* — P-образная; *е* — U-образная; *ж* — O-образная; *з* — петлевая; *и* — L-образная;  
*к* — прямая; *л* — тупиковая

му, отсюда происходит и их название: прямые (пролетные), тупиковые, P-, Ф-, U-, W-образные, кольцевые и др.

На рис. 4.5 приведены некоторые формы радиационных труб.

Мазут распыляют форсунками, которые подразделяют на высокого (паровые и воздушные) и низкого (воздушные) давления. При распылении поверхность контакта мазута с воздухом увеличивается в ~2500 раз, что значительно ускоряет нагрев капли мазута и ее испарение. Хорошее перемешивание и турбулентность потока обеспечивают полное сгорание топлива с коэффициентом расхода воздуха  $\alpha$  до 1,2. При недостаточном распылении образуются крупные частицы сажистого углерода, которые не успевают сгорать в топке и образуют копоть. На рис. 4.6 приведена схема форсунки высокого давления.

В форсунках высокого давления масса распылителя мала, а скорости его подачи достаточно высоки, например в некоторых конструкциях даже сверхзвуковые. В форсунках низкого давления скорости подачи распылителя значительно ниже, однако его масса больше. В форсунках низкого давления мазут распыляют воздухом, подаваемым вентилятором высокого давления. При этом весь объем распылителя проходит через форсунку, что значительно улучшает условия распыления и смесеобразования. Факел получают коротким в отличие от форсунок высокого давления, у которых факел узкий и длинный (2,5...7 м). На рис. 4.7 приведена схема форсунки низкого давления.

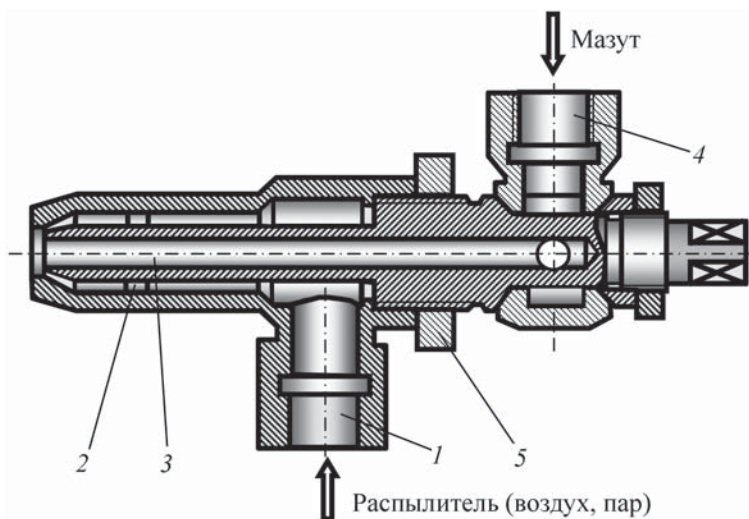


**Рис. 4.6. Форсунка высокого давления:**

1 — патрубок для распылителя; 2 — центрирующие выступы мазутной трубки; 3 — мазутная трубка; 4 — соединительная гайка; 5 — контргайка

В настоящее время разработаны и широко применяются газомазутные горелки. Они могут работать как на газе, так и на мазуте.

В печах для нагрева металла под ковку и штамповку устанавливают меньшее число форсунок, но большей производительности, чем в термических печах, где для обеспечения равномерности нагрева необходим рассредоточенный подвод теплоты. В кузнечных печах мазутный факел может находиться непосредственно в рабочем

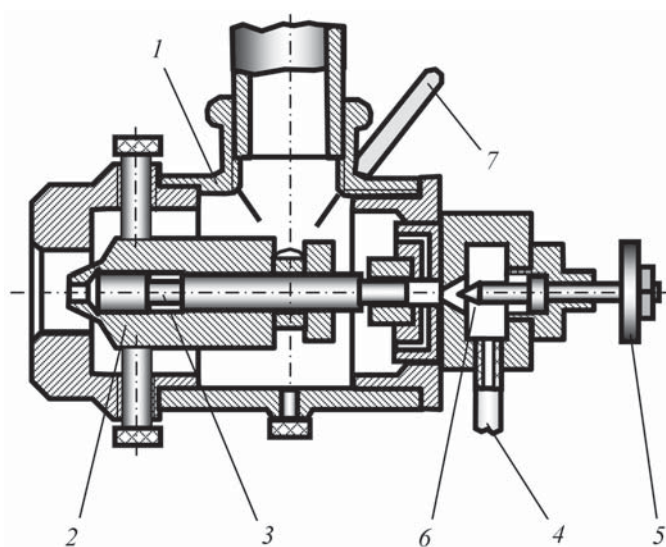


**Рис. 4.7. Схема форсунки низкого давления:**

1 — корпус; 2 — подвижный наконечник; 3 — мазутная трубка; 4 — мазутопровод; 5 — маховик для перемещения иглы; 6 — игла; 7 — рычаг для перемещения наконечника

пространстве, в термических же печах форсунки устанавливают в закрытых топках — форкамерах, из которых продукты сгорания поступают в рабочее пространство печи.

#### 4.3. НАГРЕВАТЕЛЬНЫЕ ПЕЧИ КУЗНЕЧНО-ШТАМПОВОЧНЫХ ЦЕХОВ

Нагревательная печь — это технологический энергетический агрегат, в котором в результате горения топлива или преобразования электрической энергии выделяется теплота, используемая для тепловой обработки металлов. Печи должны удовлетворять ряду основных требований, к которым относятся: обеспечение высокой производительности при заданных технологических условиях нагрева (температуре, перепаде температур по сечению заготовки и пространству печи); минимальный удельный расход топлива; возможность регулирования производительности; нагрев различных сортментов; наличие механизации процессов загрузки и выгрузки; простота и безопасность эксплуатации и обслуживания; возможность автоматического управления процессами нагрева.

В кузнечных цехах используют большое разнообразие печей, что позволяет их классифицировать по технологическим, конструктивным и иным признакам. По технологическим признакам печи подразделяются на прокатные, кузнечные (для нагрева металла под ковку и штамповку) и термические. По конструктивным особенностям различают кузнечные горны, наочковые, щелевые, камерные, методические, полуметодические, карусельные и др. В кузнечных цехах массового и крупносерийного производства большое распространение получили печи, имеющие высокую производительность: методические, полуметодические и карусельные. В проходных печах (методических и карусельных) загрузка и выгрузка заготовок осуществляются непрерывно.

В цехах с индивидуальным и мелкосерийным производством, к каким относятся кузнечные цеха авиадвигательных предприятий, используют камерные и щелевые печи; в небольших кузницах — кузнечные горны и очковые печи. В камерных печах загрузка и выгрузка заготовок осуществляется через одно и то же окно, заготовки в процессе нагрева остаются неподвижными. Для нагрева цветных металлов и сплавов в кузнечных цехах авиационного производства применяют камерные электропечи, позволяющие выполнять процесс нагрева в защитных атмосферах.

По виду энергоносителя печи подразделяют на пламенные и электрические, а первые, в свою очередь, делят на газовые и мазутные. Иногда пламенные печи классифицируют по способу утилизации теплоты отходящих газов: рекуперативные и регенеративные.

Более общим признаком классификации печей служит температурный режим, в соответствии с которым все нагревательные печи подразделяют на три класса: с постоянной температурой рабочего пространства; с его переменной температурой и проходные печи. Для первого класса печей характерен одноступенчатый режим нагрева, для второго — многоступенчатый. В проходных печах могут быть реализованы как одно-, так и многоступенчатые режимы нагрева.

В зависимости от максимальной рабочей температуры камерные электропечи также можно подразделить на: низкотемпературные, с температурой рабочего про-

пространства 650...700 °С (сушильные, отпускные, для нагрева цветных металлов и сплавов под горячую обработку давлением). В этих печах значительная часть теплоты заготовки передается конвекцией.

К среднетемпературным относятся печи с температурой рабочего пространства 700...1250 °С. В этих печах основной вид теплоотдачи происходит излучением. Печи с рабочей температурой >1250 °С относят к высокотемпературным.

Газовые камерные печи с постоянной температурой рабочего пространства предназначены для нагрева заготовок под высадку и штамповку массой до нескольких килограммов. Они имеют мощность в диапазоне 100...150 кВт, обладают высокой производительностью, но отличаются низким коэффициентом полезного действия (КПД), не превышающим 15 %. Рабочее пространство камерной печи характеризуется размерами: длиной А, шириной Б, высотой В. Номенклатурный ряд камерных печей представлен ниже:

|             |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|-------------|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| А . . . . . | 6 | 10 | 14 | 16 | 20 | 10 | 14 | 18 | 20 | 25 | 14 | 18 | 20 | 25 | 18 |
| Б . . . . . | 8 | 10 | 10 | 20 | 20 | 14 | 14 | 14 | 25 | 20 | 18 | 18 | 30 | 25 | 22 |
| В . . . . . | 4 | 8  | 11 | 14 | 16 | 8  | 11 | 14 | 16 | 18 | 11 | 14 | 16 | 20 | 14 |

На рис. 4.8 приведена схема камерной нагревательной печи.

Камерные щелевые печи используют для нагрева концов прутковых заготовок под ковку, штамповку, высадку и другие кузнечные операции. Схема камерной щелевой печи приведена на рис. 4.9. Применяется большой ряд типоразмеров рабочего пространства этих печей.

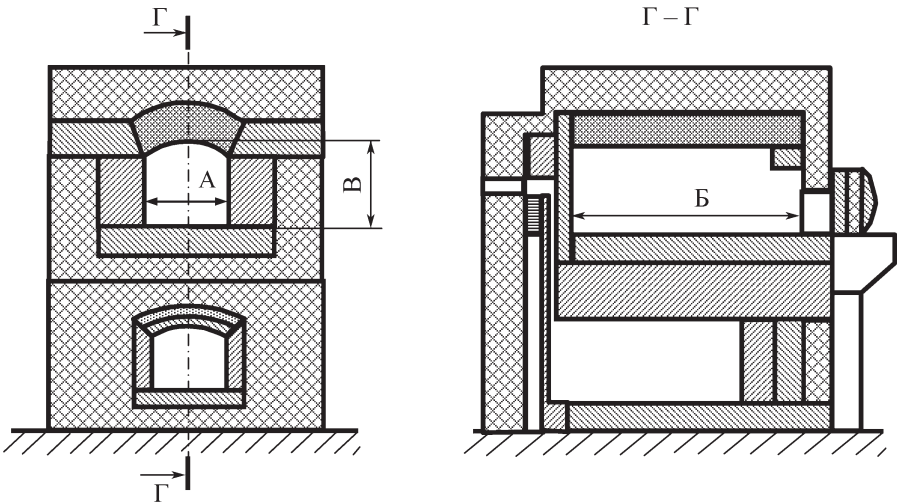


Рис. 4.8. Схема камерной нагревательной печи

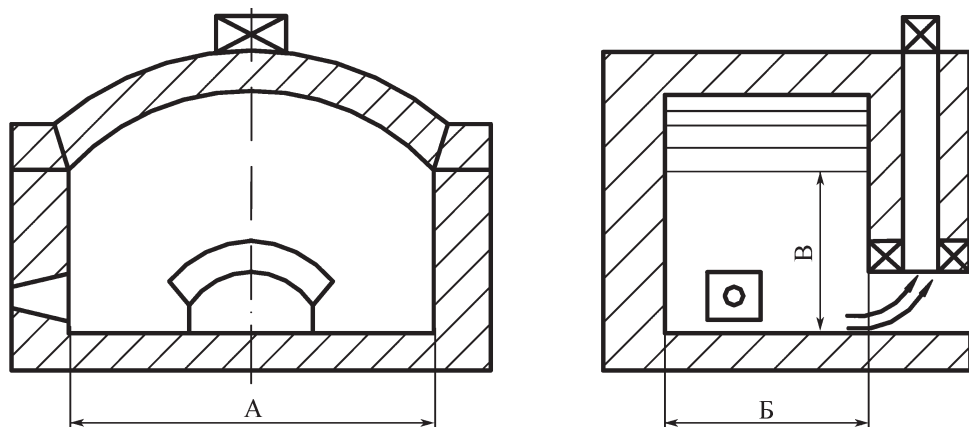


Рис. 4.9. Схема камерной щелевой печи

### Номенклатурный ряд размеров рабочей зоны щелевых печей

|             |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|-------------|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| А . . . . . | 6 | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 | 14 | 18 | 20 | 14 | 16 | 18 | 20 |
| Б . . . . . | 8 | 6  | 10 | 16 | 18 | 20 | 7  | 20 | 12 | 10 | 12 | 14 | 16 |
| В . . . . . | 4 | 8  | 9  | 10 | 11 | 14 | 10 | 14 | 16 | 10 | 11 | 14 | 16 |

Производительность печей при нагреве углеродистых и низколегированных сталей составляет  $\sim 400 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ . При нагреве легированных сталей она снижается в 2 раза.

Расход топлива: мазут 110...125 кг/т; природный газ 130...150 м<sup>3</sup>/т. При нагреве легированных сталей расход увеличивается вдвое.

Камерные печи с вращающимся подом (рис. 4.10) обычно используют для нагрева под ковку, штамповку заготовок небольшой массы. В данных печах удается получить высокую равномерность прогрева заготовок вследствие хорошего их промыва-

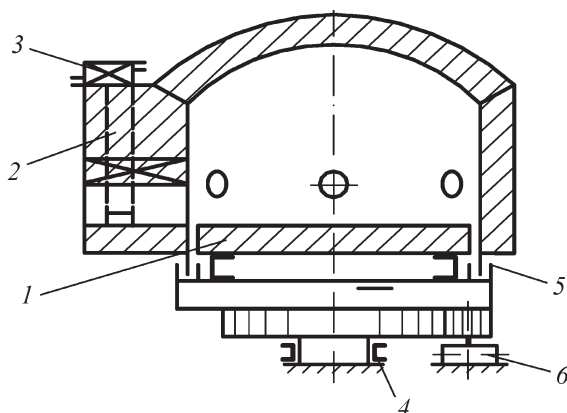


Рис. 4.10. Схема печи с вращающимся подом:

1 — под печи; 2 — каналы;  
3 — рекуператор; 4 — пятовый упорный подшипник; 5 — водяной затвор; 6 — механизм вращения печи

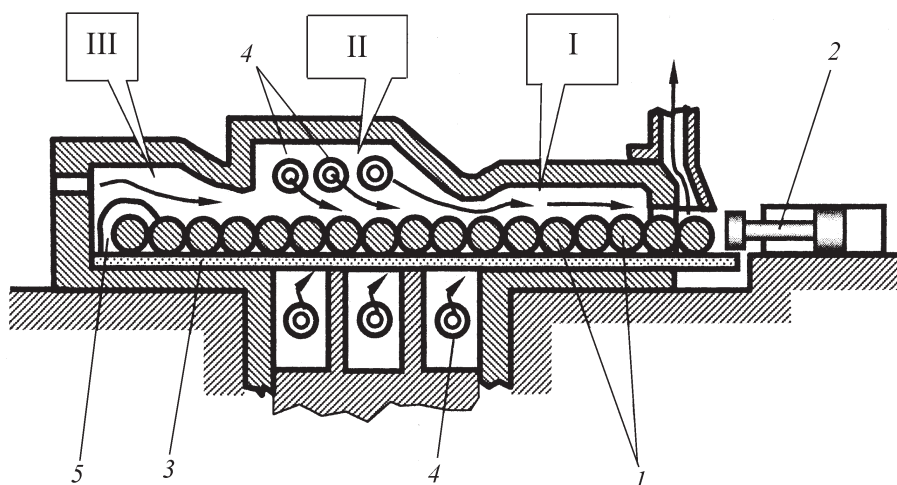


**Рис. 4.11. Схема трехзонной методической печи:**

*1* — заготовки; *2* — толкатель; *3* — под печи; *4* — горелки; *5* — окно извлечения нагретых заготовок

ния печными газами. Традиционно печи имеют шесть горелок, создающих равномерное температурное поле.

Для кузнечных цехов массового и крупносерийного производств целесообразно применение механизированных методических печей. На рис. 4.11 приведена схема трехзонной методической печи.

Рабочее пространство методической печи имеет вытянутую форму и включает в себя три (иногда две — полуметодические) зоны с различной температурой: I — зона подогрева (методическая) с температурой нагрева  $600\ldots 800\text{ }^{\circ}\text{C}$ , II — зона максимального нагрева ( $1250\ldots 1350\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), III — зона выдержки (томильная)

Заготовки *1* проталкиваются толкателем *2* и, перемещаясь по поду *3* печи, последовательно проходят все три зоны нагрева. Горячий газ от горелок *4* подается навстречу движущимся заготовкам, которые извлекаются из печи через окно *5*.

Благодаря встречному движению газов, имеющих высокую температуру, и нагреваемых заготовок температура уходящих газов используется более рационально, чем в обычных камерных печах, потери теплоты ниже, а коэффициент полезного действия выше и достигает  $40\ldots 60\%$ .

Трехзонные методические печи позволяют нагревать заготовки толщиной (диаметром)  $> 100\text{ мм}$ . Их применение позволяет выровнять температуру нагрева заготовки по всему ее объему путем выдержки в томильной зоне.

В табл. 4.1 рассмотрены основные типы пламенных печей, применяемых в кузнечных цехах для нагрева заготовок под ковку и штамповку.

Камерные и карусельные электрические нагревательные печи сопротивления получили широкое распространение в кузнечно-штамповочных цехах авиационного производства для нагрева высоколегированных сталей, никелевых, титановых и алюминиевых сплавов. Камерные электропечи дают возможность получить любой

**4.1. Типы пламенных печей для нагрева заготовок под ковку и штамповку**

| Печи                                                          | Область применения                                                                                  | Использование теплоты отходящих газов                                          |
|---------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| Щелевые одно- и двухкамерные                                  | Для нагрева с предварительным подогревом легированных и высоколегированных сталей                   | Рекуператор                                                                    |
| Одно- и двухкамерные с закрывающимися окнами                  | Для нагрева легированных и высоколегированных сталей                                                | Рекуператор или использование теплоты на подогрев металла (в камере подогрева) |
| Крупногабаритные камерные с несколькими закрывающимися окнами | Для нагрева небольших слитков и заготовок под ковку                                                 | Рекупертатор или регенератор                                                   |
| Печи-колодцы для нагрева под ковку и прокатку слитков         | Для нагрева слитков небольшой массы                                                                 |                                                                                |
| С выдвижным подом                                             | Для нагрева слитков под ковку или штамповку                                                         |                                                                                |
| Камерная малоокислительного нагрева                           | Для нагрева небольших слитков и заготовок из углеродистых и легированных сталей                     | Рекуператор                                                                    |
| Методическая трехзонная                                       | Для нагрева слитков из высоколегированных сталей под ковку, штамповку в крупносерийном производстве |                                                                                |
| Очковые                                                       | Для нагрева концов заготовок под высадку, штамповку                                                 |                                                                                |
| Полуметодические толкательные                                 | Для нагрева заготовок под ковку и штамповку в крупносерийном и массовом производствах               |                                                                                |
| С вращающимся подом                                           | Для нагрева различных заготовок под ковку и штамповку                                               |                                                                                |
| Скоростного конвективного нагрева                             | Для нагрева небольших заготовок при массовом и крупносерийных производствах                         |                                                                                |
| Полуметодические малоокислительного нагрева                   | Для нагрева небольших и средних по размерам заготовок в массовом и крупносерийном производствах     |                                                                                |



температурный режим с обеспечением его автоматического регулирования. Электрическая энергия в печах сопротивления преобразуется в тепловую с помощью нагревательных элементов, изготавливаемых из материалов с высоким электрическим сопротивлением.

Как уже отмечалось, печи сопротивления подразделяют на низко-, средне- и высокотемпературные. В низкотемпературных печах основной теплообмен осуществляется путем конвекции, поэтому в них организуют искусственную циркуляцию печной атмосферы печными вентиляторами. В средне- и высокотемпературных печах основной теплообмен выполняется посредством излучения. Электронагреватели печей сопротивления изготавливают в зависимости от рабочей температуры из различных материалов. Материалы, применяемые для изготовления нагревателей, и их рабочие температуры приведены ниже.

**Материалы нагревателей и рабочие температуры, °С**

|                                               |             |
|-----------------------------------------------|-------------|
| Нихромы:                                      |             |
| X23Н18.....                                   | 800         |
| X15Н60-Н.....                                 | 950         |
| X20Н80-Т3.....                                | 1100        |
| Фехрали:                                      |             |
| ОХ23Ю5А.....                                  | 1200        |
| ОХ27Ю5А.....                                  | 1300        |
| Металлокерамический материал.....             | До 1600     |
| Дисилицид молибдена (MoSi <sub>2</sub> )..... | 1400...1450 |
| Карбидокремниевые (корундовые SiC).....       | 1450...1500 |

Модели низко- и среднетемпературных камерных печей, выпускаемые отечественной промышленностью, приведены в табл. 4.2 и 4.3.

В качестве примера ниже представлена структура условного обозначения камерной электропечи модели СНО-3.4.3/6: С – нагрев сопротивлением; Н – камерная;

**4.2. Перечень выпускаемых низкотемпературных камерных печей**

| Обозначение печи | Установленная мощность, кВт | Номинальная температура, °С | Размеры рабочего пространства, мм |
|------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|
| СНО-3.4.3/5      | 10                          | 500                         | 300×400×300                       |
| СНО-4.8.4/5      | 20                          |                             | 400×800×400                       |
| СНО-6.8.6/5      | 40                          |                             | 600×800×600                       |
| СНО-8.10.8/5     | 68                          |                             | 800×1000×800                      |
| СНО-10.20.10/5   | 170                         |                             | 1000×2000×1000                    |



Окончание табл. 4.2

| Обозначение печи | Установленная мощность, кВт | Номинальная температура, °С | Размеры рабочего пространства, мм |
|------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|
| СНО-3.4.3/6      | 11                          | 600                         | 300×400×300                       |
| СНО-4.8.4/6      | 22                          |                             | 400×800×400                       |
| СНО-6.8.6/6      | 44                          |                             | 600×800×600                       |
| СНО-8.12.6/6     | 66                          |                             | 800×1200×600                      |
| СНО-10.20.8/6    | 150                         |                             | 1000×2000×800                     |
| СНО-3.4.3/7,5    | 14                          | 750                         | 300×400×300                       |
| СНО-4.8.4/7,5    | 30                          |                             | 400×800×400                       |
| СНО-5.10.5/7,5   | 58                          |                             | 500×1000×500                      |
| СНО-6.12.5/7,5   | 70                          |                             | 600×1200×500                      |
| СНО-8.12,5.6/7,5 | 87                          |                             | 800×1250×600                      |
| СНО-11.22.10/7,5 | 250                         |                             | 1100×2200×1000                    |

#### 4.3. Перечень выпускаемых промышленностью среднетемпературных камерных печей

| Обозначение печи | Установленная мощность, кВт | Номинальная температура, °С | Размеры рабочего пространства, мм |
|------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|
| СНО-3.6.2/10     | 15                          | 1000                        | 300×600×200                       |
| СНО-4.8.2,5/10   | 30                          |                             | 400×800×250                       |
| СНО-6.12.4/10    | 70                          |                             | 600×1200×400                      |
| СНО-8.16.5/10    | 115                         |                             | 800×1600×500                      |
| СНО-8,5.17.5/10  | 130                         |                             | 850×1700×500                      |

Продолжение табл. 4.3

| Обозначение печи | Установленная мощность, кВт | Номинальная температура, °С | Размеры рабочего пространства, мм |
|------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|
| CHO-10.20.6/10   | 180                         | 1000                        | 1000×2000×600                     |
| CHO-11.22.7/10   | 225                         |                             | 1100×2200×700                     |
| CHO-3.6.2/11     | 25                          | 1100                        | 300×600×200                       |
| CHO-4.8.2,5/11   | 50                          |                             | 400×800×250                       |
| CHO-6.12.4/11    | 95                          |                             | 600×1200×400                      |
| CHO-8.16.5/11    | 150                         |                             | 800×1600×500                      |
| CHO-8,5.17.5/11  | 185                         |                             | 850×1700×500                      |
| CHO-10.20.6/11   | 275                         |                             | 1000×2000×600                     |
| CHO-11.22.7/11   | 330                         |                             | 1100×2200×700                     |
| CHO-3.6.2/12     | 30                          | 1200                        | 300×600×200                       |
| CHO-4.8.2,5/12   | 55                          |                             | 400×800×250                       |
| CHO-6.12.4/12    | 95                          |                             | 600×1200×400                      |
| CHO-8.16.5/12    | 160                         |                             | 800×1600×500                      |
| CHO-10.20.6/12   | 285                         |                             | 1000×2000×600                     |
| CHO-11.22.7/12   | 355                         |                             | 1100×3300×700                     |
| CHO-3.4.2,5/13   | 25                          | 1300                        | 300×400×250                       |
| CHO-4.8.2,5/13   | 50                          |                             | 400×800×250                       |
| CH3-3.6.2/10     | 15                          | 1000                        | 300×600×200                       |
| CH3-4.8.2,5/10   | 30                          |                             | 400×800×250                       |
| CH3-6.12.4/10    | 70                          |                             | 600×1200×400                      |
| CH3-8.16.5/10    | 115                         |                             | 800×1600×500                      |
| CH3-10.20.6/10   | 182                         |                             | 1000×2000×600                     |

Окончание табл. 4.3

| Обозначение печи | Установленная мощность, кВт | Номинальная температура, °С | Размеры рабочего пространства, мм |
|------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|
| СНЗ-11.22.7/10   | 228                         | 1000                        | 1100×2200×700                     |
| СНЗ-3.6.2/11     | 25                          | 1100                        | 300×600×200                       |
| СНЗ-4.8.2,5/11   | 60                          |                             | 400×800×250                       |
| СНЗ-6.12.4/11    | 95                          |                             | 600×1200×400                      |
| СНЗ-8.16.5/11    | 150                         |                             | 800×1600×500                      |
| СНЗ-10.20.6/10   | 186                         |                             | 1000×2000×600                     |
| СНЗ-11.22.7/11   | 277                         |                             | 1100×2200×700                     |
| СНЗ-3.6.2/12     | 30                          | 1200                        | 300×600×200                       |
| СНЗ-4.8.2,5/12   | 55                          |                             | 400×800×250                       |
| СНЗ-6.12.4/12    | 90                          |                             | 600×1200×400                      |
| СНЗ-8.16.5/12    | 100                         |                             | 800×1600×500                      |
| СНЗ-10.20.6/12   | 286                         |                             | 1000×2000×600                     |
| СНЗ-11.22.7/12   | 357                         |                             | 1100×2200×700                     |

О – среда в рабочем пространстве – окислительная (воздушная) (если вместо О стоит З, то в рабочем пространстве – защитная атмосфера); 4 – длина рабочего пространства в дециметрах; 3 – высота рабочего пространства в дециметрах; 6 – номинальная температура, сотни °С.

Некоторые технические характеристики выпускаемых промышленностью карусельных электропечей сопротивления приведены в табл. 4.4.

#### 4.4. Технические характеристики карусельных электропечей сопротивления с номинальной температурой нагрева 1100 °С

| Параметр печи               | Тип печи           |                    |
|-----------------------------|--------------------|--------------------|
|                             | CAO-60.40.7/11-III | CAO-85.65.7/11-III |
| Установленная мощность, кВт | 800                | 1239               |
| Мощность нагревателей, кВт  | 795                | 1225               |

Окончание табл. 4.4

| Параметр печи                                        | Тип печи           |                        |
|------------------------------------------------------|--------------------|------------------------|
|                                                      | CAO-60.40.7/11-III | CAO-85.65.7/11-III     |
| Число тепловых зон                                   | 7                  | 10                     |
| Производительность, кг/ч                             | 1280               | 1440                   |
| Время нагрева, ч                                     | 20                 | 27                     |
| Размеры рабочего пространства, мм                    |                    |                        |
| внешний диаметр пода                                 | 6000               | 8500                   |
| внутренний диаметр пода                              | 4000               | 6500                   |
| высота загрузочного окна                             | 700                |                        |
| Масса, т:                                            |                    |                        |
| электропечи                                          | 90                 | 150                    |
| футеровки                                            | 37,9               | 68                     |
| Габаритные размеры печи, мм<br>(ширина×длина×высота) | —                  | 10 900 × 14 200 × 5500 |

#### 4.4. НАГРЕВАТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

Под индукционным, или высокочастотным, нагревом понимают нагрев при бесконтактной передаче электроэнергии в заготовку электромагнитным полем, возникающим вокруг проводника, по которому течет переменный ток. Применение индукционного нагрева особенно целесообразно в массовом и крупносерийном производствах. Эффективность метода определяется высокой скоростью нагрева. В результате этого практически полностью исключается окисление металла, сохраняется мелкозернистая структура стали, обеспечивающая технологическую пластичность заготовки, одновременно снижается расход энергии на обработку заготовки давлением и увеличивается срок службы кузнечно-прессового оборудования. Индукционные установки компактны по габаритным размерам и легко встраиваются в поточные штамповочные линии.

На рис. 4.12 приведена схема индуктора для нагрева цилиндрических заготовок.

Нагреваемую заготовку 1 помещают внутрь спирали 2, изготовленной из медных трубок. Заготовки могут перемещаться вдоль индуктора по водоохлаждаемым на-

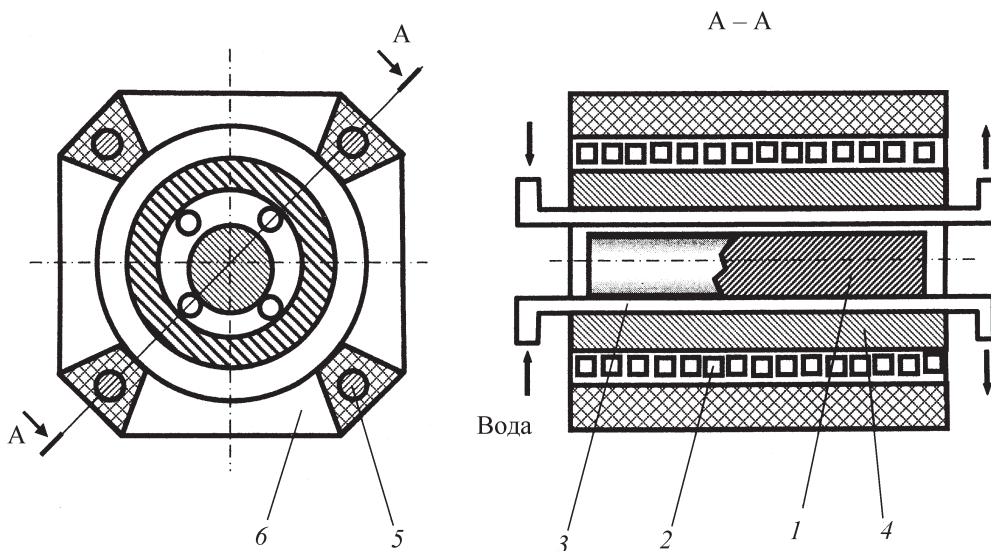


**Рис. 4.12. Схема индуктора для нагрева цилиндрических заготовок:**

*1* — заготовка; *2* — спираль; *3* — направляющие; *4* — корпус; *5* — бруска; *6* — набор плит-диэлектриков

правляющим 3. Снаружи спираль 2 поддерживается брусками 5, изготовленными из диэлектрика и зафиксированных набором асбоцементных плит 6. Охлаждение спирали 2 обеспечивается пропусканием воды через полости ее трубок. Ниже приведены рекомендованные частоты переменного тока для нагрева стальных цилиндрических заготовок различного диаметра.

**Рекомендуемые частоты переменного тока для нагрева цилиндрических стальных заготовок**

|                                     |     |          |          |         |         |         |
|-------------------------------------|-----|----------|----------|---------|---------|---------|
| Рекомендуемая частота, Гц . . . . . | 50  | 500      | 1000     | 2500    | 8000    | >10 000 |
| Диаметр заготовки, мм . . . .       | 150 | 70...110 | 50...120 | 30...80 | 15...40 | 20      |

В качестве источников тока повышенной частоты для питания индукционных установок используют электромагнитные генераторы и статические преобразователи частот. Электромагнитные генераторы содержат индукторный генератор повышенной частоты, ротор которого приводится во вращение трехфазным электродвигателем. Промышленность выпускает генераторы частотами 800, 1000, 2500, 8000, 10 000 Гц и мощностью до 250 кВт. В табл. 4.5 приведены параметры индукторов и режимы нагрева стальных заготовок. Параметры серийно выпускаемых индукционных нагревателей представлены в табл. 4.6, машинные преобразователи частоты тока, питающие индукционные нагреватели, — в табл. 4.7, тиристорные преобразователи частоты тока для индукционных установок рассмотрены в табл. 4.8.

4.5. Параметры индукторов и режимы нагрева стальных заготовок

| Параметры заготовки |       |           | Параметры индуктора |               |        | Режим                 |                   |               |                                  |                          |                            |                          |
|---------------------|-------|-----------|---------------------|---------------|--------|-----------------------|-------------------|---------------|----------------------------------|--------------------------|----------------------------|--------------------------|
| Диаметр             | Длина | Масса, кг | Внутренний диаметр  | Длина обмотки | Число  |                       | Частота тока, кГц | Напряжение, В | Средняя мощность генератора, кВт | Темп выдачи заготовки, с | Время нагрева заготовки, с | Производительность, кг/ч |
|                     |       |           | метр                | мм            | витков | заготовок в индукторе |                   |               |                                  |                          |                            |                          |
| Нормальный нагрев   |       |           |                     |               |        |                       |                   |               |                                  |                          |                            |                          |
| 56                  | 230   | 4,4       | 120                 | 1160          | 79     | 5                     | 1                 | 750           | 240                              | 23                       | 115                        | 690                      |
| 70                  | 140   | 4,15      |                     |               |        | 8                     |                   |               | 350                              | 13                       |                            |                          |
| 34                  | 150   | 8,15      | 80                  | 1400          | 47     | 1                     | 2,5               | 650           | 150                              | 73                       |                            | 400                      |
| 48                  | 415   | 20        | 100                 | 1600          | 54     |                       |                   |               | 3                                | 750                      | 190                        | 130                      |
|                     | 145   | 2         |                     | 540           | 40     | 31                    | 93                | 230           |                                  |                          |                            |                          |
|                     | 560   | 7,9       |                     | 650           | 48     | 1                     | 70                | 405           |                                  |                          |                            |                          |
| 55                  | 110   | 2         | 130                 | 760           | 40     | 5                     | 2,5               | 750           | 125                              | 20                       | 100                        | 360                      |
| 65                  | 700   | 18,1      |                     |               |        | 1                     |                   |               | 160                              | 140                      |                            | 460                      |
|                     | 150   | 3,9       | 4                   | 155           | 33     | 132                   | 425               |               |                                  |                          |                            |                          |

Нормальный нагрев



Продолжение табл. 4.6

| Тип нагревателя | Мощность, кВт | Частота, кГц | Расход, м <sup>3</sup> |         | Длина индуктора, мм | Размеры заготовки, мм |               |           | Производительность, кг/ч |          |
|-----------------|---------------|--------------|------------------------|---------|---------------------|-----------------------|---------------|-----------|--------------------------|----------|
|                 |               |              | воды                   | воздуха |                     | Диаметр               |               | Длина     |                          |          |
|                 |               |              |                        |         |                     | предельный            | рекомендуемый |           |                          |          |
| ИК 1-250/2,4    | 250           | 2,4          | 8                      | 6,5     | 1000                | 25...65               | 40...60       | 70...250  | 600                      |          |
| ИК 2-250/8      |               | 8            |                        |         |                     | 15...45               | 25...35       |           | 500                      |          |
| КИН 10-50/1 П   | 500           | 1            | 7                      | 21      | 2000                | 60...135              | 65...95       | 100...400 | 1200                     |          |
| КИН 9-500/2,4 П |               | 2,4          |                        |         |                     | 30...80               | 40...60       |           |                          |          |
| КИН 11-500/4 П  |               | 4            |                        |         |                     | 20...80               | 30...50       |           |                          |          |
| КИН 12-500/10 П |               | 10           |                        |         |                     | 15...45               | 25...35       |           |                          |          |
| ИК-500/1,0      |               | 1            |                        |         |                     | 60...135              | 65...95       |           |                          |          |
| ИК-500/2,4      | 750           | 2,4          | 12                     | 10      | 3000                | 30...80               | 40...60       | 120...400 | 1800                     |          |
| КИН 4-750/1 Ш   |               | 1            |                        |         |                     | 80...160              | 65...95       |           |                          |          |
| КИН 5-750/1-Ш   |               | 2,4          |                        |         |                     | 45...160              | 45...60       |           |                          | 80...400 |
| КИН 6-750/2,4 Ш |               |              |                        |         |                     |                       |               |           |                          |          |
|                 |               |              |                        |         |                     |                       |               |           |                          |          |



Окончание табл. 4.6

|                  |      |     |     |    |        |          |         |           |      |  |
|------------------|------|-----|-----|----|--------|----------|---------|-----------|------|--|
| КИН 7-750/2,4 Ш  | 750  | 2,4 | 12  | 10 | 3000   | 15...160 | 45...60 | 80...400  | 1800 |  |
| КИН 8-750/4 Ш    |      | 4   |     |    |        | 45...80  | 45...50 | 70...400  |      |  |
| КИН 9-750/4 Ш    |      |     |     |    |        |          |         |           |      |  |
| ИК-750/1         |      |     |     |    |        | 80...160 | 85...95 | 120...400 |      |  |
| КИН 2-1500/1 Ш   | 1500 | 2,4 | 25  | 20 | 3000×2 | 45...160 | 45...60 | 80...400  | 3600 |  |
| КИН 2-1500/2,4 Ш |      |     |     |    |        | 80...160 | 85...95 | 120...400 |      |  |
| ИК 1-1500/1      |      | 1   | 35  |    |        | 45...160 | 45...60 | 80...400  |      |  |
| ИК 1-1500/2,4    |      | 2,4 |     |    |        |          |         |           |      |  |
| ИН 5-250/10      | 250  | 10  | 12  | 5  | 600    | 15...45  | 25...35 | 200...300 | 600  |  |
| КИН 7-500/2,4 П  | 500  | 2,4 | 6,5 | 8  | 500    | 35...80  | 40...60 | 200...700 | 1200 |  |
| ИН 2-250/10      | 250  | 10  | 4   | —  | 2×500  | 10...100 | 25...35 | 200...800 | 600  |  |

4.7. Технические характеристики машинных преобразователей частоты тока, питающие индукционные нагреватели

| Параметр                   | Тип преобразователя |                              |             |                       |                |                |
|----------------------------|---------------------|------------------------------|-------------|-----------------------|----------------|----------------|
|                            | ОПЧ-250-2,4         | ОПЧ-250-10,0                 | ОПЧ-350-1,0 | ОПЧ-500-1,0           | ОПЧ-500-2,4    | ОПЧ-2500-1,0   |
| Частота тока, кГц          | 2,4                 | 10                           | 1           |                       | 2,4            | 1              |
| Полезная мощность, кВт     | 250                 |                              | 320         | 500                   |                | 2500           |
| Потребляемая мощность, кВт | 291                 | 306                          | 364         | 556                   | 568            | 2660           |
| КПД, %                     | 86                  | 82                           | 88          | 90                    | 88             | 94,2           |
| Напряжение, В:             | 329                 | 800<br>3000,<br>6000,<br>380 | 800/1600*   | 1000<br>3000,<br>6000 | 1000<br>10 000 | 1000<br>10 000 |
| номинальное                |                     |                              |             |                       |                |                |
| сети                       |                     |                              |             |                       |                |                |
| Сила тока генератора, А    | 329                 |                              | 400         | 625                   | 658            | 2500           |
| Расход воды, м³/ч          | 3,6                 | 4,8                          | 3,6         | 5,4                   | 6              | 15             |
| Масса, т                   | 4,25                | 4,71                         | 4,29        | 5,285                 | 6,14           | 9,51           |
| Длительность пуска, с      | 15; 16              | 18;19                        | 16          | 10                    | 14             | 30             |

\* Данные установки выпускаются с номинальным напряжением 800 или 1600 В.

#### 4.8. Параметры тиристорных преобразователей частоты тока для индукционных нагревателей

| Параметр                                   | Тип преобразователя |                 |             |
|--------------------------------------------|---------------------|-----------------|-------------|
|                                            | ТПЧ-1               | ТПЧ-800-1,0/0,5 | ТПЧ-250-2,4 |
| Номинальная мощность, кВт                  | 630                 | 800             | 250         |
| Номинальное напряжение, В                  | 800                 |                 |             |
| Расход охлаждающей воды, м <sup>3</sup> /ч | —                   | 6               | 4           |

| Параметр                                   | Тип преобразователя |             |             |
|--------------------------------------------|---------------------|-------------|-------------|
|                                            | ТПЧ-500-2,4         | ТПЧ-800-1,0 | ТПЧ-160-4,0 |
| Номинальная мощность, кВт                  | 500                 | 800         | 160         |
| Номинальное напряжение, В                  | 800                 |             | 2×400       |
| Расход охлаждающей воды, м <sup>3</sup> /ч | 5                   |             | 2,5         |

Помимо индукционного нагрева в кузнечно-прессовых цехах получил широкое распространение электроконтактный метод нагрева, обладающий рядом преимуществ перед другими методами. Это низкая стоимость (на ~15 % ниже индукционного); высокая скорость нагрева, позволяющая проводить нагрев практически без окисления с сохранением мелкозернистой структуры сталей; возможность встраивания в кузнечно-штамповочные автоматические линии, высокий (до 0,85...0,9) КПД.

Этот вид нагрева осуществляется непосредственно передачей тока от питающей сети к заготовке через рабочие контакты нагревательных установок. Данный способ нагрева может быть использован практически для всех операций горячей обработки металлов давлением.

Существуют установки, в которых нагрев совмещен с пластической деформацией (например, электровысадочные автоматы). К недостаткам электроконтактного нагрева можно отнести трудность достижения равномерного нагрева концов заго-

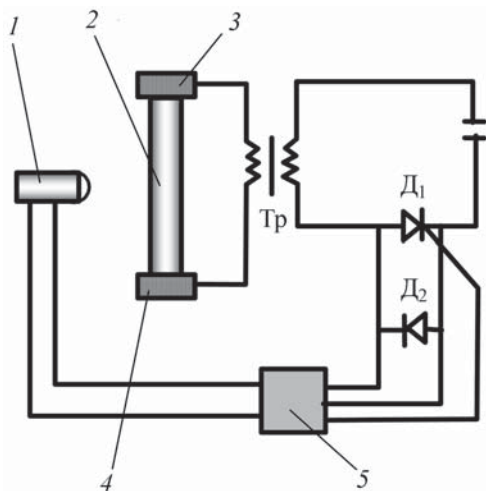


**Рис. 4.13. Схема электроконтактной установки с тиристорным управлением:**  
 1 – оптический пирометр; 2 – заготовка;  
 3, 4 – контакты; 5 – усилитель

товки и ограничение размеров заготовки, которое определяется отношением длины заготовки  $L$  к диаметру  $d$ . При  $L/d^2 \leq 1$  КПД нагрева уменьшается до 50 %.

На рис. 4.13 приведена схема электроконтактной установки с тиристорным управлением. Ее работа заключается в следующем.

К заготовке 2, зажатой в контактах 3 и 4, подводят напряжение от понижающего трансформатора Тр. Оптический пирометр 1 включен в цепь усилителя 5 таким образом, что при увеличении температуры заготовки напряжение на выходе усилителя уменьшается. Это сопровождается снижением напряжения на управляющем электроде тиристора  $D_1$ , который закрывается, разрывая первичную цепь трансформатора. При остывании заготовки усилитель повышает напряжение на управляющем электроде и тиристор  $D_1$  открывается. В цепь включены два тиристора, по одному на каждый полупериод переменного тока. Тиристоры используют и для автоматической регулировки значения подводимого к заготовке напряжения.

На рис. 4.14 приведены некоторые технологические схемы электроконтактного нагрева заготовок.

Электроконтактным нагревом рекомендуется нагревать заготовки при  $L > 1,5 d^2$ , где  $L$  – длина заготовки;  $d$  – ее диаметр.

Электроконтактные установки традиционно включают в себя контактные устройства и силовой понижающий трансформатор. Некоторые типы токовыводящих контактов зажимных узлов электроконтактных установок приведены на рис. 4.15.

По конструкции зажимные токоподводящие контакты 1 для различных геометрических сечений заготовок 2 можно подразделить на следующие основные типы:

- призматические, применяемые в качестве радиальных контактов при нагреве цилиндрических заготовок (рис. 4.15, а);
- плоские, используемые в роли радиальных контактов при нагреве прямоугольных заготовок и радиально-торцевых при нагреве цилиндрических и прямоугольных заготовок, а также используемые как торцевые контакты при зажиме заготовок с торцов (рис. 4.15, б);

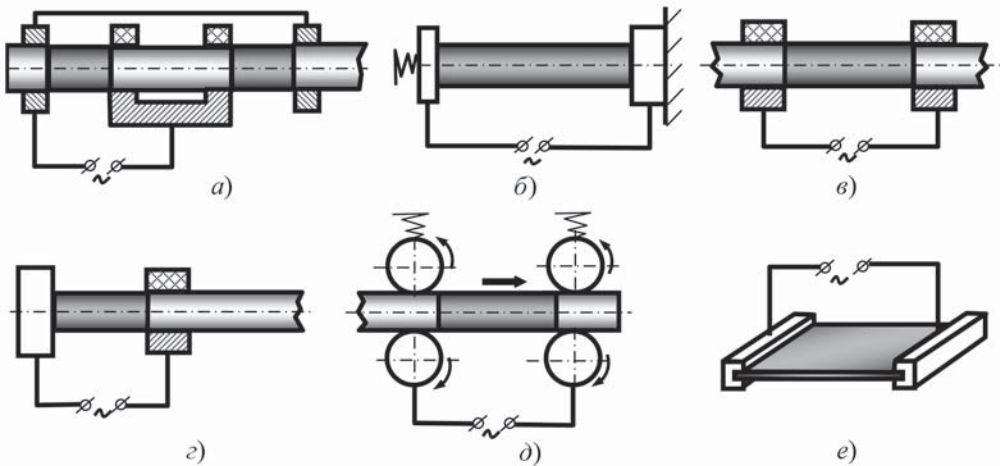


**Рис. 4.14. Некоторые схемы электроконтактного нагрева заготовок:**

*а* — нагрев двух участков заготовки; *б* — нагрев заготовки по всей длине; *в* — нагрев некоторого участка заготовки; *г* — нагрев концевой зоны заготовки; *д* — непрерывный нагрев движущейся заготовки между двух пар вращающихся роликов; *е* — нагрев листовой заготовки

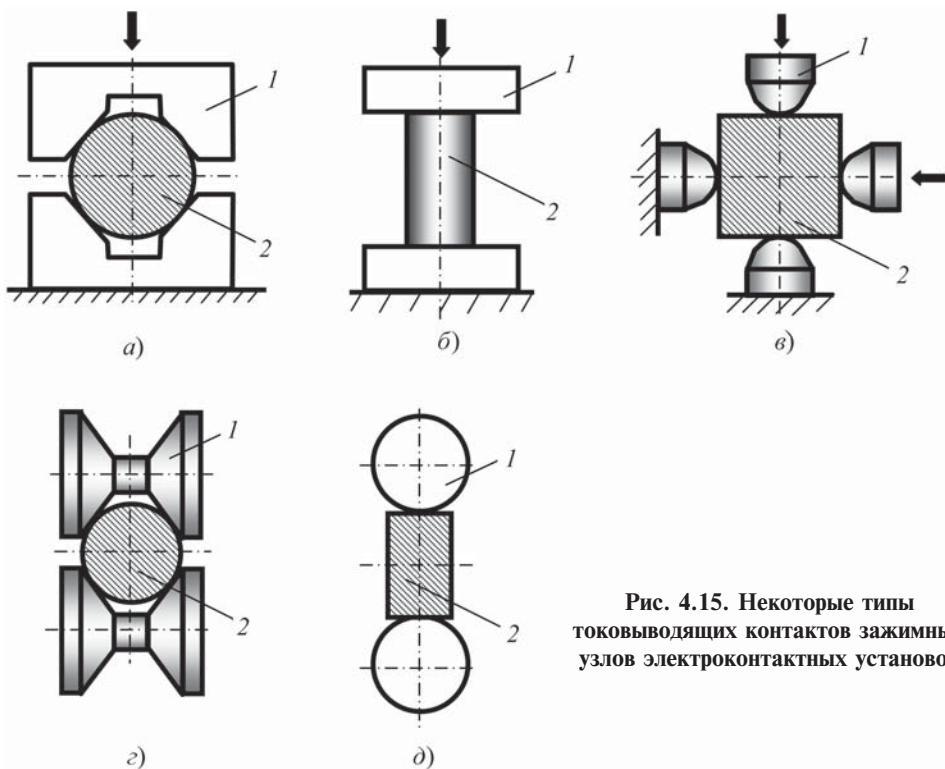


**Рис. 4.15. Некоторые типы токовыводящих контактов зажимных узлов электроконтактных установок**

— цилиндрические со сферической контактной поверхностью, применяемые в качестве радиальных и торцевых контактов, преимущественно в многоконтактных узлах зажима (рис. 4.15, *в*);

— роликовые, работающие как вращающиеся радиальные контакты при движении проволоки или прутка во время нагрева (рис. 4.15, *г*);

— цилиндрические, служащие радиальными контактами при нагреве цилиндрических или прямоугольных заготовок небольшого диаметра или незначительных поперечных размеров (рис. 4.15, *д*).

Технические характеристики основных типов электроконтактных установок и трансформаторов, выпускаемых промышленностью, приведены в табл. 4.9 и 4.10.

Определенный интерес для горячей обработки давлением представляет возможность совмещения процессов электроконтактного нагрева и пластической деформации. Штамповка с одновременным электроконтактным нагревом заготовки непосредственно в штампе позволяет создать условия деформирования близкие к изотермическим (так называемые квазиизотермические условия), посредством поддержания заданной температуры в процессе пластической деформации.

Применение электроконтактного нагрева для нагрева и поддержания заданной температуры в ходе пластической деформации дает возможность значительно повысить предельные степени деформации за один ход машины при обработке труднодеформируемых сплавов на основе титана и никеля, а также снизить нагрузку на инструмент путем уменьшения напряжения течения и, соответственно, силы деформирования благодаря созданию условий деформирования, близких к изотермическим, и проявлению эффекта электропластичности, обусловленного электронно-дислокационным взаимодействием.

Заготовки, полученные штамповкой с одновременным электроконтактным нагревом, отличаются мелкозернистой равномерной структурой и высокими механическими свойствами.

Совмещение процессов электроконтактного нагрева (ЭКН) и деформирования позволяет значительно повысить культуру производства в кузнечно-штамповочных цехах. Для этого кузнечно-штамповочное оборудование необходимо оснастить понижающим электротрансформатором соответствующей мощности и токоподводящими шинами. Вопрос подвода электрического тока к нагреваемой заготовке решается отдельно в каждом конкретном случае. В табл. 4.11 приведены возможные схемы технологических процессов пластической деформации с одновременным электроконтактным нагревом заготовок.

На рис. 4.16 приведена структурная схема системы автоматического регулирования температуры в процессе пластической деформации при осадке заготовки в плоских бойках. Она разработана на базе стандартных блоков, выпускаемых отечественной промышленностью, и включает в себя задающее устройство (ЗУ), блок формирования закона регулирования (БФЗ), в состав которого входят блок управления, регулятор, блок индикации рассогласования и усилитель постоянного тока. Система регулирования температуры работает в наладочном и автоматическом режимах, позволяя изменять закон регулирования температуры и его параметры.

Система функционирует следующим образом: фотодатчик ФД регистрирует инфракрасное излучение заготовки, пропорциональное его температуре, сигнал с фотодатчика усиливается усилителем постоянного тока У и поступает в устройство для сравнения, где сравнивается с опорным сигналом ЗУ, являющимся аналогом заданной

4.9. Параметры основных типов установок для электроконтактного нагрева

| Параметр                         | Тип нагревательной установки |              |           |           |             |
|----------------------------------|------------------------------|--------------|-----------|-----------|-------------|
|                                  | HO24                         | 2786         | HO56      | HO10      | 2839        |
| Число:                           |                              |              |           |           |             |
| нагревательных позиций           | 2                            |              | 2 (1)     | 2         | 4           |
| нагреваемых зон на заготовке     |                              | 1            |           |           | 1           |
| Поперечные размеры заготовок, мм | Ø 12...30                    | 70×(20...30) | Ø 12...30 | Ø 10...60 | 60...70     |
| Длина нагревательной зоны, мм    | 110...750                    | 1400...800   | 155...750 | 200...500 | 500...600   |
| Общая длина заготовки, мм        |                              |              | —         |           | 2100...3700 |
| Напряжение, В                    |                              |              | 380       |           | 3700        |
| Мощность, кВт                    | 150                          | 250          | 125       |           | 250         |
| Сила контактного зажима, Н       | 19                           | 30           | 18        | 31        | 20          |
|                                  |                              |              |           |           | 5           |

Продолжение табл. 4.9

| Параметр                                                         | Тип нагревательной установки |                |                |                |                |                |
|------------------------------------------------------------------|------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|                                                                  | НО24                         | 2786           | НО56           | НО10           | 2839           | 2800           |
| Охлаждение                                                       | Водой                        |                |                |                |                |                |
| Высота нагревательной позиции от пола, мм                        | 800                          | 1203           | 955            | 850            | 1150           | 1100           |
| Габаритные размеры (высота×ширина×длина), мм                     | 1650×1200×2400               | 1363×1000×1710 | 3600×1400×1665 | 1280×3680×5200 | 1300×2300×2455 | 1450×2450×5000 |
| Масса установки, т                                               | 2                            |                | 20,5           | 3              |                |                |
| Параметр                                                         | Тип нагревательной установки |                |                |                |                |                |
|                                                                  | 2921                         | 2915           | 2850           | НО35           | ЭУ150          |                |
| Число:<br>нагревательных позиций<br>нагреваемых зон на заготовке | 44                           | 4              |                |                |                | 1 (2)          |
|                                                                  | 1                            |                |                |                |                |                |



Окончание табл. 4.9

|                                              |                |                |                |                |                |
|----------------------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Поперечные размеры заготовок, мм             | Ø 70...75      | Ø 40...120     | 30...70        | Ø 14...20      | Ø 40...50      |
| Длина нагревательной зоны, мм                | 1300...1500    | 3000...8000    | 320            | 1500...4000    | 300...800      |
| Общая длина заготовки, мм                    | 1500           | 8000           | 615            | 4000           | 800            |
| Напряжение, В                                | 380            |                |                |                |                |
| Мощность, кВт                                | 500            |                | 250            | 400            | 150/250*       |
| Сила контактного зажима, Н                   | 13,5           | 20             |                | 10             | 20/40          |
| Охлаждение                                   | Водой          |                |                |                |                |
| Высота нагревательной позиции от пола, мм    | 1070           | 1325           | 100            |                | 1125           |
| Габаритные размеры (высота×ширина×длина), мм | 2200×2680×3110 | 2500×2000×1075 | 1450×1900×1900 | 1650×2500×7800 | 1900×1190×1900 |
| Масса установки, т                           | 11             | 13             | 3              | 11             | —              |

\* Мощности установок, выпускаемых в двух вариантах: 150 или 250 кВт.

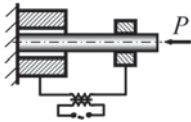
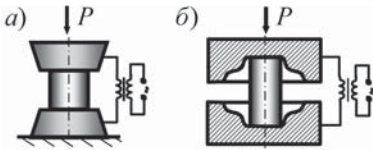
**4.10. Технические характеристики основных типов трансформаторов для установок электроконтактного нагрева**

| Мощность, кВт | Масса, кг | Габаритные размеры, мм | Напряжение, В |            |
|---------------|-----------|------------------------|---------------|------------|
|               |           |                        | первичное     | вторичное  |
| 35            | 332       | 500×650×450            | 380           | 7...13     |
| 70            | 430       | 660×503×510            |               | 3...6      |
| 95            | 630       | 640×560×720            |               | 5,0...47,5 |
| 150           | 1122      | 590×660×735            |               | 8...16     |
| 250           | 1450      | 800×655×1125           |               |            |
| 500           | 1100      | 700×880×900            |               | 31...62    |

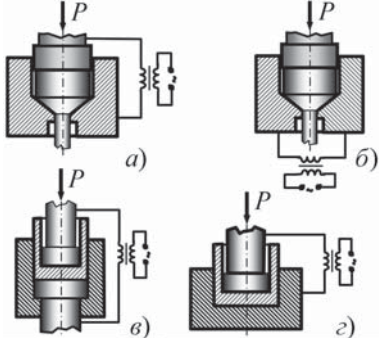
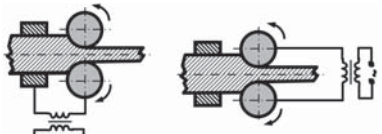
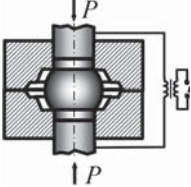
температуры. Сигнал рассогласования из блока сравнения поступает в БФЗ, в котором происходит усиление сигнала, его дифференцирование, или интегрирование, или и то и другое одновременно. Затем сформированный БФЗ управляющий сигнал подается на вход регулятора напряжения РН, который управляет силовым трансформатором.

Таким образом, создается обратная связь, позволяющая поддерживать заданную температуру нагрева заготовки постоянной или переменной по определенному закону в процессе деформирования по объему заготовки.

**4.11. Некоторые технологические схемы совмещения ЭКН с процессами пластической деформации металлов**

| Технологический процесс                                           | Схемы совмещения ЭКН с процессами наработки металлов давлением                      |
|-------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Электровысадка                                                    |  |
| Осадка: <i>а</i> — плоскими бойками; <i>б</i> — в фигурных бойках |  |

Окончание табл. 4.11

| Технологический процесс                                                                                         | Схемы совмещения ЭКН с процессами наработки металлов давлением                     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| Выдавливание: <i>a</i> – прямое;<br><i>б</i> – прямое в разъемных матри-<br>цах; <i>в</i> , <i>г</i> – обратное |  |
| Вальцовка                                                                                                       |  |
| Закрыва́тая штамповка деталей сложной формы                                                                     |  |

Электроконтактный нагрев может быть использован и при листовой штамповке для интенсификации процессов вытяжки, отбортовки, раздачи и других операций в случае наперед заданного распределения температуры по площади или объему заготовки, а также в процессах деформирования трубных, прутковых и полосовых заготовок.

Электронагрев в печах с жидким теплоносителем позволяет осуществлять быстрый и равномерный нагрев и охлаждение заготовок как из черных, так и из цветных металлов под различные операции их горячей пластической деформации. В качестве теплоносителей используют различные соли, расплавы щелочей и некоторые масла. Так, например, для нагрева заготовок в интервале температур 950...1300 °С используют смесь из 90 %  $\text{BaCl}_2$  и 10 %  $\text{NaCl}$ . Нагрев в интервале температур 700...1060 °С проводят в смесях следующего состава:  $\text{BaCl}_2 + \text{KCl} + \text{NaCl}$ .

Печи с жидкими теплоносителями классифицируют по ряду признаков: по виду жидкого теплоносителя (соляные, селитровые, щелочные и масляные); способу нагрева жидкости (ванны прямого и наружного нагрева); по температуре рабочего пространства (низкотемпературные ванны – до 650 °С; среднетемпературные – до 850 °С; высокотемпературные – до 1300 °С).

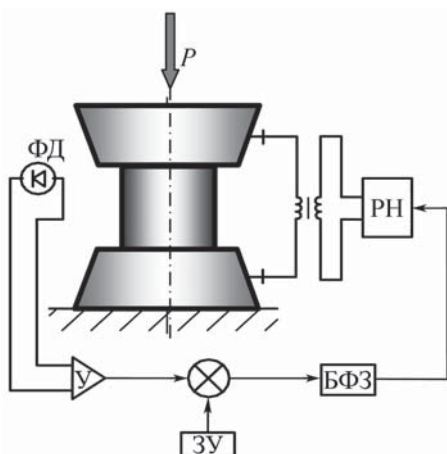


**Рис. 4.16. Структурная схема регулирования температуры в процессе пластической деформации:**

ФД – фотодатчик; У – усилитель; ЗУ – задающее устройство; БФЗ – блок формирования закона регулирования; РН – регулятор напряжения

В электродных соляных ваннах электрический ток подводят к расплавленной соли электродами, погруженными в соль. Соль нагревается при прохождении электрического тока от электрода к электроду. Питание осуществляется от сети переменного тока напряжением 220 или 380 В через понижающие трансформаторы. Рабочее напряжение на электродах обычно составляет 10...20 В.

Электроды изготавливают из низкоуглеродистых сталей. Футеровку ванн часто выполняют двухслойной: внутренний слой из огнеупорного, а наружный – из теплоизоляционных материалов. Снаружи футеровка заключается в металлический сварной кожух. Иногда с целью интенсификации нагрева ванны снабжают специальными мешалками. Перемешивание также осуществляют с помощью нагнетания под давлением через расплав воздуха или иных газов (барботирование).

Окалина, попавшая в ванну с электродов или заготовок, может окислять и обезуглежировать нагреваемые заготовки. Для устранения этого расплав периодически раскисляют. Состав раскислителей зависит от состава ванны. В частности, для раскисления ванн из хлористого бария ( $\text{BaCl}$ ) используют смесь из буры, кварцевого песка и ферросилиция. Эксплуатация ванны требует соблюдения мер по технике безопасности, исключающих попадание в ванну влаги.

На рис. 4.17 приведены распространенные схемы соляных ванн.

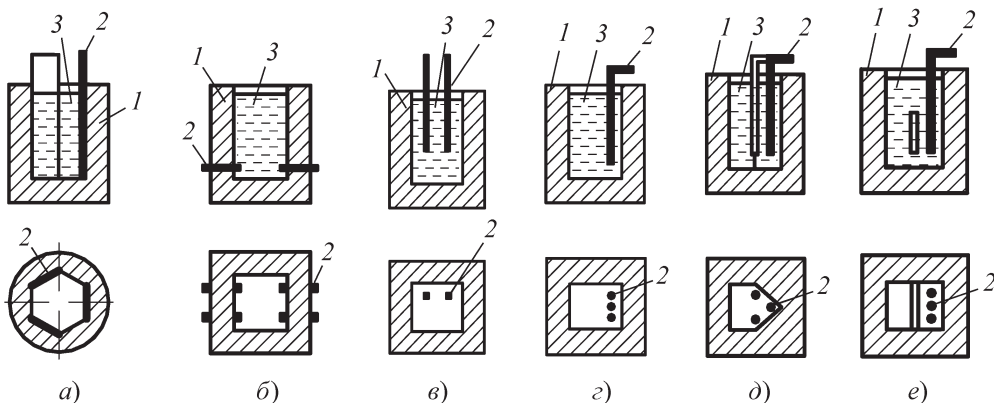


**Рис. 4.17. Конструктивные схемы соляных ванн:**

1 – футеровка; 2 – электроды; 3 – расплав соли. Питание в ваннах осуществляется:

б и в – двухфазным током; а, з, д, е – трехфазным током

4.12. Параметры электродно-соляных нагревательных печей-ванн

| Параметр ванны                                  | Тип печи-ванны |               |                  |                |                  |
|-------------------------------------------------|----------------|---------------|------------------|----------------|------------------|
|                                                 | СВС-2,3/13-И1  | СВС-2,5/13-И1 | СВГ-1,5,2/8,5-И2 | СВГ-2,5,3,5-И2 | СВГ-3,5,4/8,5-И2 |
| Установленная мощность, кВт                     | 100            | 137           | 12               | 22             | 34               |
| Номинальная температура, °С                     | 1300           |               | 850              |                |                  |
| Число фаз                                       | 3              |               | 1                | 2              | 3                |
| Максимальный объем расплавленной соли, л        | 70             | 120           | 11               | 35             | 75               |
| Мощность холостого хода, кВт                    | 60             | 62            | 4                | 5,1            | 6                |
| Масса, т:<br>футеровки<br>электрованны без соли | 1,14           | 1,47          | 0,385            | 0,53           | 0,86             |
|                                                 | 3,10           | 3,45          | 0,86             | 1,08           | 1,56             |
| Масса садки, кг                                 | —              |               | 10               | 28             | 65               |



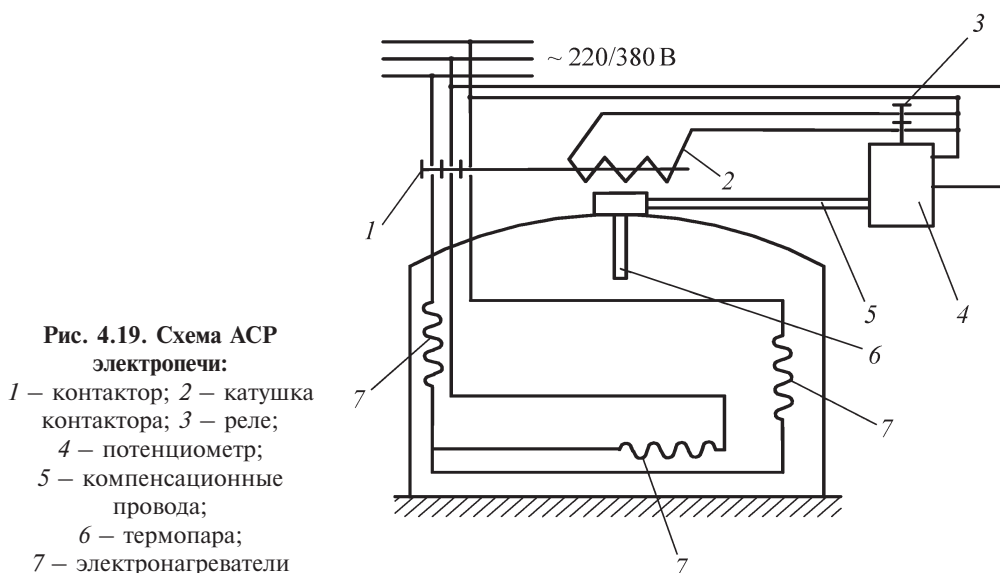
Командный сигнал и управляющее воздействие могут быть дискретными или непрерывными. РУ бывают как прямого, так и косвенного действия.

РУ прямого действия используют непосредственно для перемещения регулирующего органа (РО), например регулирующего давление природного газа в печи. РУ косвенного действия предназначено для управления подводом энергии (электрической, пневматической, гидравлической) к ИМ. ИМ — это элемент, приводящий в действие РО. Регулирующие органы (дроссели, шиберы, магнитные пускатели и автотрансформаторы) непосредственно влияют на поток вещества или энергии, вводимые в объект регулирования (печь). Качество нагрева в газовых пламенных и электрических печах небольшого размера в значительной степени зависит от одного параметра: температуры рабочего пространства.

Кроме того, давление природного газа стабилизируют в газораспределительных пунктах или на станциях. Поэтому широко распространены одноконтурные АСР, управляющие одним параметром работы печи. По расходу топлива или электроэнергии печи в этом случае работают в двух режимах: с минимальным или максимальным расходом газа или электроэнергии. При этом точность регулирования температуры печи находится в диапазоне  $\pm 10^\circ\text{C}$ .

На рис. 4.19 приведена схема АСР рабочей температуры электропечи, содержащая контактор 1, включающий и выключающий электронагреватели 7. Температура в печи измеряется термопарой 6, термоЭДС (ТЭДС) от которой через компенсационные провода 5 подается в электронный потенциометр 4. Здесь ТЭДС усиливается специальными термоусилителями по напряжению и мощности. При температуре печи выше заданной приводятся во вращение кулачки и валики регулирующей вставки, в результате чего автоматически, с помощью реле 3, отключается питающее напряжение катушки контактора 2.

Под действием пружины сердечник электромагнита возвращается в исходное положение и размыкает контакты питающей сети электронагревателей. Печь начинает



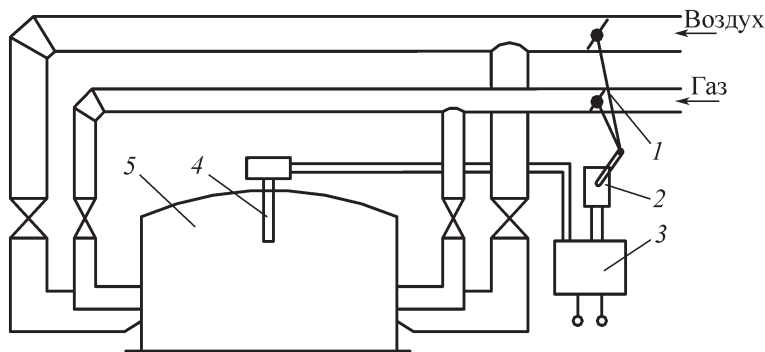


Рис. 4.20. Схема АСР газовой печи:

1 – тяга; 2 – исполнительный механизм; 3 – потенциометр; 4 – термопара; 5 – свод печи

остывать и при достижении минимального значения температуры регулирующая вставка включает питание катушки контактора и сердечник, который, в свою очередь, включает питающую сеть. Температура печи начинает возрастать до заданного значения, при возрастании температуры выше заданной система вновь срабатывает на отключение печи от электросети. Такая система регулирования работает по принципу "включено–выключено" и называется *двухпозиционной*.

Двухпозиционное регулирование используют и для управления температурой пламенных печей (рис. 4.20). Через свод печи 5 в рабочее пространство введена термопара 4, ТЭДС от которой попадает в электронный потенциометр 3.

Сигнал разбаланса потенциометра подается в электрический исполнительный механизм 2, который тягами 1 одновременно изменяет положение газовой и воздушной дроссельных заслонок.

В современных разрабатываемых АСР используются микроЭВМ или микропроцессоры. Микропроцессор – это большая интегральная схема с программируемой логикой. Программы, по которым должен работать микропроцессор, хранятся в имеющемся запоминающем устройстве.

Регулирующие микропроцессоры (контроллеры) – ремиконты являются новым классом устройств для решения задач автоматического управления. Типичный представитель этого типа устройств – ремиконт Р-100 многоцелевого общепромышленного назначения, используемый для автоматического регулирования технологических процессов в различных отраслях промышленности (металлургии, химии и т.д.).

Ремиконт (регулирующий микропроцессорный контроллер) – программное устройство, которое настраивается на решение требуемой задачи непосредственно на объекте. Для микроЭВМ необходимо создавать управляющие программы и т.д., для микропроцессора программирования не требуется. Он с завода-изготовителя поставляется готовым к работе.

Ремиконт Р-100 имеет устройство регулирования процессов, постоянную и оперативную память, устройства ввода-вывода информации, а также связи с оператором. Средства ввода-вывода представляют собой преобразователи сигналов датчи-



ков в цифровую форму. Выводы ремиконта соединяются с исполнительными механизмами, клапанами, реле и т.д.

В постоянной памяти прибора находится программа из 25 наиболее применяемых в практике автоматического регулирования алгоритмов. Это позволяет, например, с помощью одного ремиконта регулировать температуру, давления в печи, соотношения топливо/воздух и др. Каналы работают не только автономно, между ними можно устанавливать разнообразные связи, создавая многосвязную структуру регулирования.

Примером многосвязной системы регулирования может служить система регулирования температуры в пламенной печи. При изменении температуры возникает необходимость изменения расхода топлива и разрежения под сводом печи. Ремиконт имеет систему самодиагностики на трех уровнях: аппаратном, программном и алгоритмическом. Первая система контролирует исправность источников питания, вторая проверяет сохранность настроек, установленных оператором, третья диагностирует выход сигналов за пределы настройки. Ремиконт может быть соединен с дисплеем, что позволяет видеть на экране информацию о текущих параметрах регулирования и изменять их.

Подобные микропроцессоры можно устанавливать и в оборудование для пластической деформации (например, в систему управления гидравлическим прессом), что дает возможность в зависимости от сопротивления деформирования регулировать скорость деформации, и наоборот.

## Глава 5

# ТЕМПЕРАТУРНЫЕ РЕЖИМЫ КОВКИ И ШТАМПОВКИ

---

---

### 5.1. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

Процессыковки и штамповки металлов выполняют с нагревом заготовок в определенном температурном интервале. Нагрев металла перед обработкой давлением предназначен для изменения его механических свойств: повышения пластических характеристик и снижения сопротивления деформированию. В результате нагрева сопротивление металла пластическому деформированию снижается в 10...20 раз по сравнению с холодной обработкой. При этом удается почти полностью ликвидировать его упругие свойства, осуществить перекристаллизацию металла и ускорить диффузионные и релаксационные процессы, которые нейтрализуют возникающие при горячем деформировании напряжения путем возврата и рекристаллизации.

При нагреве изменяются не только структура, механические свойства и технологическая пластичность металлов и сплавов, но и их физические свойства: теплоемкость, тепло- и электропроводность, магнитные свойства.

Температуру нагрева для каждого металла и сплава перед ковкой и штамповкой назначают в зависимости от их химического состава, требований к механическим свойствам металла поковок и режимов последующей термической обработки.

Диапазон температуры, в котором металл обладает наибольшей технологической пластичностью и минимальным сопротивлением деформированию, называют температурным интерваломковки и штамповки. Его устанавливают в результате комплекса лабораторных испытаний (испытания на пластичность осадкой, кручением и ударным изгибом; определения сопротивления деформированию; установлением критической температуры роста зерна и др.), а также по диаграммам состояния исследуемых металлов или сплавов, представляющих собой графическое изображение фазового состава и структуры сплавов в зависимости от температуры и концентрации компонентов. Например, стали в зависимости от температуры и концентрации углерода имеют в твердом состоянии следующие структурные составляющие.

Аустенит — твердый раствор углерода в  $\gamma$ -железе ( $\gamma$ -железо — существует при температурах 911...1392 °С, имеет гранецентрированную кубическую решетку, немагнитно). Твердым раствором называют однородное твердое тело, компоненты (химические элементы) которого обнаруживаются специальным анализом и неразличимы под микроскопом. Предельная концентрация углерода в аустените, равная 2,14 %, соответствует температуре 1145 °С. При снижении температуры до 723 °С концентрация углерода в аустените уменьшается до 0,8 %. Стали с аустенитной структурой немагнитны, обладают высокой пластичностью и вязкостью.

Феррит — твердый раствор углерода в  $\alpha$ -железе ( $\alpha$ -железо имеет объемно-центрированную кубическую решетку, существует в интервале температур 1392...1539 °С, затем при охлаждении превращается в  $\gamma$ -железо и, начиная с 768 °С, вновь имеет объемно-центрированную кубическую решетку. Магнитно-предельная концентрация углерода в  $\alpha$ -железе наблюдается при температуре 723 °С и составля-

ет 0,02 % С. При комнатных температурах феррит имеет сравнительно низкие показатели твердости (80НВ) и прочности ( $\sigma_{\text{в}} = 250$  МПа) и высокую пластичность ( $\delta = 50$  %).

**Цементит** — химическое соединение железа с углеродом ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ), содержание углерода в котором равно 6,67 %. Кристаллическая решетка химического соединения и его свойства резко отличаются от решеток и свойств образующих его компонентов. Механические свойства цементита при комнатных температурах:  $\sigma_{\text{в}} = 40$  МПа,  $\delta = 0$  %, 800НВ.

**Перлит** — механическая смесь феррита и цементита, образующаяся при эвтектоидном распаде медленноохлаждаемого аустенита с концентрацией 0,8 % С. Перлит характеризуется высокими показателями прочности и твердости:  $\sigma_{\text{в}} = 750$  МПа, 200НВ.

Изменение пластичности и сопротивление деформированию стали в зависимости от температуры можно объяснить фазовыми превращениями, происходящими в металле. Под фазой понимают однородную часть системы, например сами компоненты и их растворы. Агрегатное состояние фаз может быть твердым, жидким, газообразным.

## 5.2. ДИАГРАММА СОСТОЯНИЯ ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫХ СПЛАВОВ

Структуру и температуру фазовых превращений стали при различных температурах удобно определять по диаграмме состояния. На рис. 5.1 показан участок диаграммы состояния железо—углерод для стали. Каждой точке диаграммы соответствует свой состав стали и определенная температура. Эта диаграмма имеет исключительно важное значение для обоснованного выбора тепловых режимов всех видов горячей обработки давлением, в том числе и термической обработки стали.

Линия *АС* называется линией ликвидуса. Выше этой линии сплав находится в жидком состоянии. Линия *АЕ* — линия солидуса, она указывает температуры, соответствующие окончанию первичной кристаллизации сплава. Ниже этой линии сплав находится в твердом состоянии, например с образованием кубической объемно-центрированной кристаллической решетки.

Процесс вторичной кристаллизации сплава в твердом состоянии (например, трансформирование объемно-центрированной кристаллической решетки в объемно-центрированную кубическую решетку) заканчивается на линии *PSK*, называемой эвтектоидной линией, или линией нижних критических точек *A<sub>1</sub>*. Критическими точками называют температуры, при которых в стали происходят структурные превращения в твердом состоянии.

Начало процесса вторичной кристаллизации сплава из твердого раствора аустенита определяется линией *GSE*. Линия *GS* показывает температуру начала выделения феррита из аустенита. Ее называют также линией верхних критических точек *A<sub>3</sub>*. Линия *SE* соответствует температуре начала выделения вторичного цементита и предельной растворимости углерода в аустените. Ее именуют также линией верхних критических точек *A<sub>m</sub>*. Критические точки при охлаждении обозначают *Ag*, а при нагревании — *Ac*.

Области существования твердых и жидких фаз, а также различных структурных составляющих со схематическим изображением микроструктур стали приведены на диаграмме (рис. 5.1). По диаграмме сталь с содержанием 0,83 % углерода называют

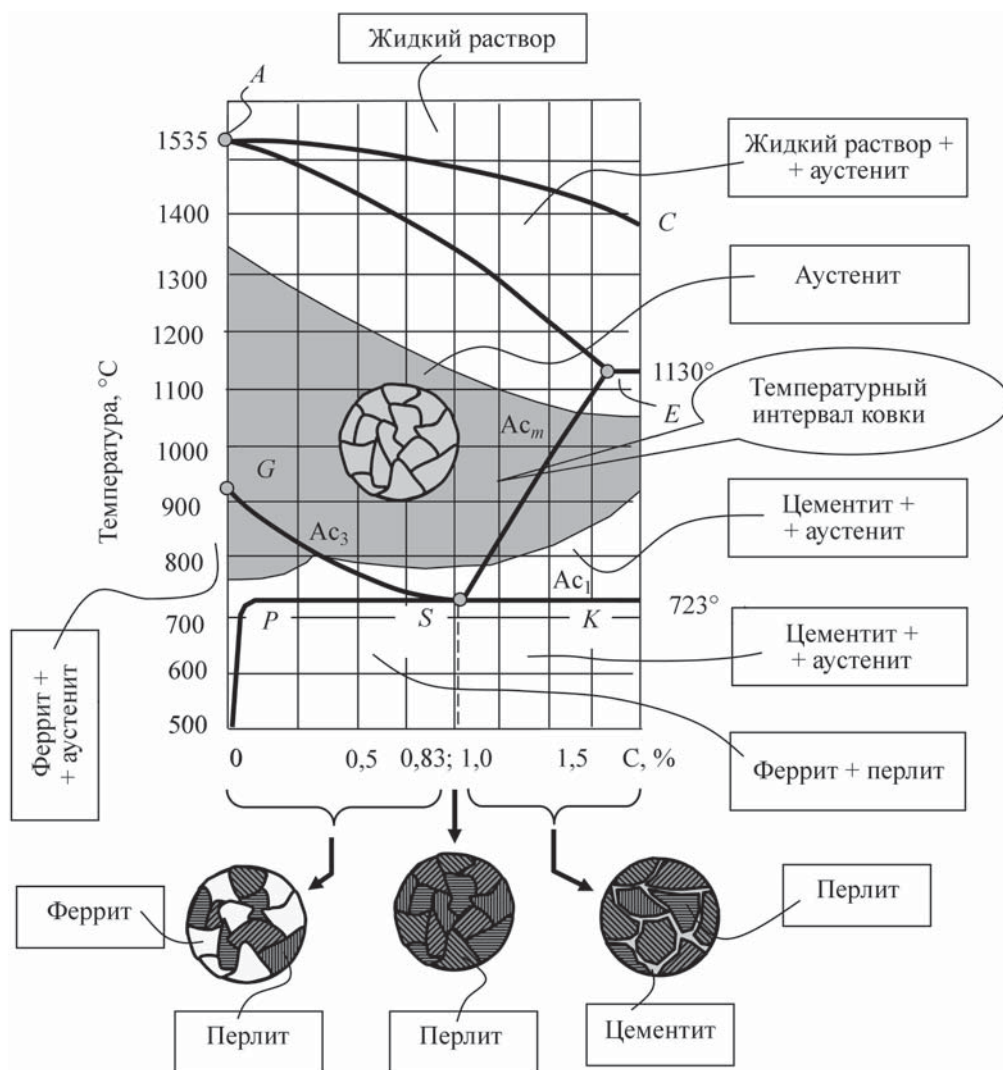


Рис. 5.1. Часть диаграммы состояния железоуглеродистых сталей и температурные интервалыковки и штамповки

эвтектоидной, она имеет перлитную структуру. Сталь с содержанием до 0,83 % углерода именуют доэвтектоидной, ее структура состоит из феррита и перлита. Заэвтектоидная сталь содержит > 0,83 % углерода, и ее структура содержит перлит и вторичный цементит.

Наиболее пластичной структурой является структура аустенита. При наличии двухфазной структуры в сплаве его пластичность снижается. У низкоуглеродистых и углеродистых сталей при температуре 1100...1200 °С структура только аустенитная. Из-за высокой пластичности температуру 1200 °С принимают как верхний предел

температурного интервалаковки для углеродистой стали. У высокоуглеродистой стали при температуре 1100 °С структура двухфазная: аустенит + цементит, причем последний образует хрупкую сетку по границам зерен.

Для повышения пластичности стали необходимо эту цементитную сетку раздробить для того, чтобы цементит образовал отдельные зерна в металле заготовки. При этом твердость и прочность металла остаются высокими. Верхний предел температурковки для высокоуглеродистой стали целесообразно принять равным ~1100 °С. При этом ковку надо проводить с предосторожностями, учитывая, что пластичность понижена ввиду двухфазной структуры.

По диаграмме состояния можно также выбрать нижний предел температурковки, который должен лежать выше температур фазовых превращений. Следует отметить, что низкоуглеродистые стали можно ковать и при структурах феррит+аустенит благодаря достаточно высокой пластичности.

Заэвтектоидные стали имеют нижний предел температурковки в зоне аустенит+цементит. Эта температура должна быть по возможности более низкой, чтобы предотвратить образование цементитной сетки.

Максимальный интервал ковочных температур с увеличением в стали легирующих элементов становится более узким. Если для углеродистых сталей он составляет ~500...600 °С, то для конструкционных легированных сталей ~330 °С, для тепло-, кислото-, а также коррозионно-стойких сталей ~260 °С, для жаропрочных сталей ~200 °С, а для жаропрочных сплавов ~150 °С.

При установлении нижнего предела температурковки необходимо учитывать массу поковки, наличие или отсутствие последующей термической обработки, способ охлаждения.

### 5.3. ВЛИЯНИЕ НАГРЕВА НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТАЛИ

С повышением температуры нагрева металла увеличивается подвижность его атомов, вызывающая протекание ряда сложных физико-химических процессов. Динамика и характер изменения некоторых механических свойств материала в зависимости от температуры нагрева на примере низкоуглеродистой стали приведены на рис. 5.2, из которого видно, что с повышением температуры в районе 200...300 °С прочность металла увеличивается с одновременным уменьшением пластичности. Это зона синеломкости. При дальнейшем повышении температуры прочность металла, а следовательно, и сопротивление деформированию непрерывно уменьшаются. При этом рост пластичности металла в интервале температур 700...800 °С вновь снижается. Это объясняется структурными превращениями, во время которых металл состоит из двух разнородных структур, характеризующихся неодинаковыми механическими свойствами.

При нагреве металла выше температур 1100...1200 °С резко возрастают скорость роста и размер аустенитных зерен, которые становятся тем больше, чем длительнее выдержка при нагреве. Это явление называют *перегревом*, а сам металл с излишне крупными зернами — *перегретым*. Температуру, после которой начинают интенсивный рост зерна стали и ее перегрев, называют критической. Она составляет для углеродистой стали с содержанием углерода до 0,4 % 1300 °С и >0,4 %

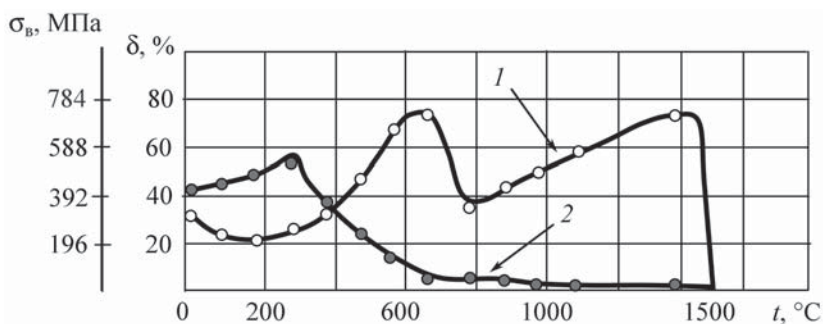


**Рис. 5.2.** Изменение механических свойств низкоуглеродистой стали при нагреве:  
 1 — относительного удлинения  $\delta$ ; 2 — предела прочности  $\sigma_b$

углерода 1150 °C. Металл с перегретой структурой отмечается пониженными пластическими свойствами, при его ковке возможно образование трещин, а послековки изделие будет иметь пониженные механические свойства. Перегрев является браком нагрева металла. В большинстве случаев его исправляют последующей термообработкой (отжигом).

При нагреве до температур, несколько меньших температуры плавления [кривая *AE* на диаграмме железо—углерод (см. рис. 5.1)], наблюдается резкое снижение пластичности, являющееся результатом значительного роста зерен и последующего *п е р е ж о г а* металла, характеризуемого окислением границ зерен. Образующиеся по границам зерен оксиды имеют более низкую температуру плавления, чем зерна металла, границы зерен начинают оплавляться, и наступает полная потеря пластичности нагреваемого металла. Пережог — неустранимый брак, ликвидируемый только переплавкой металла. Температура пережога для некоторых марок углеродистых сталей составляет: для сталей 20; 45; У8 и У12 соответственно > 1350; 1350; 1200 и 1200 °C.

При недостаточном времени нагрева металл не успевает равномерно прогреться по всему сечению и имеет более низкую пластичность в центральной зоне заготовки. Деформация недогретого металла приводит к возникновению значительных внутренних напряжений и при обработке заготовки ковкой или штамповкой может привести к образованию трещин в осевой зоне заготовки.

#### 5.4. О РЕЖИМЕ НАГРЕВА ЗАГОТОВОК ДЛЯ КОВКИ И ШТАМПОВКИ

Режим нагрева заготовок определяет условия, необходимые для изготовления высококачественных поковок или штамповок. Он включает в себя следующие основные параметры: температуру печи при загрузке заготовок, скорость или длительность нагрева металла, конечную температуру нагрева, время выдержки при заданной температуре, общую продолжительность нагрева. Определяющими при выборе режима нагрева являются химический состав металла и размеры нагреваемых заготовок.

Температуру рабочего пространства печи устанавливают в зависимости от марки стали, размеров и формы нагреваемых заготовок. Подавляющее большинство заготовок из конструкционных сталей, имеющих диаметр или сторону квадрата до 100 мм,

загружают в печь при температуре 1200...1300 °С. Для обеспечения максимальной производительности штамповочного агрегата (молота, прессы и т.п.), минимальных потерь металла в угар и на образование окалины, а также достаточно высокой температуры начала штамповки, нагрев металла выполняют с максимально допустимой скоростью нагрева (температурным напором). Скорость нагрева определяется увеличением температуры металла заготовки в градусах Цельсия за единицу времени, например, за минуту или час. Она зависит прежде всего от температуры рабочего пространства печи, теплопроводности металла, его теплоемкости, плотности, а также площади сечения заготовок и способа расположения заготовок в печи.

**Теплопроводность** — это способность вещества проводить теплоту от более нагретых частей к менее нагретым. Коэффициент теплопроводности показывает, какое количество теплоты (джоулей) проходит в 1 ч через 1 см<sup>2</sup> сечения тела при разности температуры в 1 К на расстоянии 1 м. Чистое железо имеет коэффициент теплопроводности  $\lambda = 86$  Вт/(м·К), легированная сталь 3Х2В8Ф — коэффициент  $\lambda = 10,6$  Вт/(м·К).

Величина теплопроводности при нагреве металла важна для установления технологических параметров процессов нагрева заготовок. Металлы и сплавы, обладающие высокой теплопроводностью, можно нагревать с большей скоростью, так как теплота с поверхности заготовок, получаемая от нагревательного устройства, будет передаваться к сердцевине металла интенсивно и вся заготовка прогреется достаточно быстро.

**Теплоемкость** — количество теплоты, поглощаемой телом при нагревании на 1 К, теплоемкость металла зависит от его химического состава и температуры. Чем выше теплоемкость металла, тем больше требуется времени для выравнивания температуры по сечению нагреваемой заготовки. С возрастанием температуры теплоемкость углеродистых сталей увеличивается. Легированные добавки в стали или сплаве уменьшают теплопроводность. Это обстоятельство влияет на время нагрева заготовок. Например, время выдержки заготовки в печи с момента приобретения металлом температуры штамповки или ковки рекомендуется принимать из следующего расчета.

1. **Для конструкционных легированных сталей:** 1 мин на каждые 4 мм диаметра (толщины) заготовки. (Максимальное время пребывания в печи при температуре штамповки заготовок диаметром или стороной квадрата до 250 мм не должно превышать 1...2,5 ч.)

2. **Для теплоустойчивых, кислото- и коррозионно-стойких сталей:** 1 мин на каждые 3 мм диаметра заготовки. (Максимальное время пребывания в печи при температуре штамповки заготовок диаметром или стороной квадрата до 250 мм не должно превышать 1...2,5 ч.)

3. Нагревать заготовки **из жаропрочных сталей и сплавов** при температуре нагрева до 800...900 °С следует медленней, чем заготовки из обычных конструкционных сталей. Начиная с 800 °С, нагрев может быть ускорен. Общее время нагрева должно быть увеличено в 2–3 раза по сравнению с конструкционными сталями.

4. Для равномерного прогрева (выдержки) **титановых сплавов** по сечению требуется ~ 40 с на 1 мм диаметра (толщины) заготовки при температуре  $\geq 1000$  °С и 60 с на 1 мм диаметра (толщины) заготовки при более низких температурах.

5. **Для алюминиевых сплавов:** 1...1,2 мин на 1 мм диаметра (толщины) при диаметре (толщине) нагреваемых заготовок до 100 мм и при толщине  $> 100$  мм — из расчета 0,8...1,0 мин на 1 мм толщины.



Теплоемкость металла в зависимости от температуры нагрева меняется незначительно.

Плотностью вещества называют массу, приходящуюся на единицу его объема. Плотность металлов существенно влияет на процесс нагрева. С ее повышением время для выравнивания температуры по сечению заготовки увеличивается.

Общим является то, что чем выше температура в печи, теплопроводность стали и меньше сечение нагреваемых заготовок и плотность их укладки на поду печи, тем выше скорость нагрева и меньше его продолжительность. Вместе с этим уменьшаются угар металла и обезуглероживание поверхности заготовки.

При чрезмерно большой скорости нагрева по сечению заготовки возникает большая разность температур (температурный градиент). Поверхность заготовки нагревается быстрее и до значительно более высоких температур, чем ее сердцевина. При этом в отдельных случаях (особенно в начальный период нагрева) в заготовке могут возникнуть значительные термические напряжения, уровень которых достигнет предела прочности стали, и образоваться трещины. Поэтому различают технически возможную скорость нагрева (определяется возможностями применяемого нагревательного оборудования) и допускаемую скорость, обусловливаемую допускаемыми термическими напряжениями и уровнем пластичности нагреваемого металла.

### 5.5. ОХЛАЖДЕНИЕ ПОКОВОК И ШТАМПОВОК

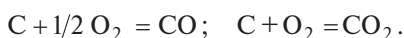
Процесс охлаждения поковок или штамповок по своей сути является термической операцией. Образование трещин при охлаждении встречается более часто, чем при нагреве. Для предотвращения трещинообразования, уменьшения остаточных напряжений поковки охлаждают по специальному режиму, который в основном определяется в зависимости от химического состава стали и габаритных размеров поковок. Общим является то, что скорость охлаждения поковок не должна превышать определенных значений. Традиционно поковки из среднеуглеродистой стали охлаждают на воздухе в одиночку или на стеллажах; поковки из легированных сталей и сплавов — в штабелях и в зависимости от габаритных размеров, в печах по специальному режиму.

Применяемые способы охлаждения поковок следующие: на воздухе, в малотеплопроводных материалах (песке, чугунной стружке, шлаке, шлаковой вате, гравии и т.п.), в термостатах, неотапливаемых и подогреваемых колодцах, печах различной конструкции.

### 5.6. НЕДОСТАТКИ ПРОЦЕССОВ НАГРЕВА И ГОРЯЧЕГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ МЕТАЛЛОВ

Кроме отмеченных выше нежелательных явлений перегрева, недогрева и пережога металла, возникающих при нарушении длительности и границ температурного интервала нагрева заготовок под ковку и штамповку, нагрев сталей сопровождают такие процессы, как обезуглероживание и окалинообразование.

Обезуглероживание поверхностного слоя стали при нагреве — это следствие избирательного окисления углерода стали кислородом, находящимся в печи:





При обезуглероживании из поверхностных слоев стали выгорает углерод и тем больше, чем меньше его содержание в стали (в высокоуглеродистых сталях диффузия углерода из более глубоких слоев в поверхностные частично восполняет потерю).

Процесс обезуглероживания обнаруживается при температурах нагрева 800...850 °С и резко замедляется после появления на металле окалины. Обеднение поверхностных слоев стали углеродом в результате обезуглероживания приводит к снижению твердости. (Этим и объясняется необходимость зачистки поверхностного слоя заготовок при измерении твердости.)

О к а л и н а является результатом химического соединения металла с кислородом или его соединениями. Толщина слоя окалины за время нагрева крупных слитков достигает 10...20 мм.

Количество окалины зависит от содержания кислорода или его соединений в печи (чем больше кислорода, тем больше окалины), температуры (чем выше температура, тем больше окалины), времени нагрева (чем значительнее время, тем больше окалины), химического состава металла (чем выше содержание в стали углерода, хрома, никеля, тем меньше окалины), состояния поверхности металла (чем больше на поверхности оксидов, тем меньше окалины).

Если количество окалины на заготовке при нагреве в печи до 900 °С принять за единицу, то при дальнейшем нагреве заготовки до 1300 °С ее количество может увеличиться в 7 раз.

Уменьшение количества кислорода и его соединений в печи и сокращение времени пребывания металла при высоких температурах являются основными мерами по уменьшению количества окалины.

*К основным недостаткам горячего деформирования металлов можно отнести следующие.*

Неоднородность структуры и свойств. Горячедеформированный металл имеет менее однородные свойства по сечению, чем холодноедеформированный и отожженный. Конечный размер зерна горячедеформированного металла никогда не бывает однородным по двум причинам. Во-первых, по сечению металла деформация осуществляется неравномерно, и в поверхностных слоях она всегда наиболее интенсивная. Поэтому здесь возникает более мелкое рекристаллизованное зерно. Во-вторых, при охлаждении температура внутренних слоев всегда выше, чем наружных. Эта температура обычно достаточно высока, чтобы стимулировать рост зерен. Поэтому в горячедеформированном изделии всегда есть разброс величины зерен по сечению: от мелких на поверхности до крупных в центре. В массивных изделиях это различие бывает особенно ярко выражено.

Н и з к о е к а ч е с т в о п о в е р х н о с т и. Большинство металлов при температурах горячей обработки покрываются окалиной. Удаление последней затруднительно и требует затраты средств. После холодной деформации поверхность чище, так как в этом случае поверхностное окисление минимально.

Т р у д н о с т и с о х р а н е н и я т е м п е р а т у р н о г о и н т е р в а л а к о в к и и ш т а м п о в к и. Тонкие листы, прутки малого диаметра и проволока, имеющие высокие показатели отношения площади наружной поверхности к массе, после нагрева охлаждаются настолько быстро, что без специальных мер затруднительно сохранить температурный интервал их горячей обработки. Это обстоятельство требует усложнения условий и принятия дополнительных мер по сохранению температурного интервалаковки и штамповки.

## Глава 6

### КОНТРОЛЬ ТЕМПЕРАТУР ПРИ НАГРЕВЕ МЕТАЛЛА

---

---

Нагрев под пластическую деформацию сплавов и сталей связан с обязательным измерением температуры нагреваемых заготовок. При эксплуатации нагревательных печей также возникает необходимость в контроле температуры. Поэтому организация измерения температуры при нагреве является важной задачей, позволяющей не только иметь информацию о температуре на текущий момент времени, но и управлять ею. Измерение температуры основано на принципах измерения изменений физических параметров или свойств тел при их нагревании (давления, линейного размера, электрического сопротивления, интенсивности излучения).

Приборы для измерения температуры, в основу которых положены описанные принципы, подразделяются на несколько групп:

- 1) жидкостные, стеклянные, стержневые (дилатометрические), биметаллические и монометрические термомпары;
- 2) термометры сопротивления;
- 3) термоэлектрические термометры (термопары);
- 4) термометры излучения.

Не все группы приборов, описанные здесь, одинаково широко используются в печной теплотехнике. Поэтому далее рассмотрим только основные приборы, применяемые для измерения температуры в печи и нагреваемых заготовок.

#### 6.1. КОНТРОЛЬ ТЕМПЕРАТУРЫ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ДАТЧИКАМИ

Сущность измерения температуры термоэлектрическими датчиками (термопарами) состоит в том, что при нагреве проводников (термоэлектродов), изготовленных из различных материалов, в цепи, образованной проводниками, возникает электрический ток. Термоэлектродвижущая сила (ТЭДС), появляющаяся в цепи, пропорциональна температуре спая. Она определяется разностью температур на концах проводников, их химическим составом и не зависит от размеров термоэлектродов (диаметра, длины), теплопроводности и удельного электросопротивления. Эффект термоэлектричества, используемый в термопарах, был открыт в 1821 г. Зеебеком.

Все важнейшие характеристики термоэлектрического датчика (термопары): величина сигнала, чувствительность, диапазон измеряемых температур, ресурс, стабильность и др. — зависят в основном от свойств материалов, образующих чувствительный элемент — термопару. Для изготовления термопары принципиально возможно использование любых пар разных металлов и сплавов, однако целесообразно применять только определенные, так называемые термоэлектродные сплавы, которые получили распространение в измерительной технике.

Одной из главных причин того, что для термопар используются вполне определенные сплавы, является комплекс требований к ним.

1. ТЭДС термоэлектродных сплавов, образующих термопару, должна быть достаточно большой, чтобы ее можно было измерять с необходимой точностью. Она должна быть непрерывной и однозначной функцией от температуры, без экстремумов в

интервале температур, для которого предназначена термопара. Желательно, чтобы эта функция была максимально близка к линейной.

2. Температура плавления термоэлектродных сплавов должна быть больше максимальной рабочей температуры не менее чем на 50...150 °С.

3. Термопарные сплавы должны быть коррозионно-устойчивы в тех средах и при тех температурах, для которых предназначена термопара, изготовленная из них. В большинстве случаев речь идет о стойкости на воздухе, а когда имеют в виду другие среды, то часто оказывается, что наряду с коррозионной стойкостью в этих средах необходимо обеспечить также стойкость и на воздухе. Этому требованию термоэлектродные сплавы не всегда удовлетворяют. Поэтому термоэлектроды термопар стремятся защитить от воздействия внешней среды.

4. Термоэлектродные сплавы должны иметь хорошую воспроизводимость и однородные свойства при их производстве в необходимом количестве.

5. Сплавы для термопар должны в процессе эксплуатации сохранять свою термоэлектрическую характеристику неизменной. Величина нестабильности ТЭДС термопар является критерием их надежности. Желательно, чтобы нестабильность ТЭДС промышленных высокотемпературных термопар не превышала 1 % от измеряемой величины после эксплуатации в течение 1000 ч.

6. Сплавы для термопар должны быть достаточно пластичными, чтобы из них можно было изготовить проволоку, и вместе с тем достаточно прочными. Последнее очень важно для термопар, подвергающихся механическим нагрузкам, особенно переменным.

Термоэлектродная проволока обычно изготавливается диаметром 0,5...3,2 мм. Электроды на рабочем горячем конце скручивают и сваривают электрической дугой. Скрутку размещают в фарфоровый наконечник (рис. 6.1).

Выше скрутки электроды изолируют друг от друга фарфоровыми бусами. Для защиты электродов от механического и химического взаимодействия с окружающей средой их размещают внутри стальной трубки (чехла, кожуха). Сверху чехла находится головка термопары с клеммами и крышкой.

На ТЭДС влияет температура свободного конца. Для уменьшения этого влияния к клеммам термопары подключаются компенсационные провода, которые при температурах 0...100 °С имеют такие же характеристики, как и термопара, что позволяет перенести свободные концы непосредственно к из-

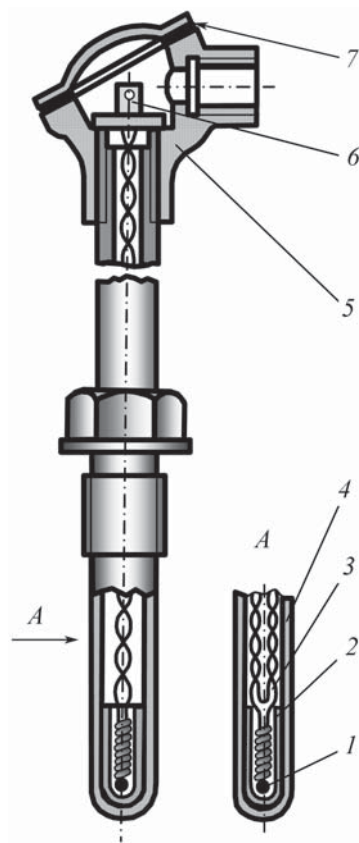


Рис. 6.1. Термоэлектрический термометр:

- 1 — горячий спай;
- 2 — фарфоровый наконечник;
- 3 — фарфоровые бусы; 4 — стальной чехол; 5 — головка термопары; 6 — клеммы термопары; 7 — крышка головки термопары

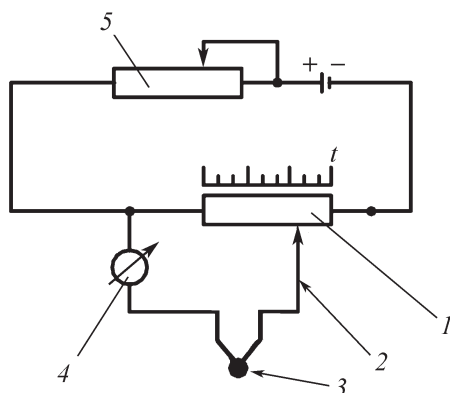


**Рис. 6.2. Электросхема ручного потенциометра:**

- 1 — реохорд; 2 — движок реохорда;  
3 — термопара; 4 — измерительный прибор; 5 — переменное электросопротивление

мерительному прибору. Измерять ТЭДС можно с помощью милливольтметра или потенциометра.

Измерение ТЭДС милливольтметром не учитывает обязательной потери части ТЭДС на сопротивление электродов и компенсационных проводов. Метод измерения потенциометром лишен этого недостатка, так как повышает точность измерения температуры. Он состоит в уравнивании (компенсации) ТЭДС с известным напряжением на калибровочном сопротивлении (реохорде), позволяя в момент измерения иметь в измерительной цепи напряжение, равное нулю. Это исключает погрешности, связанные с влиянием температуры свободных концов и падением напряжения в цепи.

Используемые потенциометры подразделяются на автоматические и ручные. Схема ручного потенциометра приведена на рис. 6.2.

В ручном потенциометре ТЭДС термопары 3 уравнивают падением напряжения батарейки на реохорде 1 при перемещении движка 2. О компенсации токов судят по нулевому положению измерительного прибора 4. Напряжение батарейки с помощью сопротивления 5 периодически сравнивают с напряжением стандартного элемента.

Автоматические потенциометры получили широкое распространение для измерения, регистрации, сигнализации и автоматического регулирования температуры в печах. Электросхема автоматического потенциометра приведена на рис. 6.3.

Сущность работы потенциометра заключается в следующем. Сигнал от термопары 1 сравнивается с компенсирующим напряжением  $U_k$ , снимаемым с диагонали измерительного моста 2. При наличии дисбаланса в цепи появляется разность напряже-

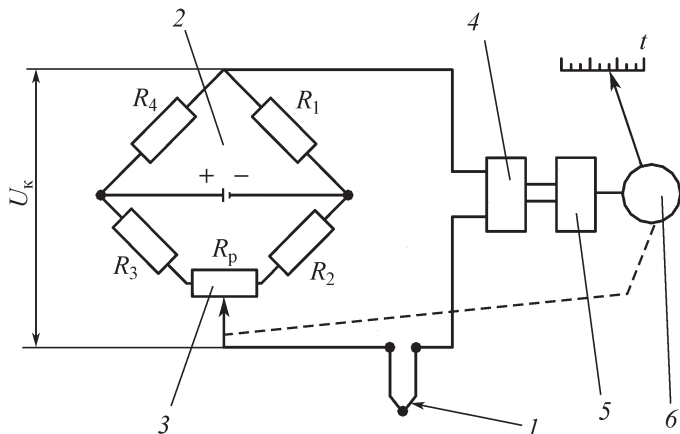


**Рис. 6.3. Электросхема автоматического потенциометра:**

- 1 — термопара;  
2 — измерительный мост ( $R_1$  —  $R_4$  — электросопротивления);  
3 — реохорд;  
4 — преобразователь (ТЭДС) в переменное напряжение;  
5 — усилитель напряжения и мощности; 6 — реверсивный электродвигатель

ний (ТЭДС), которая с помощью преобразователя напряжения 4 преобразуется в слабое переменное напряжение, затем усиливающееся посредством усилителя напряжения и мощности 5. Усиленный сигнал передается на реверсивный двигатель 6. Направление движения ротора зависит от знака дисбаланса. Поэтому электродвигатель 6 перемещает движок реохорда 3 в ту или другую сторону для компенсации напряжений, что характеризуется нулевым током на электродвигателе 6 и его остановом. С ротором двигателя связана стрелка показывающего прибора.

## 6.2. КОНТРОЛЬ ТЕМПЕРАТУРЫ ОПТИЧЕСКИМИ И РАДИАЦИОННЫМИ ПИРОМЕТРАМИ

Измерение температуры бесконтактным методом осуществляют с помощью оптических пирометров на основе зависимости яркости от температуры или энергии излучения нагретого тела от температуры (радиационные пирометры).

Принцип работы оптического пирометра излучения (рис. 6.4) состоит в сравнении яркости излучения нагретого тела и нити электрической лампы 3 при длине волны 0,65 мкм, пропускаемой красным светофильтром 5. Объектив 1 и окуляр 4 прибора для визирования на тело выполнены подвижными. Лампа накаливания питается от батареи 7, напряжение которой изменяется реостатом 8 и измеряется милливольтметром 6, шкала которого проградуирована в градусах Цельсия. Пирометры имеют две шкалы, соответствующие двум диапазонам измеряемых температур: одна с пределами измерения 800...1400 °С, другая с пределами 1200...2000 °С. При использовании прибора для измерения температур > 1400 °С на пути лучей помещают дополнительный ослабляющий фильтр 2.

Измерение температуры начинают с визирования прибора на нагреваемое тело, а затем с помощью реостата изменяют яркость нагрева нити лампы накаливания до тех пор, пока верхняя часть нити не исчезнет на фоне нагреваемой заготовки. Если температура нити выше температуры тела, то нить будет ярче фона, создаваемого за-

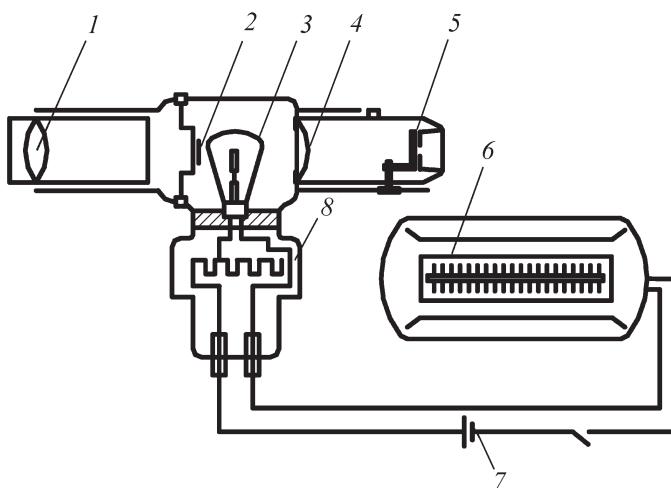


Рис. 6.4. Схема оптического пирометра

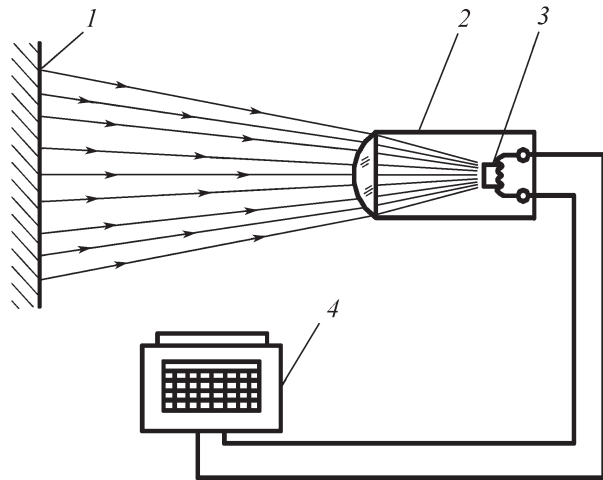


Рис. 6.5. Схема радиационного пирометра

готовкой. При недогреве нити она будет темнее фона заготовки, т.е. ее температура будет ниже температуры тела.

Погрешность измерения температуры стальной заготовки, нагретой до 1200 °С, составляет  $\pm 20$  °С, и ее величина не зависит от степени черноты тела и ослабления свечения в поглощающей промежуточной среде, например продуктов горения в пламенной печи. Измерение температур в диапазоне 400...2500 °С проводят также радиационными пирометрами, которые регистрируют лучистые потоки энергии в интервале длин волн 0,4...2,5 мкм. Схема радиационного пирометра приведена на рис. 6.5.

Лучистый тепловой поток от нагретого тела 1 концентрируется линзой 2 в пирометре на чувствительном элементе 3, представляющем собой термобатарею из последовательно соединенных хромель-копелевых термопар. Нагрев батареи сопровождается возникновением ТЭДС, которая регистрируется автоматическим потенциометром 4. Основные типы радиационных пирометров приведены в табл. 6.1.

6.1. Радиационные пирометры

| Модель пирометра | Диапазоны измерения температуры, °С |         |        |         |
|------------------|-------------------------------------|---------|--------|---------|
|                  | нижний                              | верхний | нижний | верхний |
| РК-15            | 400                                 | 1000    | 700    | 1400    |
|                  |                                     |         |        | 1500    |
| РК-20            | 600                                 | 1200    | 800    | 1600    |
|                  | 700                                 | 1400    |        | 1800    |

Окончание табл. 6.1

| Модель<br>пирометра | Диапазоны измерения температуры, °С |         |        |         |
|---------------------|-------------------------------------|---------|--------|---------|
|                     | нижний                              | верхний | нижний | верхний |
| РК-20               | 700                                 | 1500    | 1200   | 2000    |
| РС-20               | 900                                 | 1800    |        |         |
| РС-25               | 1200                                | 2000    | 1500   | 2500    |

Помимо этих приборов промышленность выпускает фотоэлектрические и цветковые пирометры, обладающие повышенной точностью измерения температуры.

### 6.3. РЕГИСТРИРУЮЩИЕ ПРИБОРЫ

Для регистрации температуры служат автоматические и неавтоматические потенциометры. Один потенциометр может последовательно измерять и регистрировать 1...12 показаний термопар. Кроме потенциометров, регистрирующих температуру, разработаны показывающие аналоговые приборы. В настоящее время значительное число термических и кузнечных цехов оснащено устаревшими потенциометрами типа КСП-3, КСП-4. Данные потенциометры могут быть заменены, например, современными моделями серии "Диск-250". В табл. 6.2 приведены основные технические характеристики современных регистрирующих приборов, выпускаемых отечественной промышленностью. Наиболее часто применяемые термопары, используемые в качестве датчиков температуры, приведены в табл. 6.3.

### 6.2. Характеристики показывающих и регистрирующих аналоговых приборов

| Параметры                   | Модели приборов    |              |              |              |              |
|-----------------------------|--------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
|                             | "Диск-250"         | "Диск-250 И" | "Диск-250 П" | "Диск-250 С" | "Диск-250 Р" |
| Входные сигналы от термопар | ПП, ПР, ХА, ХК, ВР |              |              | ПП, ПР, ВР   | РК-15        |
| Погрешность, %:             |                    |              |              |              | —            |
| по показателям              | ±0,5               |              |              |              |              |
| по регистрации              | ±1                 |              |              |              |              |
| Быстродействие, с           | 5 или 16           |              |              | 5            |              |

Окончание табл. 6.2

| Параметры                  | Модели приборов |              |              |              |              |
|----------------------------|-----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
|                            | "Диск-250"      | "Диск-250 И" | "Диск-250 П" | "Диск-250 С" | "Диск-250 Р" |
| Напряжение питания, В      | 220             |              |              |              |              |
| Потребляемая мощность, В·А | ≤ 25            |              |              |              |              |
| Габаритные размеры, мм     | 320×320×195     |              |              |              |              |
| Диапазон измерения, °С     | –50...+1800     |              |              | 0...1800     | 400...2500   |

Примечание. В обозначении модели прибора: И – искробезопасное исполнение; П – программируемый; С – для измерения температуры жидкого металла; Р – в качестве датчиков температуры используются радиационные пирометры (РК-15).

Обозначения термопар: ПП – палладий-платиновая; ПР – платино-родиевая; ХА – хромель-алюмелевая; ХК – хромель-копелевая; ВР – вольфрам-рениевая.

### 6.3. Наиболее часто применяемые термопары

| Тип термопары                         | Химический состав сплавов, % |                           | Рабочая атмосфера  |                        |
|---------------------------------------|------------------------------|---------------------------|--------------------|------------------------|
|                                       | положитель-<br>ный электрод  | отрицательный<br>электрод | окисли-<br>тельная | восстано-<br>вительная |
| Медь-копель;<br>медь-константан       | Cu                           | Cu(40-45)NiMn(Fe)         | ++                 | +                      |
| Железо-константан                     | Fe                           |                           |                    | ++                     |
| Хромель-копель;<br>хромель-константан | Ni9,5Cr                      |                           |                    | —                      |
| Хромель-алюмель                       |                              | Ni1Si2Al2,5Mn             |                    |                        |
| Силх-силин,<br>тофель-2-ниаль-2       | Ni0,5CrSi(Nb)                | Ni2,5Si                   |                    | +                      |
| Никросил-нисил                        | Ni14,2C1,4Si                 | Ni4,4Si0,1Mg              |                    | —                      |
| ППЗ-ЗП<br>(платинель)                 | Pd31Pt14Au                   | Au35Pd                    |                    | +H <sub>2</sub>        |



Продолжение табл. 6.3

| Тип термопары                         | Химический состав сплавов, % |                           | Рабочая атмосфера                    |                        |                           |
|---------------------------------------|------------------------------|---------------------------|--------------------------------------|------------------------|---------------------------|
|                                       | положитель-<br>ный электрод  | отрицательный<br>электрод | окисли-<br>тельная                   | восстано-<br>вительная |                           |
| ППР-ПЗП                               | Pt38Pd5Rh                    | Rd37Au8Pt                 | ++                                   | —                      |                           |
| ПИП                                   | Pt15Ir                       | Pd                        |                                      |                        |                           |
| ПР 10/0                               | Pt10Rh                       | Pt                        |                                      |                        |                           |
| ПР 13/0                               | Pt13Rh                       |                           |                                      |                        |                           |
| ПР 30/6                               | Pt30Rh                       | Pt6Rh                     |                                      |                        |                           |
| ПР 20/5                               | Pt20Rh                       | Pt5Rh                     |                                      |                        |                           |
| ПР 40/20                              | Pt40Rh                       | Pt20Rh                    |                                      |                        |                           |
| ИР 40/0                               | Ir40Rh                       | Ir                        |                                      |                        |                           |
| ИР 50/0                               | Ir50Rh                       |                           |                                      |                        |                           |
| ИР50-ИРy10                            | Ir50Rh                       | Ir10Ru                    |                                      |                        |                           |
| BP5/20; BAP5/20                       | W5Re                         | W20Re                     | —                                    | +H <sub>2</sub>        |                           |
| BP10/20                               | W10Re                        |                           |                                      | W26Re                  | ++H <sub>2</sub>          |
| BAP5-BP26                             | W5Re                         |                           |                                      |                        |                           |
| Тип термопары                         | Рабочая атмосфера            |                           | Максимальная рабочая температура, °С |                        | Чувствитель-<br>ность, °С |
|                                       | инертная                     | вакуум                    | длительно                            | кратко-<br>временно    |                           |
| Медь-копель;<br>медь-константан       | +                            | +                         | 400                                  | 600                    | 0...400                   |
| Железо-константан                     |                              |                           | 750                                  | 1100                   | 0...1100                  |
| Хромель-копель;<br>хромель-константан |                              |                           | 800                                  |                        |                           |
| Хромель-алюмель                       |                              |                           | 1100                                 | 1300                   | 0...1300                  |
| Сильх-силин,<br>тофель-2-ниаль-2      |                              |                           | 1200                                 |                        | 200...1300                |
| Никросилнисил                         |                              |                           |                                      |                        | 0...1300                  |
| ППЗ-ЗП<br>(платинель)                 |                              |                           | 1300                                 | 1350                   | 600...1300                |
| ППР-ПЗП                               |                              |                           | 1400                                 | 1450                   | 600...1400                |
| ПИП                                   |                              | —                         | 1200                                 | 1400                   | 1000...1400               |

Окончание табл. 6.3

| Тип термопары   | Рабочая атмосфера |        | Максимальная рабочая температура, °С |                | Чувствительность, °С |  |
|-----------------|-------------------|--------|--------------------------------------|----------------|----------------------|--|
|                 | инертная          | вакуум | длительно                            | кратковременно | диапазон температур  |  |
| ПР 10/0         | +                 | +      | 1400                                 | 1600           | 600...1600           |  |
| ПР 13/0         |                   |        |                                      |                |                      |  |
| ПР 30/6         |                   |        | 1600                                 | 1800           | 1000...1800          |  |
| ПР 20/5         |                   |        |                                      |                |                      |  |
| ПР 40/20        |                   |        | 1700                                 | 1850           |                      |  |
| ИР 40/0         | ++                | +      | —                                    | 2200           | 1000...2100          |  |
| ИР 50/0         |                   |        |                                      |                |                      |  |
| ИР50-ИРy10      |                   |        |                                      |                |                      |  |
| ВР5/20; ВАР5/20 | +                 |        |                                      | 2400           | 1400...2400          |  |
| ВР10/20         | ++                |        | 2300                                 | 3000           | 1300...2500          |  |
| ВАР5-ВР26       |                   |        |                                      |                |                      |  |

П р и м е ч а н и я: 1. Обозначения термопар: ППР-ПЗП—платина-палладий-родий — палладий-золото-платиновая термопара; ИР—иридий-рениевая; ИР-ИРy—иридий-родий-иридий-рутениевая; ВАР—вольфрам-рениевая термопара (буква А означает дополнительное легирование алюминием, кремнием и щелочными металлами для повышения механических свойств и снижения хрупкости вольфрам-рениевого сплава).

2. Цифры у термопарных сплавов в виде дроби означают содержание родия или рения в положительном электроде (числитель) и отрицательном (знаменатель), например ПР20/5—родия в положительном электроде 20 %, в отрицательном — 5 %.

3. "++"—рекомендуемая атмосфера; "+"—эксплуатация в данной атмосфере возможна; "—" — нерекомендуемая атмосфера.

4. В скобках в сплавах указаны элементы, присутствующие в них в небольшом количестве (до 1 %).

## Глава 7

# ОБОРУДОВАНИЕ ЦЕХОВ КОВКИ И ШТАМПОВКИ

### 7.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ОБОРУДОВАНИЯ

#### 7.1.1. Общие вопросы

Наиболее общей классификацией кузнечно-штамповочных машин является классификация, впервые предложенная проф. А.И. Зиминым, в основу которой положен характер изменения скорости  $v$  перемещения рабочих органов машин за время рабочего хода  $t_p$ . Согласно данной классификации все кузнечно-штамповочные машины подразделяют на пять основных групп (рис. 7.1).

К **первой группе** относятся молоты, характеризующиеся нежесткой кривой изменения скорости перемещения рабочих частей машины. Для данной группы машин характерна зависимость "время рабочего хода подвижных частей от сопротивления деформации", а следовательно, и форма кривой изменения скорости. Такие кривые изменения скорости называются нежесткими.

К этой же группе относят различные прессы: фрикционные с механическим приводом, винтовые с дугостаторным и круговым приводами, пресс-молоты с гидравлическим приводом. Хотя винтовые машины и называют прессами, но по характеру изменения скорости движения рабочих частей их можно отнести к машинам первой группы — молотам.

Во **вторую группу** входят гидравлические прессы, которые также имеют нежесткую кривую изменения скорости движения рабочих частей машины. У этой группы машин рабочий ход может начинаться с нулевой или любой другой начальной скорости (штриховая кривая на рис. 7.1). Наибольшие скорости перемещения рабочих частей гидравлических машин  $v_{\max}$  сравнительно небольшие и составляют до 0,3 м/с.



Рис. 7.1. Классификация кузнечно-штамповочных машин

**Третью группу** составляют кривошипные машины. Скорость перемещения рабочих частей этих машин, как правило,  $\leq 0,5$  м/с, а кривая изменения скорости носит жесткий характер и зависит от кинематики привода.

К **четвертой группе** относят машины ротационного типа с постоянной окружной скоростью рабочих частей, достигающей 8 м/с.

В **пятую группу** входят импульсные штамповочные машины и машины для гидравлической, пневматической и вакуумной штамповки, которые имеют нежесткую кривую изменения скорости рабочих частей за очень короткое время рабочего хода. В импульсных штамповочных машинах в качестве рабочего тела, осуществляющего непосредственное деформирование, можно использовать воздух, жидкость, энергию электрического поля и пороховых газов и т.д. Для штамповки взрывом применяют специальные твердые взрывные вещества или горючие смеси. Скорость рабочего тела при этом достигает 300 м/с.

Наряду с общепринятой классификацией кузнечно-штамповочных машин по характеру изменения скорости движения рабочих частей машины, каждая из названных групп может классифицироваться по технологическому, конструктивному или другим признакам.

### 7.1.2. Паровоздушные молоты

Паровоздушные молоты приводятся в действие паром или сжатым воздухом. Пар подается к молоту по трубопроводам от паровых котлов или паросиловых установок, сжатый воздух — от компрессоров компрессорных станций под давлением 700...900 кПа. Пар и сжатый воздух для данного типа молотов являются энергоносителями.

По способу использования энергоносителя паровоздушные молоты подразделяют на молоты простого и двойного действия.

В молотах простого действия пар и сжатый воздух служат только для подъема движущихся частей в верхнее положение. Рабочий ход (ход вниз) совершается под действием силы тяжести подвижных (падающих) частей. Накопленная при падении кинетическая энергия превращается при ударе в работу, используемую на изменение формы заготовки.

Принцип работы паровоздушного молота простого действия (рис. 7.2) следующий: пар или сжа-

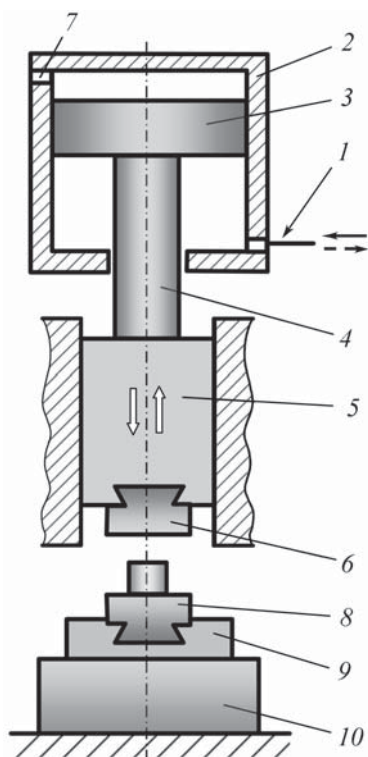


**Рис. 7.2. Схема паровоздушного молота простого действия:**

- 1 — трубопровод; 2 — рабочий цилиндр; 3 — поршень;  
4 — шток; 5 — баба; 6 — верхний штамп;  
7 — отверстие; 8 — нижний штамп;  
9 — промежуточная подушка; 10 — шабот

**Рис. 7.3. Схема паровоздушного молота двойного действия:**

*1* – шток; *2* – рабочий цилиндр; *3* – поршень

тый воздух по трубопроводу *1* поступает в штоковую полость рабочего цилиндра *2* и поднимает поршень *3* и шток *4* с закрепленными на нем бабой *5* и бойком *6*. При движении поршня *3* вверх воздух из поршневой полости цилиндра *2* выходит через отверстие *7*. Когда поршень перекрывает это отверстие, под ним, в верхней части цилиндра, образуется замкнутое пространство, в котором возникает упругая воздушная подушка, обеспечивающая плавное торможение поршня в конце хода.

При подъеме поршня на требуемую высоту парораспределительный механизм прекращает подачу пара (или воздуха) в цилиндр и соединяет его с атмосферой. Под действием силы тяжести подвижные части молота с верхним штампом *б* падают вниз и ударяют по заготовке, установленной на нижнем штампе *8*, закрепленном через промежуточную подушку *9* на шаботе *10*.

Скорость падающих частей в момент удара зависит от величины хода и сил трения в направляющих и уплотнениях поршня и штока и определяется по выражению:

$$v = \sqrt{1,8 \, g \, H_6} \, , \quad (7.1)$$

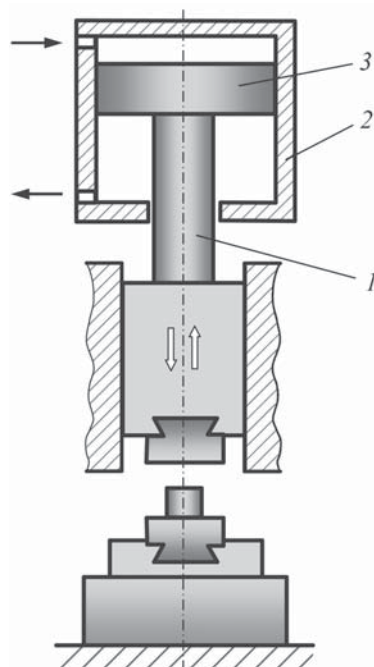
где  $v$  – скорость падающих частей в момент удара, м/с;  $g$  – ускорение силы тяжести ( $g = 9,81 \, \text{м/с}^2$ );  $H_6$  – ход бабы, м.

Кинетическая энергия падающих частей вычисляется по формуле

$$A = \frac{m \, v^2}{2} \, , \quad (7.2)$$

где  $A$  – кинетическая энергия, Дж;  $m$  – масса падающих частей, кг.

Принцип работы паровоздушного молота двойного действия (рис. 7.3) заключается в следующем. Для подъема штока *1* вверх сжатый воздух или пар подается в нижнюю полость рабочего цилиндра *2*, так же как и в молотах простого действия.



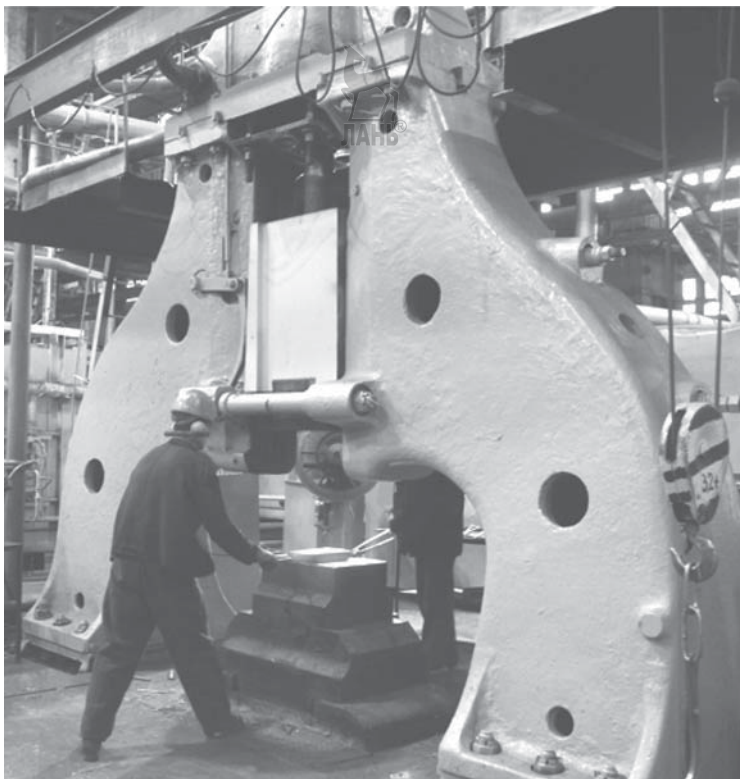


**Рис. 7.4. Ковочный молот**

При рабочем ходе вниз пар или сжатый воздух подается в верхнюю полость рабочего цилиндра 2 и помогает силе тяжести в разгоне падающих частей молота, в результате чего скорость в момент удара достигает 7...8 м/с. При этом пар (воздух), находящийся под поршнем 3, выбрасывается в атмосферу. При одинаковой массе падающих частей молота количество накопленной кинетической энергии у молота двойного действия будет значительно больше благодаря более высокой скорости, чем у молота простого действия.

Паровоздушные молоты по технологическому назначению бывают ковочные и штамповочные.

На ковочных молотах (рис. 7.4), имеющих силу тяжести падающих частей 1000...8000 кг, можно изготавливать ковкой заготовки массой 20...2000 кг.

Наибольшее распространение получили ковочные паровоздушные молоты двойного действия с массой падающих частей до 5000 кг.

Штамповочные молоты (рис. 7.5) являются основным оборудованием для горячей объемной штамповки благодаря своей универсальности, простоте конструкции и невысокой стоимости по сравнению с другими видами оборудования.

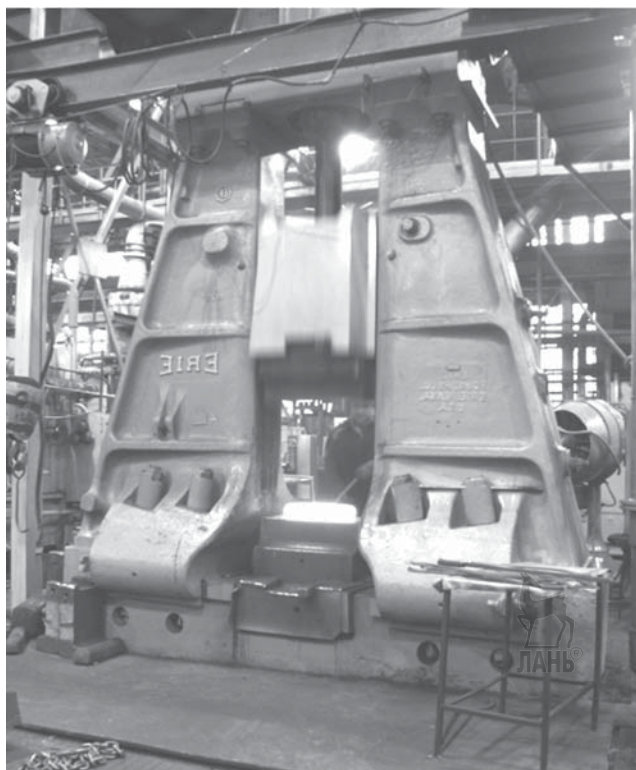


**Рис. 7.5. Штамповочный молот**

Сила тяжести падающих частей штамповочных паровоздушных молотов находится в диапазоне 630...25 000 кг. Наиболее широко применяются молоты с силой тяжести падающих частей 630...10 000 кг.

### **7.1.3. Механические молоты**

В механических молотах передача энергии от главного электродвигателя к подвижным частям осуществляется с помощью различных механических связей: фрикционных, гибких и упругих.

В молотах с гибкой связью для подъема бабы используют ремень, канат или цепь. К молотам с упругими связями относят рычажные и рессорные молоты.

#### **7.1.3.1. Фрикционные молоты с доской**

Действие фрикционного молота с доской основано на использовании сил трения для подъема бабы. Падение последней происходит под действием собственной силы тяжести. Таким образом, энергия удара фрикционного молота с доской определяется массой падающих частей и высотой их падения и подсчитывается так же, как и для паровоздушного молота простого действия.



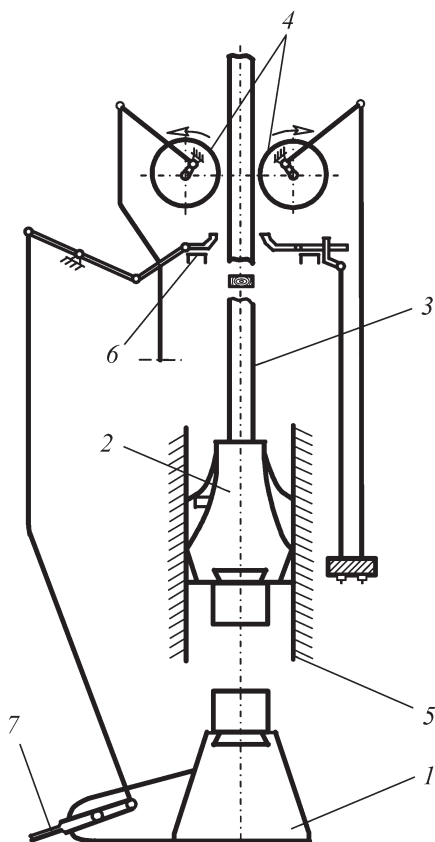


**Рис. 7.6. Кинематическая схема фрикционного молота с доской:**

1 — шабот; 2 — баба; 3 — деревянная доска;  
4 — ролики; 5 — направляющие; 6 — тормозные колодки; 7 — педаль

Кинематическая схема фрикционного молота с доской приведена на рис. 7.6. Шабот 1 и баба 2 мало отличаются от подобных деталей паровоздушного молота. Когда доска 3 зажата между вращающимися роликами 4, подвижные части по направляющим 5 поднимаются вверх. Перед концом подъема ролики раздвигаются, а доска зажимается тормозными колодками 6. Это положение соответствует удержанию бабы на весу. Чтобы баба ударила из положения "на весу", необходимо нажать на педаль зажимного механизма. Тормозные колодки связаны с педалью 7 системами рычагов и электропневматического управления. Если отпустить педаль сразу после нажатия, молот сделает один удар. Если держать педаль нажатой, молот будет автоматически совершать последовательные удары.

Фрикционные молоты с доской применяются для горячей объемной штамповки

поковок, не требующей выполнения операций подкатки или протяжки.

К существенным недостаткам этих молотов относятся невозможность регулирования силы удара, их относительная тихоходность (30...50 ударов в минуту), недопустимость эксцентричных нагрузок и высокая стоимость досок, которые являются наименее долговечной деталью (срок ее службы 40...50 ч). На молотах обычно применяют две доски, которые изготавливают из бука, ясеня или клена.

#### 7.1.3.2. Молоты с гибкой связью

В молотах с гибкой связью в качестве гибкой связи используют ремень или цепь. В нашей стране они не нашли широкого применения, хотя в мировой практике весьма распространены.

Молоты с ремнем применяют для горячей штамповки. Их изготавливают с массой падающих частей 150...2000 кг.

Для подъема бабы в молотах с ремнем используют две схемы:

- 1) подвижные части поднимают с помощью ремня, зажато между вращающимися роликами вследствие сил трения;
- 2) ремень наматывают на вращающийся шкив, осуществляя связь бабы с подъемником.



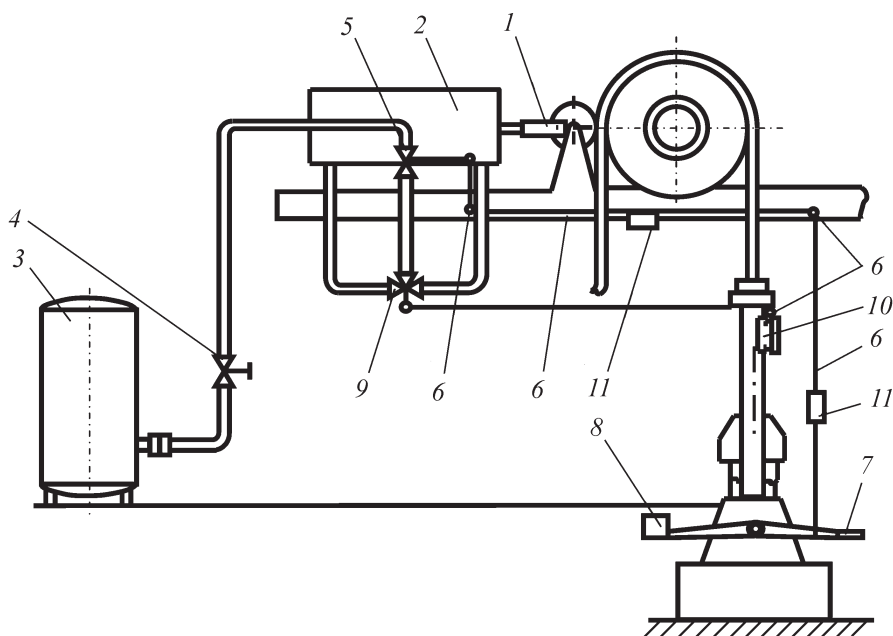


**Рис. 7.7. Схема молота с приводом бабы от ремня:**

1 — тяга; 2 — пневмоцилиндр; 3 — ресивер; 4 — редукционный клапан;  
5 — распределительный клапан; 6 — тросы; 7 — педаль; 8 — противовес; 9 — трехходовой  
кран; 10 — рычаг; 11 — стяжные болты

На рис. 7.7 показана схема молота с приводом бабы от ремня. Ремень к шкиву прижимается роликом при перемещении его тягой 1, связанной с поршнем пневматического цилиндра 2. Чтобы исключить влияние колебания давления воздуха в сети на работу привода, в пневматическую схему молота включают ресивер 3, имеющий достаточный объем.

Величина рабочего давления воздуха, обеспечивающая силу прижатия ремня, составляет 300...600 кПа. Давление регулируют редукционным краном 4. Воздействие на распределительный клапан 5 цилиндра 2 осуществляют через трос 6 с помощью педали 7. Педаль поддерживается в верхнем положении противовесом 8. Для ограничения высоты подъема бабы используют трехходовой кран 9, который при контакте бабы с рычагом 10 переключает пневмоцилиндр на отвод прижимного ролика от ремня. Работа молота с цепью аналогична работе молота с ремнем.

### 7.1.3.3. Бесшаботные молоты

Молоты с подвижным шаботом называют молотами со встречным движением бабы или бесшаботными. Бесшаботные молоты изготавливают с различным исполнением привода подвижных баб, с энергией удара до 1500 кДж. На них можно штамповать поковки с массой, достигающей 20 000 кг. Схема бесшаботного молота приведена на рис. 7.8.

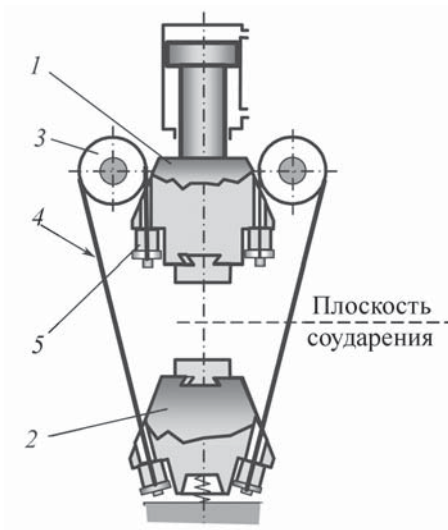


**Рис. 7.8. Схема бесшаботного молота с ленточной связью баб:**

1, 2 — верхняя и нижняя бабы; 3 — блоки-шкивы; 4 — металлические ленты; 5 — амортизирующие буфера

Принцип работы следующий: две бабы: верхняя 1 и нижняя 2, связанные между собой стальными лентами 4, движутся навстречу друг другу и при взаимной встрече штампуют заготовку, которая укладывается на нижнюю бабу. Отсутствие шабота (его роль играет подвижная нижняя баба) сокращает ударные воздействия подвижных частей на фундамент и соответственно производственное здание.

Станина молота монтируется на фундаментной плите. Верхняя баба приводится в движение поршнем. В качестве энергоносителя применяют пар, сжатый воздух либо другой газ.

Нижняя баба получает рабочее движение от верхней посредством стальных лент, перекинутых через блоки-шкивы 3. Применяют также конструкции молотов с независимым приводом обеих баб. В большинстве конструкций движение баб происходит в вертикальной плоскости, но известны молоты, где движение баб осуществляется и в горизонтальной плоскости.

#### 7.1.4. Винтовые прессы (молоты)

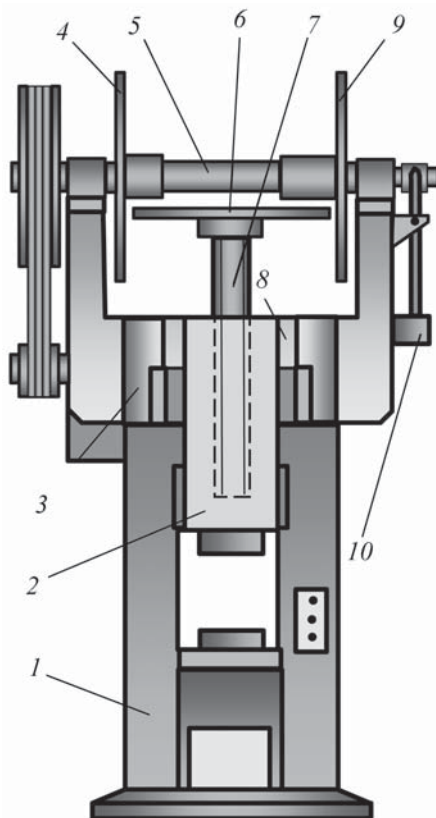
Винтовые машины применяют для горячей и холодной объемной штамповки, чеканки, правки, гибки и других операций. К винтовым кузнечным прессам относят такие, которые в составе главного исполнительного механизма имеют винтовой шпиндель (винт) с несамотормозящейся резьбой прямоугольного или трапецеидального профиля. Эти прессы используют для штамповки поковок кинетическую энергию вращательного или винтового движения масс.

Принцип действия винтовых машин заключается в разгоне подвижных частей (винта с маховиком или без маховика, ползуна и верхнего штампа) приводом фрикционного, электрического или гидравлического действия во время хода вниз до определенной скорости для того, чтобы накопить кинетическую энергию необходимой величины. Наибольшая скорость современных винтовых прессов с фрикционным, дуго- и кругостаторным электроприводом составляет 0,5...0,9 м/с, а с гидроприводом — 0,9...2 м/с.

По характеру работы винтовые прессы относят к оборудованию, имеющему не жесткую кривую изменения скорости движения рабочих частей во время рабочего хода, поэтому, хотя винтовые машины и называют прессами, по характеру изменения скорости движения рабочих частей они являются, скорее, молотами, чем прессами. Общее с прессами у этого типа машин — наличие станины, выполненной в виде замкнутой рамы, которая воспринимает силу в момент деформации заготовки.

**Рис. 7.9. Винтовой двухдисковый пресс:**

1 — станина; 2 — ползун; 3 — верхняя поперечина; 4 — фрикционный диск; 5 — приводной вал; 6 — маховик; 7 — винтовой шпindel; 8 — составная гайка; 9 — фрикционный диск; 10 — механизм управления перемещением фрикционных дисков 4 и 9 относительно диска 6



Поэтому винтовые машины оценивают не только по накопленной кинетической энергии, но и по номинальной силе. Это обстоятельство, а также сравнительно невысокая скорость рабочих частей позволяют называть эти машины прессами, хотя по характеру своей работы их было бы правильнее считать молотами.

В отечественных винтовых прессах с гидравлическим приводом кроме накопленной кинетической энергии для деформирования заготовки используется и сила, развиваемая гидравлическим цилиндром.

Общий вид винтового двухдискового пресса с фрикционным передаточным механизмом показан на рис. 7.9.

Станина 1 винтового пресса состоит из двух стоек, отлитых из стали или чугуна за одно целое со столом, и верхней поперечины 3, соединенной со стойками стальными стяжными болтами. В верхней поперечине закреплена составная гайка 8, внутри которой проходит винтовой шпindel 7, имеющий несамотормозящуюся многозаходную резьбу с углом подъема витков 12...20°. На верхнем конце шпинделя закреплён горизонтальный маховик 6, выполненный из стального или чугунного литья с накладками из фрикционного материала по ободу.

Нижний конец шпинделя через пята шарнирно соединен с ползуном 2,двигающимся в направляющих станины 1. Над маховиком 6 находится приводной вал 5 с дисками 4 и 9, расстояние между которыми всегда несколько больше диаметра маховика. При перемещении горизонтального вала вдоль оси с помощью нажимного пневматического механизма 10 диски 4 и 9 поочередно нажимают на маховик 6, осуществляя его вращение и связанного с ним шпинделя то в одну, то в другую сторону. Винтовой шпindel 7, вращаясь в гайке, перемещает вверх-вниз подвижный ползун 2.

Привод винтового двигателя осуществляется от электродвигателя.

В верхнем положении ползун удерживается ленточным тормозом с механическим или гидравлическим приводом.

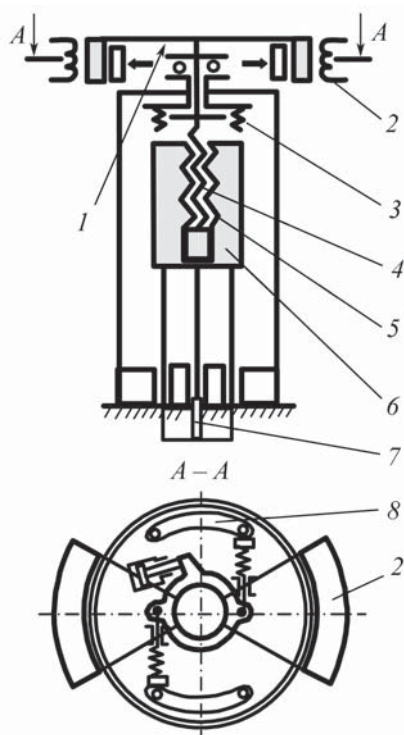


**Рис. 7.10. Схема винтового пресса с дугостаторным приводом:**

1 — маховик; 2 — дугостаторы; 3 — станина с амортизаторами; 4 — винт; 5 — гайка; 6 — ползун; 7 — выталкиватель; 8 — тормоз

Фрикционные винтовые прессы имеют существенные недостатки: громоздкость приводной системы, низкую стойкость фрикционных накладок, низкий КПД из-за проскальзывания маховика и дисков.

Вследствие указанных недостатков винтовые фрикционные прессы не получили широкого распространения и в настоящее время отечественной промышленностью не выпускаются. Вместо них нашли применение винтовые прессы с дугостаторным приводом. В этих прессах принцип работы привода ползуна основан на использовании вращающегося электромагнитного поля, создаваемого не круговыми, как в обычных электродвигателях, а дуговыми статорами, которые приводят во вращение короткозамкнутый ротор, являющийся одновременно маховиком. Схема винтового пресса с дуго-

статорным приводом приведена на рис. 7.10.

Конструкция привода данного пресса максимально упрощена, что обеспечивает высокую надежность и долговечность работы. Принцип работы винтового дугостаторного пресса следующий: вращение ротора — маховика 1 непосредственно передается рабочему винту 4, ввернутому в рабочую гайку 5, жестко закрепленную в ползуне пресса 6. Винт 4, связанный с маховиком 1, имеет кольцевой бурт, опирающийся на кольцевую тягу, расположенную в нижней части ползуна, и осевого перемещения не совершает. Вращение винта 4 вызывает осевое перемещение гайки 5 с ползуном 6. Два дугостатора 2 располагаются на станине 3 пресса. Для торможения в верхнем положении маховик имеет колодочный тормоз 8 с электропневматическим приводом.

Дугостаторный привод упрощает получение пониженной частоты вращения маховика ( $100 \dots 300 \text{ мин}^{-1}$ ) без применения редуктора.

Частота вращения ротора асинхронного двигателя определяется по формуле

$$n = \frac{60\eta}{p} = \frac{3000}{p}, \quad (7.3)$$

где  $n$  — частота вращения,  $\text{мин}^{-1}$ ;  $\eta$  — частота тока, Гц;  $p$  — число пар полюсов электродвигателя.

Эта формула справедлива при круговом статоре, имеющем замкнутую дугу  $360^\circ$ . В случае уменьшения длины дуги статора скорость вращения ротора при одном и том же числе пар полюсов уменьшается. Например, при четырех парах полюсов и круговом статоре ротор электродвигателя будет иметь частоту вращения  $750 \text{ мин}^{-1}$ . При использовании дугового статора с углом  $120^\circ$  частота вращения ротора электродвигателя будет составлять всего  $250 \text{ мин}^{-1}$ . Указанный принцип используют при разработке винтовых прессов с дугостаторным безредукторным приводом.

Переключение привода на опускание и подъем ползуна, а также требуемую величину хода последнего и, соответственно, величину накопленной кинетической энергии устанавливают положением металлических флажков, связанных с бесконтактными конечными выключателями, на которые воздействует ползун пресса при своем перемещении.

Детали винтовых прессов работают в тяжелых условиях. Наиболее ответственную деталь пресса — винтовой шпиндель — изготавливают из кованных сталей 40Х, 40ХНМА или 60С2, подвергнутых термической обработке до твердости 240...280 НВ.

Винтовой шпиндель имеет резьбу прямоугольного, трапецеидального симметричного и трапецеидального несимметричного профилей, которую после термообработки шлифуют. Гайку изготавливают составной, имеющей стальной бандаж и резьбовую втулку, выполненную из бронзы БрОФЮ-1, БрАЖ9-4 или БрОЦС5-5-5.

#### 7.1.5. Гидравлические прессы

Гидравлические прессы в соответствии с классификацией относят к машинам второй группы, имеющим нежесткую кривую изменения скорости движения рабочих частей машины. Принцип работы гидравлического пресса основан на законе Паскаля, по которому давление, производимое на жидкость внешними силами, передается по всем направлениям без изменения.

Принципиальная гидромеханическая схема ковочного гидравлического пресса приведена на рис. 7.11.

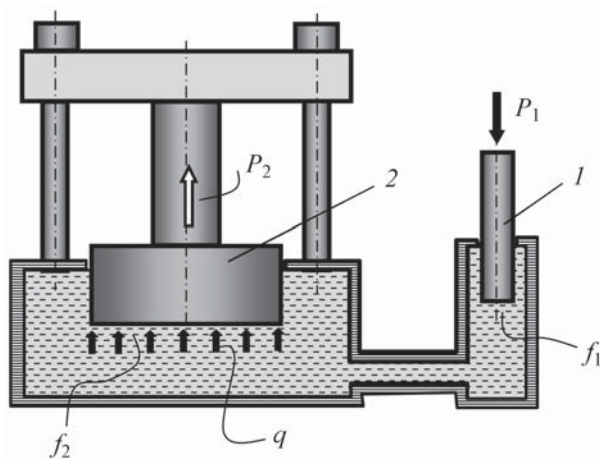


Рис. 7.11. Принципиальная схема гидравлического пресса

Его принцип работы заключается в следующем.

Если к поршню 1 приложить силу  $P_1$ , то по закону Паскаля под торцом поршня 1 возникнет давление  $q = P_1 / f_1$  ( $f_1$  — площадь поршня 1), которое передается во все точки объема жидкости. Давление  $q$ , направленное нормально к основанию поршня 2 большего диаметра и площади  $f_2$  соответственно, создает силу  $P_2 = q f_2$ , которая будет больше силы  $P_1$  во столько раз, во сколько площадь  $f_2$  больше площади  $f_1$ , т.е.

$$P_2 = P_1 \frac{f_2}{f_1}.$$

Таким образом, в гидравлических прессах путем увеличения площади  $f_2$  и рабочего давления жидкости  $q$  можно получить силу  $P_2$  теоретически сколь угодно большой величины.

Устройство ковочного гидравлического пресса приведено на рис. 7.12.

Рабочий гидроцилиндр 1 пресса, установленный в верхней траверсе 2, через колонны 3 жестко соединен с неподвижной нижней траверсой 4, являющейся одновременно рабочим столом пресса, который устанавливают на фундамент. Неподвижные верхняя 2 и нижняя 4 траверсы вместе с колоннами 3 образуют станину пресса.

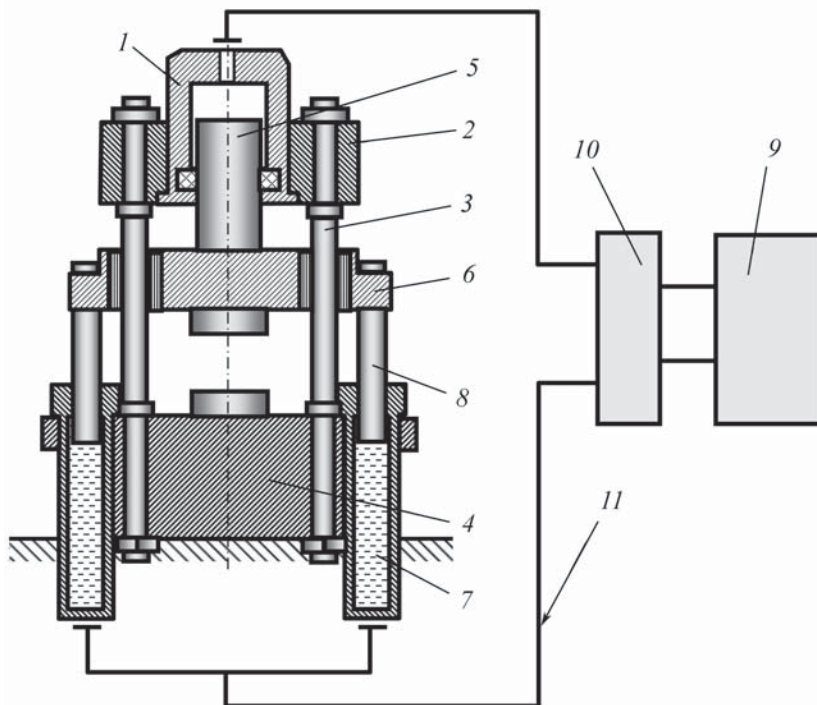


Рис. 7.12. Схема ковочного гидравлического пресса:

- 1 — рабочий гидроцилиндр; 2 — неподвижная траверса; 3 — направляющие колонны;  
 4 — нижняя неподвижная траверса; 5 — плунжер; 6 — подвижная траверса; 7 — возвратный цилиндр; 8 — плунжер; 9 — система гидропривода; 10 — система управления;  
 11 — трубопровод



Рабочий плунжер 5 пресса соединен с подвижной траверсой 6, имеющей возможность перемещения по направляющим колоннам 3 только вниз при подаче рабочей жидкости в главный рабочий цилиндр 1. Для подъема подвижной траверсы 6 вверх в прессе предусмотрены возвратные цилиндры 7 с плунжерами 8.

Работа гидравлического пресса обеспечивается гидроприводом 9, связанным с системой управления 10 и прессом трубопроводом 11.

Главным параметром гидравлического пресса является его номинальная сила, развиваемая рабочим гидроцилиндром.

Гидравлические прессы подразделяют на прессы для обработки металлов и неметаллических материалов. В свою очередь, прессы для обработки металлов подразделяют на несколько групп в зависимости от их технологического назначения.

Из гаммы гидравлических прессов, предназначенных для горячей обработки металлов давлением, можно выделить: ковочные прессы для свободнойковки с номинальной силой 5...150 МН, штамповочные прессы для горячей объемной штамповки с номинальной силой 10...750 МН и специализированные прессы, например для изотермической штамповки, с номинальной силой 2,5...46 МН.

По числу рабочих цилиндров гидравлические прессы подразделяют на одно-, двух-, трех- и многоплунжерные.

В состав гидропрессовой установки входят: пресс, привод (источник жидкости высокого давления), баки (приемники для жидкости), органы управления (различные распределители, клапаны, дроссели, трубопроводы и т.п.).

Приводы пресса (источники высокого давления) разделяют на три группы: насосные безаккумуляторные; насосно-аккумуляторные и мультипликаторные.

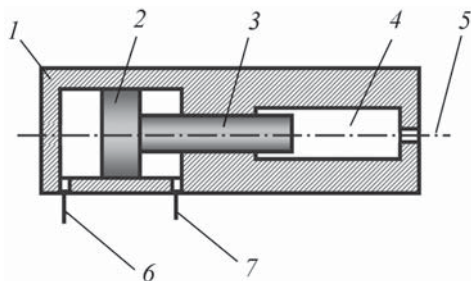
При насосном безаккумуляторном приводе питание гидропресса рабочей жидкостью высокого давления осуществляют непосредственно от насосов. Особенностью насосного привода является то, что насос развивает такое давление, которое необходимо для деформирования заготовки. Поскольку сопротивление деформированию во время рабочего хода плунжера пресса меняется, давление жидкости, создаваемое насосом, также переменное. При этом скорость перемещения подвижной траверсы пресса зависит только от производительности насосов.

К насосно-аккумуляторным приводам прессов относят приводы, осуществляющие питание гидросистемы пресса рабочей жидкостью высокого давления при рабочем ходе одновременно от насоса и гидроаккумулятора. В этом случае между прессом и насосом устанавливают дополнительную емкость, в которой скапливается (аккумулируется) жидкость высокого давления.

Аккумулятор в требуемый момент времени отдает запас накопленной жидкости в гидросистему пресса, компенсируя тем самым недостающую во время деформирования производительность насосов, обеспечивая необходимую скорость перемещения подвижной траверсы и рабочую силу пресса. При насосно-аккумуляторном приводе скорость движения подвижной траверсы не зависит от производительности насосов, а определяется только сопротивлением деформированию материала заготовки.

К мультипликаторным приводам относят такие, в которых питание пресса во время рабочего хода осуществляется источником высокого давления — мультипликатором (рис. 7.13), подающим рабочую жидкость высокого давления определенными порциями в гидросистему пресса.

Традиционно мультипликатор состоит из корпуса 1 с двумя полостями различного диаметра. В полости большего диаметра размещают поршень 2 со штоком 3,

**Рис. 7.13. Схема мультипликатора:**

- 1 – корпус; 2 – поршень; 3 – шток;  
4 – камера высокого давления;  
5 – трубопровод высокого давления;  
6, 7 – трубопроводы низкого давления

торец которого находится во второй камере 4, являющейся камерой высокого давления. В исходном положении камера 4 заполнена рабочей средой, а трубопровод 5 перекрыт. При рабочем ходе мультипликатора поршень 2 со штоком 3 должен быть перемещен вправо, сжимая рабочую среду, находящуюся в замкнутом объеме (камера 4). Для этого в поршневую полость мультипликатора по трубопроводу 6 насосом нагнетают пар, воздух или жидкость, находящиеся под низким давлением  $q_1$ . Вследствие этого к торцу поршня 2 будет приложена сила  $P_1 = q_1 F_1$ , где  $F_1$  – площадь торца поршня 2. Для того чтобы поршень 2 со штоком 3 находился в равновесии, к торцу штока 3 также должна быть приложена сила  $P_2 = P_1$ . При этом сила  $P_2 = q_2 F_2$ , где  $q_2$  – давление рабочей среды в камере 4;  $F_2$  – площадь торца штока 3. Учитывая равенство сил  $P_1$  и  $P_2$  после несложных преобразований имеем

$$q_2 = q_1 \frac{F_1}{F_2}. \quad (7.4)$$

Величину  $K_m = q_2 / q_1 = (d_2 / d_1)^2$  называют коэффициентом мультипликации, где  $d_2$  и  $d_1$  – диаметры поршня и штока соответственно.

Таким образом, создав в камере высокого давления 4 давление рабочей среды  $q_2 = K_m q_1$ , открывают трубопровод 5, обеспечивая подачу давления  $q_2$  в гидросистему пресса. (Возврат поршня 2 и штока 3 мультипликатора в исходное положение осуществляют путем соединения трубопровода 7 с насосом низкого давления, а трубопровода 6 – со сливом.)

При совершении рабочего хода пресса мультипликатор выполняет несколько рабочих и холостых ходов. При холостом ходе мультипликатора ползун пресса остается неподвижным. Это обстоятельство неблагоприятно сказывается на процессе деформирования заготовки.

Для увеличения производительности пресса и обеспечения непрерывности процесса деформирования заготовок применяют сдвоенные мультипликаторы, осуществляют почти непрерывную подачу рабочей среды высокого давления в гидросистему пресса (подача рабочей среды прерывается примерно на 0,5...1,0 с при срабатывании управляющей аппаратуры). Известны и другие схемы гидропривода, гарантирующие непрерывность подачи рабочей среды высокого давления в гидросистемы прессов.

В качестве рабочей жидкости в гидравлических прессах обычно используют минеральные масла: промышленное, машинное, турбинное и т.д.

Гидравлические ковочные прессы предназначены для выполнения различных технологических операцийковки (протяжки, осадки, прошивки, рубки и т.д.), а



также для объемной штамповки. В основном это четырехколонные гидравлические прессы с верхним расположением рабочего цилиндра.

Ковочные прессы небольшой силы для удобства их обслуживания изготавливают одностоечными. Они характеризуются большим числом ходов и высокой скоростью перемещения подвижной траверсы.

Более мощные прессы имеют выдвижной стол для удобства смены штамповочной оснастки.

Гидравлические штамповочные прессы отличаются от ковочных:

- меньшими значениями рабочего хода подвижной траверсы и высоты штамповочного пространства;
- увеличенными размерами столов, а также наличием подштамповой плиты;
- повышенной жесткостью станины и подвижной траверсы;
- наличием выталкивателей для удаления отштампованных деталей;
- отсутствием режима проглаживающих ходов, обязательного для ковочных прессов.

### 7.1.6. Кривошипные горячештамповочные прессы

Эти прессы в соответствии с классификацией относят к третьей группе машин, предназначенных для горячей объемной штамповки. Кривошипные горячештамповочные прессы (КГШП) характеризуются значительными силовыми и энергетическими параметрами. Отечественные заводы выпускают КГШП с силой 6,3...63 МН, величиной хода ползуна 200...460 мм, числом ходов ползуна в минуту 40...90.

Применение КГШП значительно улучшает условия труда рабочих в кузнечно-штамповочных цехах: снижается уровень шума и вибрации, присущей молотовому оборудованию. Отсутствие ударных нагрузок повышает стойкость штампов и позволяет изготавливать их рабочие элементы менее массивными, чем на молотах. Высокая жесткость дает возможность повысить точность изготавливаемых штампов.

Основные параметры КГШП определяют ГОСТ 6809–87.

Кинематическая схема КГШП приведена на рис. 7.14, а на рис. 7.15 — общий вид прессы.

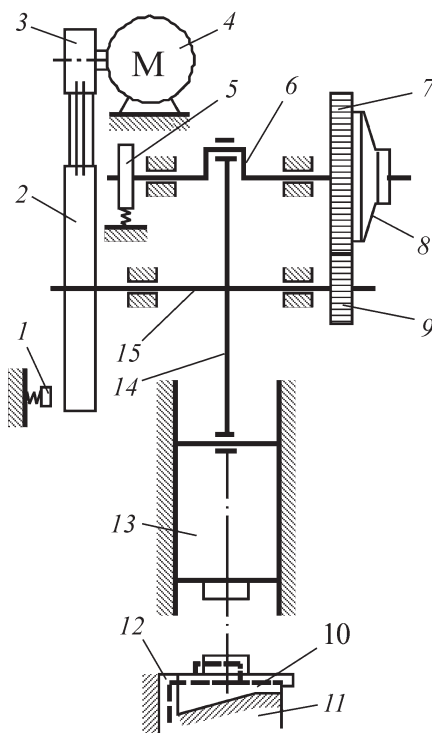


**Рис. 7.14. Кинематическая схема КГШП:**

- 1 — тормоз; 2 — маховик; 3 — шкив;  
 4 — электродвигатель; 5 — тормоз;  
 6 — кривошипный вал; 7 и 9 — зубчатые колеса;  
 8 — муфта; 10 — клин; 11 — стол прессы; 12 — подштамповая плита; 13 — ползун; 14 — шатун;  
 15 — промежуточный вал

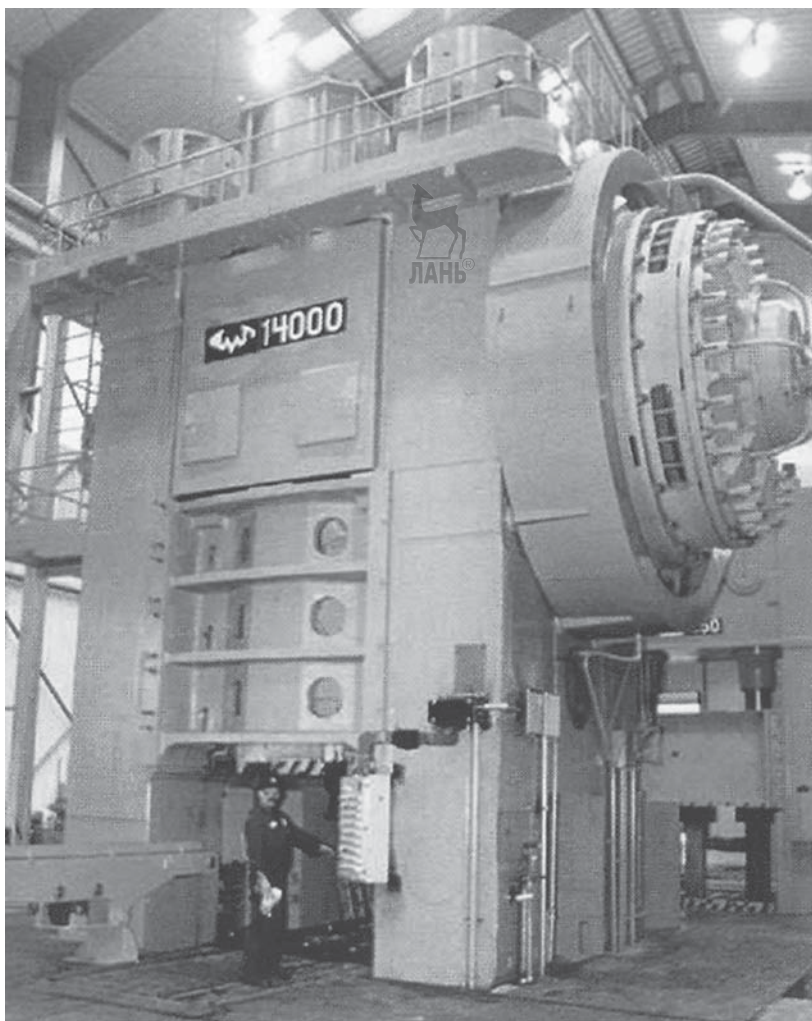


Рис. 7.15. КГШП с номинальной силой 140 МН (14 000 тс)

Принцип его работы следующий. От электродвигателя 4 через клиноременную передачу и шкив 3 вращение передается маховику 2, находящемуся на приводном (промежуточном) валу 15. С противоположной стороны на этом валу закреплено зубчатое колесо 9, которое входит в зацепление с зубчатым колесом 7, свободно вращающимся на кривошипном валу 6. Передача вращающего момента с вала 15 на кривошипный вал осуществляется с помощью фрикционной муфты 8 с электропневматическим управлением.

Вращаясь, вал 6 через шатун 14 приводит в возвратно-поступательное движение ползун 13, в нижней части которого крепится верхняя половина штампа. Нижняя половина штампа крепится к подштамповой плите 12 стола прессы 11 с клином 10.

Для останова вращения кривошипного вала в крайнем верхнем положении (или аварийного останова в любом положении) служит тормоз 5. Управляют прессом от кнопочной станции или ножной педали. Имеется тормоз маховика 1.

Наряду с чисто кривошипным приводом ползуна КГШП силой до 120 МН изготавливают с кривошипно-клиновым приводом. Такая конструкция привода обеспечивает увеличение жесткости пресса, позволяя штамповать поковки с большим эксцентриситетом по сравнению с традиционным кривошипным приводом.

Для удаления поковок из штампов КГШП оснащают верхним и нижним выталкивателями (выталкиватели могут быть как с механическим, так и с пневматическим приводом).

Для регулировки штамповой высоты КГШП служит клиновой стол с величиной регулировки 10...20 мм. Он служит также для вывода пресса из распора (заклинивания). Разгрузку пресса при заклинивании осуществляют с помощью клинового стола отводом поперечного клина и ударами кувалды по специальному выступу стола. При этом разгрузку пресса необходимо проводить после охлаждения поковки. На практике не всегда удается этим способом достигнуть желаемого результата. Иногда применяют разрезку вставок штампа, например, ацетилено-кислородным резаком.

### 7.1.7. Горизонтально-ковочные машины

#### 7.1.7.1. Общие вопросы

Горизонтально-ковочные машины (ГКМ) предназначены для горячей штамповки заготовок в многоручьевых штампах. По характеру движения рабочих частей в соответствии с классификацией ГКМ относят к третьей группе машин. Их применяют при изготовлении различных длинноосных заготовок: полуосей грузовых и легковых автомобилей, клапанов, зубчатых колес, колец шарико- и роликоподшипников, для набора металла в замковую часть заготовок лопаток авиационных двигателей и т.п. Штамповку можно проводить как от прутка, так и из штучной заготовки.

На рис. 7.16 показан общий вид ГКМ. Принципиальная кинематическая схема ГКМ с вертикальным разъемом матриц приведена на рис. 7.17.

Принцип работы ГКМ следующий. В исходном положении (рис. 7.17, а) матрицы 3 и 5 разведены, блок крепления пуансонов 1 находится в крайнем левом положении, регулируемый упор 2 — в крайнем нижнем. Прутковую заготовку укладывают в неподвижную матрицу 3 до контакта ее торца с упором 2. Включают рабочий ход машины, обеспечивая вращение кривошипного вала. При этом подвижные элементы машины совершают следующие перемещения: подвижная матрица 4 передвигается вверх, обеспечивая жесткий зажим прутковой заготовки 4, упор 2 поднимается также вверх, освобождая рабочую зону машины, блок 1 начинает перемещение в сторону заготовки 4 (рис. 7.17, б). При дальнейшем перемещении блока 1 осуществляются высадка торцевой зоны заготовки 4 и заполнение полости ручья, образованного сомкнутыми матрицами 3 и 4 (рис. 7.17, в).

При дальнейшем вращении коленчатого вала блок 1 перемещается влево, матрица 5 — вниз, упор 2 занимает исходное положение и штамповщик извлекает вышенную заготовку из рабочей зоны машины. Изложенный порядок движения рабочих элементов ГКМ обеспечивается системой кривошипного вала и кулачковой системой перемещения подвижной матрицы 5. При этом необходимое время оста-

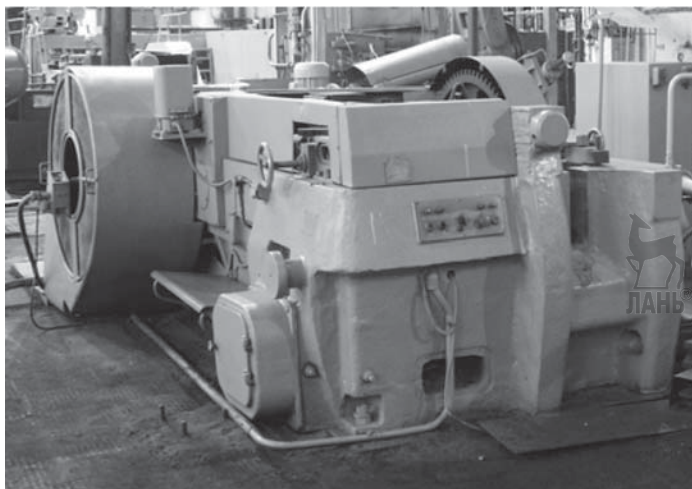


Рис. 7.16. Общий вид ГКМ

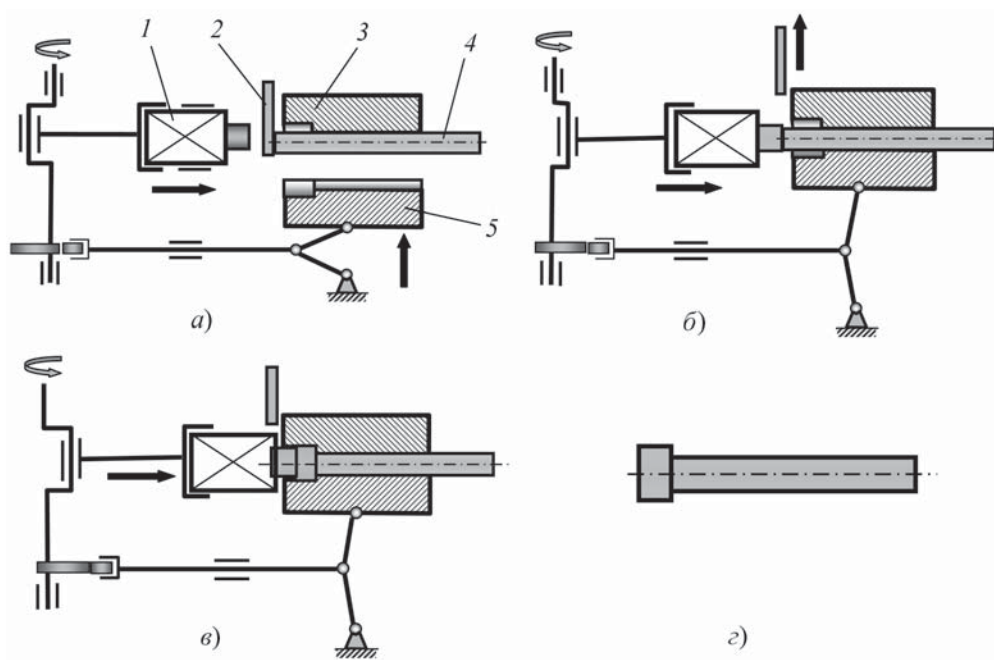


Рис. 7.17. Кинематическая схема ГКМ и этапы штамповки прутковой заготовки:

*а* – установка заготовки; *б* – зажим заготовки в матрицах; *в* – высадка утолщения на торце заготовки; *г* – отштампованная заготовка; 1 – блок крепления пуансонов; 2 – регулируемый упор; 3 – неподвижная матрица; 4 – обрабатываемая заготовка; 5 – подвижная матрица

нова подвижной матрицы 5 в процессе штамповки осуществляется соответствующим профилем кулачка, жестко связанного с кривошипным валом.

Для обеспечения оптимальных условий процесса штамповки сила зажима заготовки матрицами равна  $\sim 0,3$  от номинальной силы ГKM.

Наличие разъемных матриц позволяет получать поковки без штамповочных уклонов, заусенцев и с глубокими отверстиями, а также при штамповке из прутка с прошивкой сквозных отверстий. По конструктивному исполнению ГKM делятся на две основные группы: с вертикальной и горизонтальной плоскостями разъема зажимных матриц.

В основном промышленность выпускает машины с вертикальной плоскостью разъема матриц. Появление машин с горизонтальной плоскостью разъема объясняется удобством механизации и автоматизации процесса штамповки на этом типе машин.

Основные характеристики ГKM регламентирует ГОСТ 7023–89.

#### 7.1.7.2. Типы поковок, изготавливаемых на ГKM

На ГKM изготавливают сплошные и полые поковки из прутков, имеющих обычно круглое поперечное сечение, а также полые поковки из труб. Поковки, производимые на ГKM, обычно имеют форму тела вращения с осью, совпадающей с осью прутка или трубы.

Наличие двух плоскостей разъема в штампе создает условия для получения поковок с небольшими уклонами или без них. Упоры в штампах ГKM выполняют регулируемые, что позволяет при наладке машины скорректировать деформируемый объем заготовки и получить поковку без облоя или с минимальным облоем.

ГKM часто применяют при комбинированной штамповке. При этом высадочные переходы, осуществляемые на ГKM, могут являться как заготовительными, так и окончательными. На ГKM, как и на КГШП, штамповка в одном ручье выполняется за один ход машины, из-за этого окалина может заштамповаться в тело поковки. Поэтому перед штамповкой окалину удаляют. Для ее уменьшения рекомендуется применять индукционный нагрев металла.

В зависимости от степени сложности все поковки, изготавливаемые на ГKM, можно разделить на шесть групп (табл. 7.1):

I группа – поковки типа стержня с утолщениями, состоящая из трех подгрупп;

II группа – поковки со сквозным отверстием, в которую входят также три подгруппы, включающие в себя кольца, втулки, шестерни и другие пустотелые детали с простым и сложным наружным и внутренним контурами;

7.1. Поковки, изготавливаемые на ГKM

| Группа | Подгруппа | Примерные формы поковок                                                             |
|--------|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| I      | 1         |  |

Окончание табл. 7.1

| Группа | Подгруппа | Примерные формы поковок |
|--------|-----------|-------------------------|
| I      | 2         |                         |
|        | 3         |                         |
| II     | 1         |                         |
|        | 2         |                         |
|        | 3         |                         |
| III    | 1         |                         |
| IV     |           |                         |
| V      |           |                         |
| VI     |           |                         |

III группа – поковки с глухой одно- и двусторонней полостью, получаемой прошивкой, с постоянным и переменным сечением;  
 IV группа – поковки смешанной конфигурации, имеющие стержень и утолщение с глухими полостями постоянного и переменного сечений;  
 V группа – поковки со сквозным отверстием, получаемые из труб;  
 VI группа – поковки комбинированной формы, штампуемые за несколько операций.



### 7.1.8. Машины специального назначения

К машинам специального назначения относят такое оборудование, которое предназначено для выполнения относительно ограниченного числа технологических операций. Это ковочные вальцы, вертикально-ковочные, электровысадочные, радиально-ковочные и раскатные машины.

#### 7.1.8.1. Ковочные вальцы

Ковочные вальцы широко применяют для горячей объемной штамповки в различных отраслях промышленности. В соответствии с классификацией ковочные вальцы относятся к IV группе машин для обработки металлов давлением. В свою очередь, их подразделяют на три основные группы: двухопорные (закрытые), консольные и комбинированные.

В двухопорных ковочных вальцах рабочий инструмент (кольцевые секторы — штампы) располагается между двумя опорами, и, следовательно, вальцы такого типа обладают высокой жесткостью и могут применяться для точной вальцовки. Их изготавливают с рабочим диаметром инструмента 160...1000 мм и силой 100...2500 кН.

В консольных вальцах (рис. 7.18) рабочий инструмент размещается на консоли, поэтому они имеют меньшую жесткость, значительную угловую деформацию и используются в основном как оборудование для предварительного фасонирования заготовок под последующую штамповку на КГШП или молоте. Эти вальцы выполняют с максимальным рабочим диаметром инструмента, как правило,  $\leq 400$  мм, с номинальной силой до 1000 кН.

Комбинированные ковочные вальцы являются универсальной машиной, позволяющей осуществлять точную вальцовку в средней части валков, и предварительное

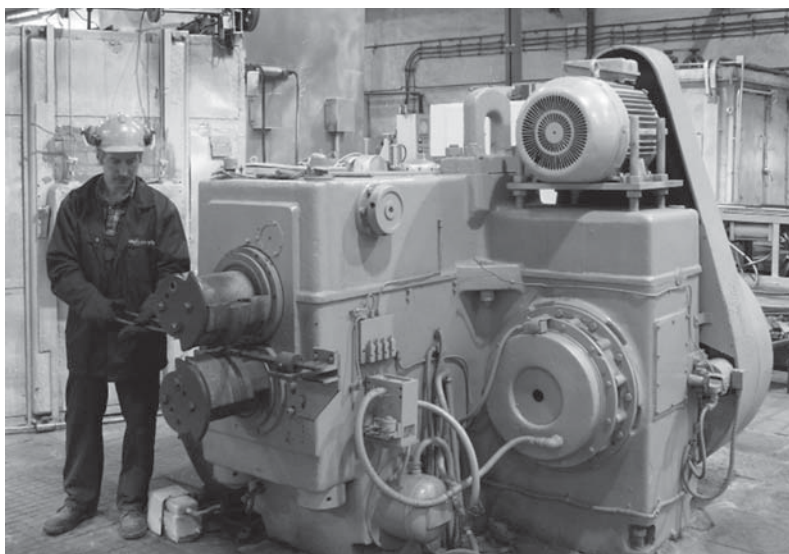


Рис. 7.18. Общий вид консольных ковочных вальцов

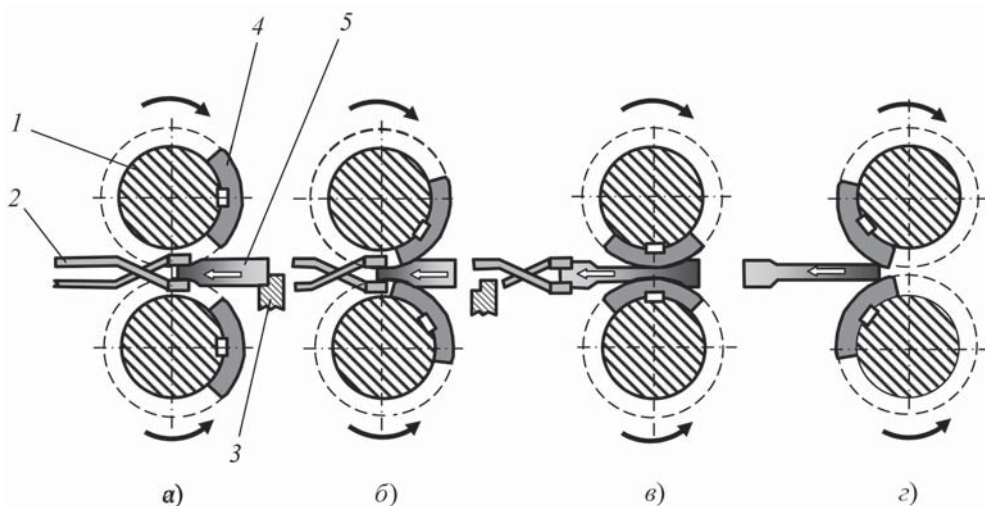


**Рис. 7.19. Последовательность процесса вальцовки:**

*а* — подача заготовки в исходное положение; *б* — захват заготовки и втягивание ее в зону деформации передними выступами вставок; *в* — установившийся процесс вальцовки; *г* — завершающий процесс вальцовки; 1 — валок; 2 — клещи; 3 — упор; 4 — сменные секторы-штампы; 5 — заготовка

профилирование заготовки на консоли. Схема вальцовки заготовки приведена на рис. 7.19.

Процесс вальцовки осуществляется следующим образом. Нагретую заготовку постоянного сечения 5 подают клещами 2 до упора 3 на холостом участке хода, когда между валками имеется свободный проход. Затем при включении машины вставки 4, вращаясь в направлении, указанном стрелками, своими секторами захватывают заготовку и, деформируя ее в ручьях штампа, выталкивают в сторону рабочего, т.е. "на себя". При вальцовке поперечные сечения деформируемых участков утоняются, а длина увеличивается.

**Вальцовка фасонных заготовок.** Площадь поперечного сечения исходной заготовки  $F_3$  под вальцовку определяют по наибольшему поперечному сечению поковки  $F_{п\max}$  с учетом облоя и угара. Наружные переходы округляют радиусом  $R \geq 0,5 H_3$ , где  $H_3$  — высота исходной заготовки; внутренние переходы — радиусом  $R_1 \geq 0,5 R$ .

Число переходов вальцовки определяют исходя из допустимой величины коэффициента вытяжки  $\lambda = F_1 / F_2$  в каждом переходе, где  $F_1, F_2$  — площади поперечных сечений заготовки соответственно до и после очередного перехода вальцовки.

Общим коэффициентом вытяжки  $\lambda_{\text{общ}}$  называется отношение  $F_3$  к площади сечения заготовки после вальцовки  $F_k$ , т.е.:

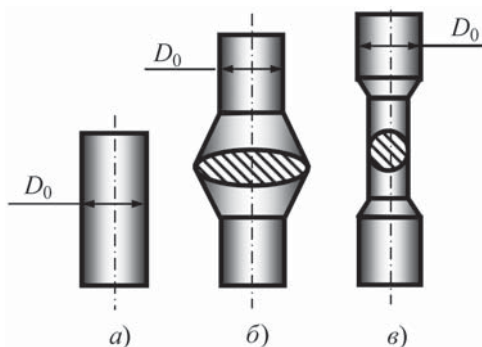
$$\lambda_{\text{общ}} = F_3 / F_k. \quad (7.5)$$

В общем случае, чтобы из заготовки сечением  $F_3$  после вальцовки получить заготовку сечением  $F_k$ , нужно иметь  $n$  переходов с допустимым коэффициентом вытяжки  $\lambda$  для каждого перехода. После перехода:



**Рис. 7.20. Технологическая последовательность формоизменения цилиндрической исходной заготовки при двухпереходной вальцовке:**

*a* — заготовка; *б* — первый переход;  
*в* — второй переход



первого

$$F_1 = F_3 / \lambda; \quad (7.6)$$

второго

$$F_2 = F_1 / \lambda = F_3 / \lambda^2; \quad (7.7)$$

*n*-го

$$F_n = F_3 / \lambda^n. \quad (7.8)$$

Логарифмируя полученное выражение и решая его относительно *n*, получаем выражение для определения числа переходов:

$$n = (\lg F_3 - \lg F_k) / \lg \lambda, \quad (7.9)$$

где  $\lambda$  — средний коэффициент вытяжки за один переход, принимаемый в пределах 1,2...2,0.

Вальцовку за один переход можно проводить, если  $\lambda \leq 2$ . В противном случае по разьему штампа образуется заусенец. На рис. 7.20 приведена последовательность изготовления из исходной цилиндрической заготовки диаметром  $D_0$  типовой заготовки под штамповку по переходам при двухпереходной вальцовке.

Вальцовкой можно получать мелкие и средние поковки простой и сложной формы, у которых нет высоких ребер, выступов и отростков, а поперечные сечения вдоль оси поковки мало отличаются друг от друга. К таким поковкам относятся, например гаечные ключи, шатуны, кулачки, плоскогубцы, боковые звенья скребкового транспортера и др. Штамповка на ковочных вальцах имеет ряд технологических особенностей.

При увеличении температуры заготовки затрудняется заполнение углублений в ручьях штампа, так как при вальцовке металл в горизонтальных направлениях течет интенсивнее, чем в вертикальных. Вследствие наличия опережения<sup>1</sup> разница между размерами горячей поковки и ручья штампа может колебаться в пределах 12...15 %.

<sup>1</sup> Явление, при котором вальцуемый металл выходит из вальцовочных вставок со скоростью, превышающей окружную скорость вставок.

## 7.2. Средние удельные давления при вальцовке углеродистых сталей

| Температура деформации, °C | Удельное давление $p$ в зависимости от формы, кг/мм <sup>2</sup> |         |
|----------------------------|------------------------------------------------------------------|---------|
|                            | простой                                                          | сложной |
| 900...1000                 | 20...25                                                          | 30...35 |
| 1150                       | 6...10                                                           | 10...17 |

Силу вальцевания можно определить по выражению

$$P = p B \sqrt{R \Delta h}, \quad (7.10)$$

где  $p$  — среднее удельное давление, принимаемое на основании опытов, кг/мм<sup>2</sup>;  $B$  — средняя ширина очага деформации, мм;  $R$  — начальный радиус штампа, мм;  $\Delta h$  — линейное обжатие, равное разности высот заготовки при входе и выходе из штампа, мм.

Для углеродистых сталей средние потребные удельные давления вальцовки приведены в табл. 7.2.

Средняя ширина очага деформации

$$B = (B_1 + B_2) / 2, \quad (7.11)$$

где  $B_1$  и  $B_2$  — ширина заготовки соответственно до и после вальцовки, мм.

Применение вальцовки заготовок под последующую штамповку обеспечивает экономию металла на 5...20 %, повышение производительности труда на 50...150 % и снижение себестоимости поковок на ~10...25 %.

### 7.1.9. Раскатка кольцевых заготовок

#### 7.1.9.1. Общие вопросы

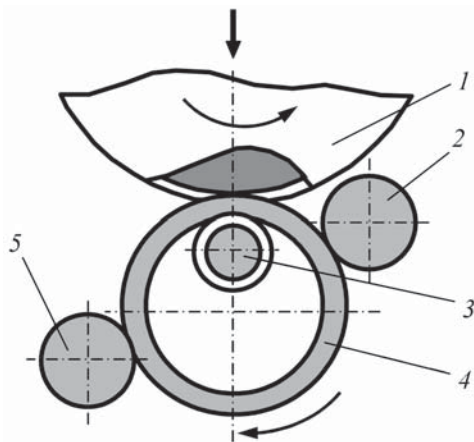
Сущность процесса раскатки заключается в деформировании исходной кольцевой заготовки между двумя вращающимися валками, в результате чего из-за изменения формы и уменьшения толщины стенок заготовки происходит одновременное увеличение ее внутреннего и наружного диаметров.

Известны четыре способа раскатки кольцевых заготовок: открытый, полуоткрытый, закрытый и полузакрытый. В настоящее время наиболее распространен открытый способ, что объясняется его универсальностью и экономичностью. На рис. 7.21 приведена схема открытой раскатки.

Процесс осуществляют следующим образом. Нагретую до ковочных температур кольцевую заготовку 4 надевают на раскатной валок 3. Затем к заготовке подводят вращающийся нажимной валок 1, который под действием вращающего момента и приложенной к нему силы сообщает вращение заготовке и деформирует ее по толщине. По мере сближения нажимного и раскатного валков происходит непрерывное утонение исходной заготовки при одновременном увеличении ее диаметра. Ро-

**Рис. 7.21. Схема открытой раскатки  
кольцевой заготовки:**

1 и 3 — нажимной и раскатной валки соответственно; 2 — упорный ролик; 4 — заготовка; 5 — контрольный ролик



лик 2, упорный или поддерживающий, служит для уменьшения вибраций и поддержания заготовки. Ролик 5, контрольный, предназначен для контроля диаметра раскатываемой заготовки: он отключает раскатную машину при достижении заготовкой требуемого наружного диаметра.

На рис. 7.22 приведен общий вид раскатной машины модели РМ-300, а на рис. 7.23 — некоторые формы поковок, изготавливаемых горячей раскаткой.

Припуски под обработку резанием при раскатке заготовки назначают по нормам, действующим, например, в подшипниковой промышленности. Размеры исходной кольцевой заготовки прямоугольного сечения под раскатку можно определить следующим образом.

Внутренний диаметр заготовки

$$d_{3.в} = d_{п.в} / k_p, \quad (7.12)$$

где  $d_{п.в}$  — внутренний диаметр раскатанной поковки;  $k_p$  — коэффициент обжатия при раскатке, который представляет собой отношение площадей сечений заготовки до и после раскатки.

Для профильных поковок типа колец подшипников  $k_p = 1,3...1,7$ , для колец сложных профилей с тонкими ребрами и глубокими выемками  $k_p = 3,0$ . Коэффициент обжатия находят по выражению

$$k_p = (D_{3.н} - d_{3.в}) / (D_{п.н} - d_{п.в}). \quad (7.13)$$

Наружный диаметр заготовки  $D_{3.н}$  определяют из условия равенства объемов заготовки и раскатанной поковки с учетом потери металла на угар:

$$D_{3.н} = \sqrt{(D_{п.н}^2 - d_{п.н}^2) Y + d_{3.в}^2}, \quad (7.14)$$

где  $D_{п.н}$  — наружный диаметр раскатанной поковки;  $Y$  — коэффициент, учитывающий угар при нагреве (для плазменных печей  $Y = 1,015$ ; при индукционном нагреве  $Y = 1,007$ ).

Формула (7.14) справедлива при условии, что высота заготовки  $B_3$  (рис. 7.24) равна высоте поковки  $B_{п.}$ .

Силу раскатки можно определить по выражению  $P = p F_{к.м}$ , где  $F_{к.м}$  — площадь контакта валка с материалом заготовки, мм<sup>2</sup>;  $p$  — давление раскатки, кгс/мм<sup>2</sup>.

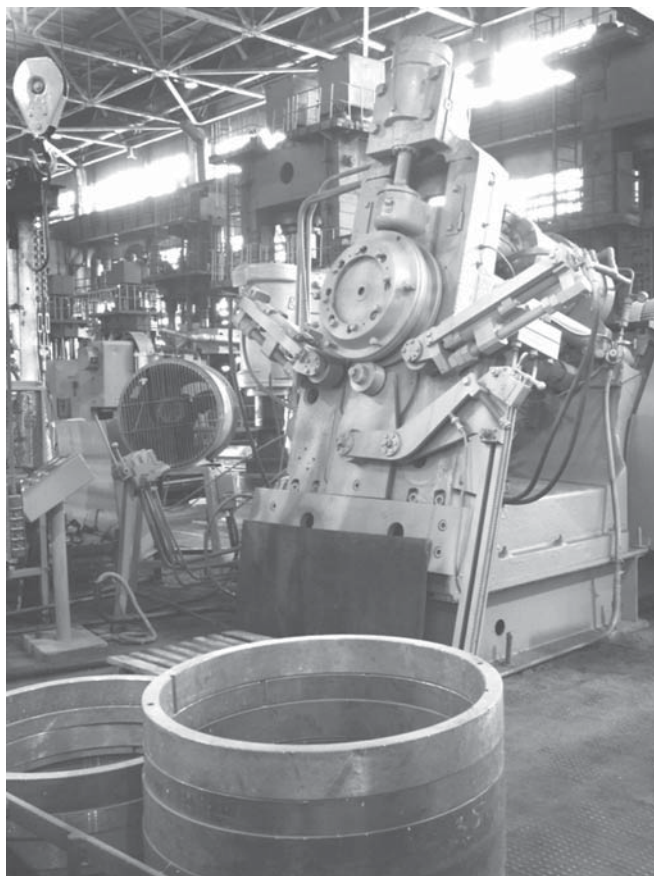


Рис. 7.22. Общий вид раскатной машины (на переднем плане – раскатанные кольцевые заготовки)

Давление раскатки  $p$  можно вычислить по формуле

$$p = 1,5 \sigma_{St}, \quad (7.15)$$

где 1,5 – коэффициент, учитывающий влияние схемы напряженного состояния в очаге пластической деформации, скорости деформации и наклепа;  $\sigma_{St}$  – предел прочности материала заготовки при температуре раскатки.

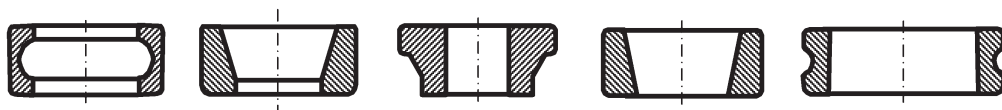


Рис. 7.23. Некоторые формы поковок, изготавливаемых горячей раскаткой

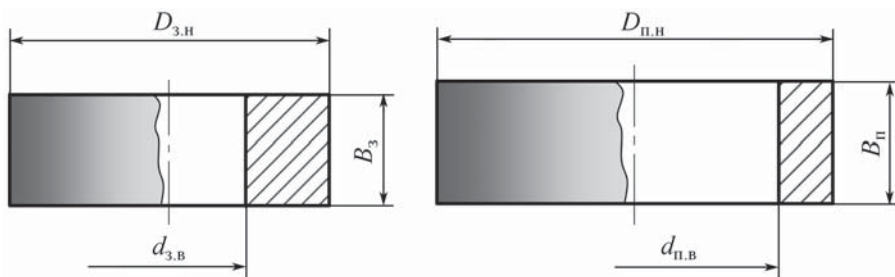


Рис. 7.24. Эскизы исходной заготовки (а) и поковки (б) после раскатки

Площадь контакта  $F_{к.м}$  можно определить по выражению

$$F_{к.м} = \frac{B_3 - B_п}{2} \sqrt{\frac{2 r_1 r_2}{r_1 + r_2} \Delta l}, \quad (7.16)$$

где  $B_3$  и  $B_п$  — высота заготовки до раскатки и высота поковки после раскатки, мм;  $r_1$  и  $r_2$  — радиусы соответственно нажимного и раскатного валков, мм;  $\Delta l$  — линейное обжатие, мм, вычисляемое по формуле

$$\Delta l = (D_{3.н} - d_{3.в})/2 - (D_{п.н} - d_{п.в})/2. \quad (7.17)$$

Полуоткрытый способ раскатки отличается от открытого наличием двух пар свободно вращающихся конических роликов, которые обжимают в процессе раскатки торцы заготовки, обеспечивая ее требуемые размеры по высоте.

При закрытой раскатке нажимной валок выполняют в виде матрицы. Из матрицы готовую поковку удаляют с помощью выталкивателя. Исходные заготовки кольцеобразной формы под раскатку получают свободной ковкой на молотах или прессах, штамповкой на ГKM, а также литьем.

#### 7.1.9.2. Способ и устройство для повышения точности раскатываемых кольцевых заготовок

Одним из отрицательных моментов процесса раскатки является возникновение вибрации заготовки в ходе деформирования. Для снижения вибраций и стабилизации процесса раскатки применяют один (как показано на рис. 7.21) или два упорных ролика, устанавливаемых симметрично относительно плоскости деформирования заготовки, проходящей через оси нажимного и раскатного валков. Дополнительно (для снижения вибраций) к исходной заготовке под раскатку предъявляются повышенные требования по цилиндричности (округлости). Несмотря на применяемые меры, раскатанные кольцевые заготовки имеют значительную эллиптичность, что снижает коэффициент использования металла при ее дальнейшей обработке.

В ОАО "НПО Сатурн" (г. Рыбинск) разработаны способ и устройство, позволяющие уменьшить овальность или эллиптичность раскатываемых заготовок путем снижения их вибрации в процессе раскатки и повысить тем самым работоспособность раскатного оборудования (патенты РФ № 2257973, 2243054).

Сущность способа поясняется рис. 7.25–7.27. На рис. 7.25 приведена схема раскатки кольцевой заготовки. На этой схеме показаны заготовка 1, установленная между центральным 2 и нажимным 3 валками, ролики 4, расположенные симметрично относительно плоскости деформирования 5, проходящей через оси 6 и 7 валков 2 и 3; касательная 8 к центральному валку 2; точка пересечения 9 касательной 8 с наружной цилиндрической поверхностью 10 готового изделия; нормаль 11 к наружной цилиндрической поверхности 10 готового изделия, проходящая через точку 9 и образующая с плоскостью деформирования 5 угол  $\varphi$ . Здесь же показаны точка 12 контакта упорных роликов 4 с наружной цилиндрической поверхностью 10 готового изделия; проходящая через эту точку нормаль 13, образующая с плоскостью деформирования 5 угол  $\beta$ .

Кроме того, слева видна вторая точка контакта упорного ролика с наружной поверхностью изделия, аналогичная точке 12, к которой приложена сила  $P$  – сила воздействия упорного ролика на деталь или заготовку в процессе ее раскатки, и приведены две составляющие этой силы:  $P_r$  – горизонтальная и  $P_v$  – вертикальная. Точка  $O$  является точкой образования мгновенного пластического шарнира при раскатке заготовки.

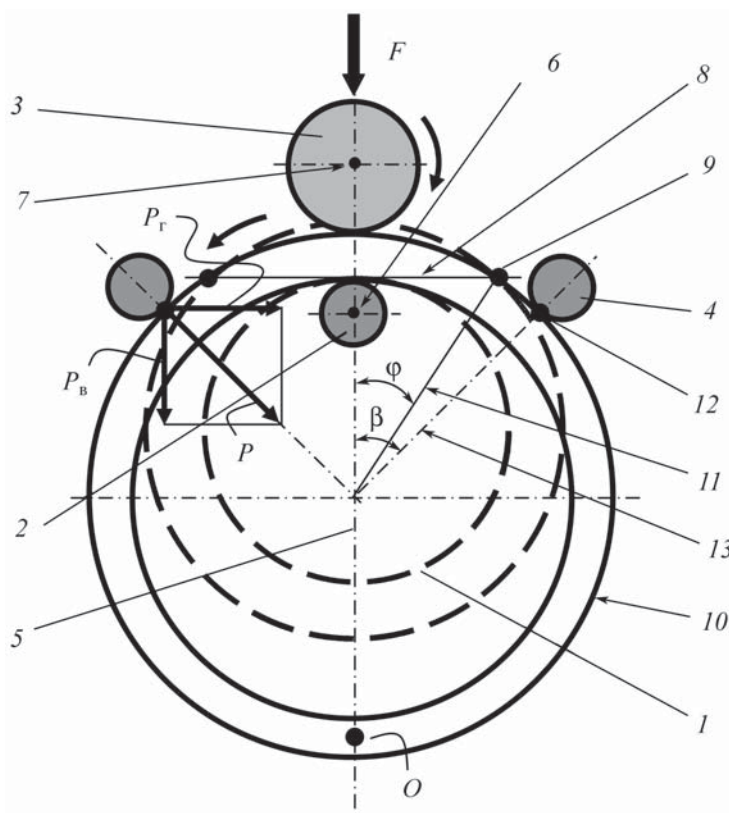


Рис. 7.25. Схема раскатки кольцевой заготовки

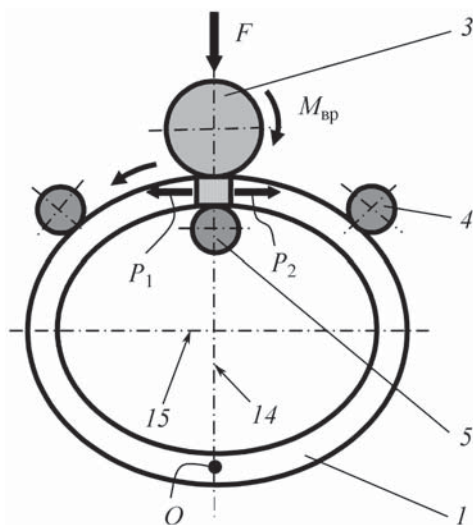


Рис. 7.26. Промежуточный этап калибровки раскатываемой и кольцевой заготовки

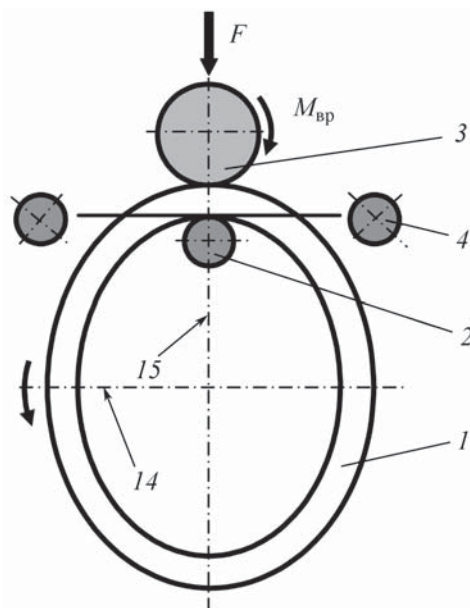


Рис. 7.27. Промежуточный этап раскатки кольцевой заготовки

На рис. 7.26 представлен промежуточный этап калибровки кольцевой заготовки при совмещении плоскости деформирования 5 и малой оси 14 эллипсной заготовки.

На рис. 7.27 показан промежуточный этап раскатки кольцевой заготовки при совмещении плоскости деформирования 5 с большой осью 15 эллипсной заготовки.

Способ реализуют следующим образом.

Первоначально устанавливают нажимные ролики 4 относительно валков 2 и 3.

Положение точек контакта 12 роликов 4 с заготовкой 1 выбирают из условия  $\varphi < \beta < \pi/4$ , где  $\varphi$  – угол между плоскостью деформирования 5 и нормалью 11, проходящей через точку 9 пересечения наружной цилиндрической поверхности готового изделия 10 и касательной 8 к центральному валку 2, перпендикулярной к плоскости деформирования 5. Точки 12 располагаются симметрично относительно плоскости деформирования 5 на наружной цилиндрической поверхности, которую должна иметь раскатанная заготовка 1, и определяются углами  $\beta$ .

Практически установка упорных роликов 4 в точки 12 может быть выполнена с помощью шаблона или путем использования холодного образца раскатанной кольцевой заготовки с нанесенными метками.

После настройки упорных роликов 4 их синхронно отводят от точек 12 и на центральный валок 2 устанавливают нагретую до ковочных температур исходную заготовку 1. Затем осуществляют синхронный подвод упорных роликов 4 к заготовке 1 до обеспечения контакта роликов 4 и заготовки 1 с силой, исключающей пластическую деформацию заготовки 1.



Затем к поверхности кольцевой заготовки  $I$  подводят вращающийся нажимной валок  $3$  с обеспечением пластического контакта с заготовкой  $I$ , в которой при этом формируется очаг пластической деформации (не показан). Под действием вращающего момента  $M_{\text{вр}}$ , прикладываемого к заготовке  $I$  нажимным валком  $3$ , и силы  $F$  со стороны валка  $3$ , заготовка получает вращательное движение. При этом стенка заготовки  $I$  утоняется в очаге пластической деформации, увеличивая таким образом наружный и внутренний диаметры.

В процессе раскатки заготовки  $I$  валками  $2$  и  $3$  в очаге пластической деформации происходят утонение стенки заготовки  $I$  и приращение ее длины. Вне очага деформации материал заготовки  $I$  находится в упругом состоянии. При этом силы  $P_1$  и  $P_2$  (см. рис. 7.26), возникающие в очаге пластической деформации, создают встречные изгибающие моменты относительно точки  $O$  как наиболее удаленной от очага деформации и расположенной в плоскости деформирования  $5$ . При деформации стенки заготовки  $I$  с уменьшением ее толщины и возрастанием диаметра в точке  $O$  под действием изгибающего момента образуется мгновенный пластический шарнир. При этом раскатываемая кольцевая заготовка  $I$  вблизи точки  $O$  уменьшает свою кривизну, стремясь минимизировать воздействующий на нее изгибающий момент путем уменьшения расстояния между точкой  $O$  и очагом пластической деформации. Это сопровождается образованием овала или эллипса с малой осью  $14$ , расположенной в плоскости деформирования  $5$ .

В этом случае упорные ролики  $4$  оказывают на заготовку  $I$  реактивное силовое воздействие с силой  $P$ , вертикальная составляющая которой  $P_v$  создает изгибающий реактивный момент, равный произведению силы  $P_v$  на плечо, т.е. расстояние от точки  $12$  до плоскости деформирования  $5$ , который препятствует увеличению овальности или эллипсности заготовки  $I$ .

Положение упорных роликов  $4$  относительно плоскости деформирования  $5$ , характеризующее углом  $\beta$ , способствует возрастанию изгибающего реактивного момента при увеличении угла  $\beta$  от  $\beta = \varphi$  до  $\beta = \pi/4$  путем удлинения плеча, т.е. расстояния между точками контакта  $12$  упорных роликов и плоскостью деформирования  $5$ .

При положении точек контакта  $12$  упорных роликов  $4$  с заготовкой  $I$ , характеризующего углом  $\beta < \varphi$ , эффективность их работы при раскатке резко снижается вследствие существенного уменьшения плеча сил, создающего реактивный изгибающий момент, а при  $\beta > \pi/4$  хотя и наблюдается некоторое увеличение плеча вертикальной составляющей силы  $P_v$ , но вертикальная составляющая силы  $P$  резко снижается и при  $\beta = \pi/2$  обращается в ноль.

На завершающей стадии раскатки, при калибровке раскатанной заготовки  $I$ , уменьшается степень деформации ее стенки. При этом силы  $P_v$  и  $P_t$  в очаге пластической деформации убывают. При этом становится меньше и изгибающий момент, влияющий на изменение эллипсности заготовки  $I$ . Так как на предыдущей стадии раскатки заготовка  $I$  уже приобрела определенную эллипсность, то приращение длины заготовки  $I$  будет приближаться к нулю. При этом, когда большая ось эллипса заготовки  $I$  совпадет с нормалью  $13$ , на которой расположены точки контакта  $12$  роликов  $4$  с заготовкой  $I$ , реактивное давление роликов  $4$  будет уменьшать эллипсность заготовки. Причем, если сила со стороны заготовки  $I$  превысит силу, с которой ролики  $4$  давят на заготовку  $I$ , то ролики  $4$  начнут перемещаться в сторону от заготовки  $I$  до тех пор, пока сила на них не сравняется с силой, действующей на ролики со стороны заготовки  $I$ .



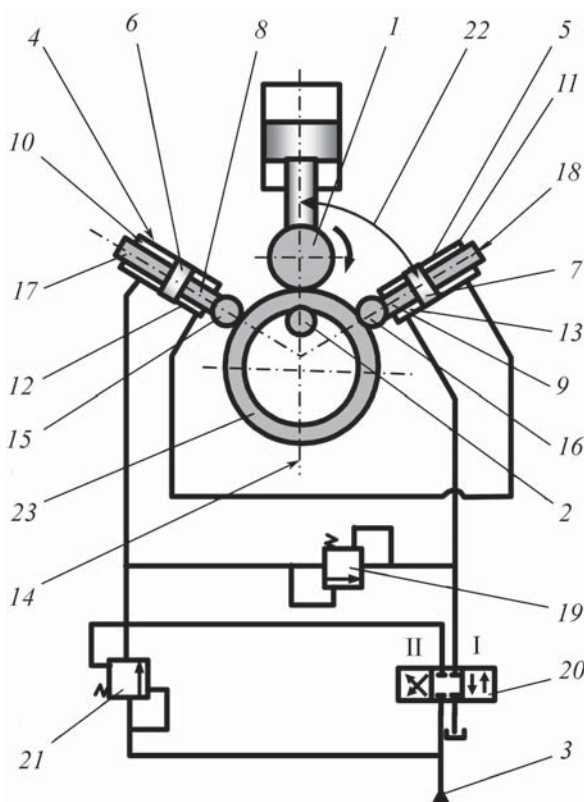


**Рис. 7.28. Гидромеханическая схема машины для раскатки кольцевых заготовок (патент РФ № 2243054)**

Когда малая ось 14 эллипса заготовки приблизится к нормали с плоскостью деформирования, то между роликами 4 и заготовкой 1 образуется зазор, и ролики 4 не будут оказывать на заготовку 1 силового воздействия.

Таким образом, в процессе калибровки заготовки наряду с незначительным увеличением ее диаметра уменьшают эллипсность заготовки до величины, не превышающей увеличения диаметра заготовки за один оборот ее вращения.

Для реализации описанного способа раскатки кольцевых заготовок разработано устройство, гидромеханическая схема которого приведена на рис. 7.28.

Устройство содержит наружный 1 и внутренний 2 валки, источник давления 3, одинаковые гидроцилиндры 4 и 5 с поршнями 6 и 7 и основными штоками 8 и 9 с образованием подпоршневых 10, 11 и штоковых полостей 12, 13. Подпоршневая полость 10 цилиндра 4 и штоковая полость 13 цилиндра 5 гидравлически связаны с источником давления 3. На штоках 8 и 9 жестко закреплены опорные ролики 15 и 16. Поршни 6 и 7 цилиндров 4 и 5 снабжены дополнительными штоками 17 и 18, идентичными основным штокам 8 и 9. Штоки 17 и 18 расположены в подпоршневых полостях 10 и 11 цилиндров 4 и 5.

Устройство также снабжено гидроклапаном давления 19 и гидрораспределителем 20. Подпоршневая полость 10 цилиндра 4 гидравлически связана со штоковой полостью 13 цилиндра 5 через гидроклапан давления 19 с образованием замкнутой системы. Подпоршневая полость 10 цилиндра 4 и штоковая полость 13 цилиндра 5 также сообщены с источником давления 3 через гидрораспределитель 20. Штоковая полость 12 цилиндра 4 гидравлически связана с подпоршневой полостью 11 цилиндра 5.

Кроме того, устройство также снабжено гидроклапаном разности давлений 21, гидравлически соединенным с источником давления 3 и замкнутой системой между цилиндром 4 и гидроклапаном давления 19.

Цилиндры 4 и 5 расположены по обе стороны от плоскости деформирования 14, проходящей через оси валков 1 и 2, под углом 22 к ней.

Устройство работает следующим образом. На внутренний валок 2 устанавливают нагретую до ковочных температур заготовку 23 и переключают гидрораспределитель 20 в положение I. При этом основные штоки 8 и 9 цилиндров 4 и 5 синхронно перемещаются в сторону заготовки 23 до упругого контакта опорных роликов 15 и 16 с поверхностью заготовки. Затем гидрораспределитель 20 переключают в положение "0", подводят вращающийся наружный валок 1 до пластического (силового) контакта с заготовкой 23. При этом последняя благодаря силам трения начинает вращаться и пластически деформироваться, уменьшая толщину стенки за каждый оборот и увеличивая свои внутренние и наружные диаметры, принимая в общем случае овальную или эллипсную форму. Одновременно заготовка давит на один из опорных роликов, например ролик 15, отодвигая его с силой, регулируемой гидроклапаном давления 19.

Рабочая жидкость (машинное масло), вытесняемая из подпоршневой полости 10 цилиндра 4, поступает в штоковую полость 13 цилиндра 5. Шток 9 с опорным роликом 16 перемещается от заготовки 23 на расстояние, равное перемещению штока 8 с опорным роликом 15, поскольку площади поршней 6 и 7 в штоковых 12, 13 и подпоршневых 10, 11 полостях каждого из цилиндров 4 и 5 равны из-за наличия в подпоршневых полостях 10 и 11 дополнительных штоков 17 и 18, идентичных основным штокам 8 и 9.

Заготовка в процессе раскатки приобретает форму, значительно отличающуюся от окружности, например в виде овала или эллипса.

После образования зазора между опорными роликами 15, 16 и заготовкой 23 в моменты, когда большая ось овала совмещается с плоскостью деформирования 14, перемещения опорных роликов 15 и 16 в сторону заготовки 23 не происходит, так как в замкнутую гидросистему масло не поступает, а гидрораспределитель 20 закрыт (находится в положении "0"). Гидроклапан 21 разности давлений пропускает масло только в одну сторону и служит для постоянной поддержки всех рабочих полостей указанных цилиндров под давлением, что компенсирует утечки масла и предотвращает образование воздушных пузырей в указанной замкнутой гидросистеме.

Следовательно, активного силового воздействия на раскатываемую заготовку 23 опорные ролики 15 и 16 не оказывают, но ограничивают амплитуду ее вибрации и стабилизируют положение заготовки, что способствует приданию заготовке 23 правильной формы окружности. (Точки контакта наружного валка 2 и опорных роликов 5 и 6 теоретически всегда будут располагаться на дуге окружности, в которую вписывается наружный диаметр кольцевой заготовки в процессе раскатки и калибровки.)

В конце цикла раскатки и калибровки заготовки 23 гидрораспределитель 20 устанавливают в положение II. При этом выполняется отвод опорных роликов 15 и 16 от заготовки 23. [Гидрораспределитель 20 может быть переключен вручную или автоматически при обеспечении контакта наружной поверхности заготовки с контрольным роликом (не показан).]

При наладочных перемещениях опорных роликов 15 и 16, например при их подводке к заготовке 23, гидрораспределитель 20 устанавливают в положение I. При этом гидроклапан 21 разности давлений закрывается, так как на его входе и выходе давление выравнивается. При отводе опорных роликов 15 и 16 от заготовки 23 гидроклапан 21 разности давлений работает как предохранительный клапан, поддерживая определенное давление в подводящей давление магистрали, и не влияет на синхронность перемещения опорных роликов 15 и 16.

В процессе работы устройство позволяет обеспечить силовой контакт опорных роликов с заготовкой только тогда, когда ее большая ось находится в плоскости, перпендикулярной к плоскости деформирования, и исключить его, когда в ней находится большая ось заготовки.

Устройство дает возможность подвергать раскатке исходные заготовки, имеющие значительные искажения геометрических размеров и формы, например полученные свободной ковкой, и обеспечивает изготовление раскатных колец с минимальными отклонениями их форм от окружности, обеспечивая тем самым высокий коэффициент использования металла при последующей обработке раскатанных поковок резанием.

#### 7.1.9.3. Электровысадочные машины

Электровысадочные машины характеризуются совмещением в одном агрегате механизмов, необходимых для деформации металла (преимущественно высадкой) и электронагрева очага пластической деформации заготовки.

Технологический процесс электровысадки как сплошных стержневых изделий, так и трубных заготовок позволяет получать значительный относительный набор металла (длиной до 20 диаметров исходной заготовки, идущей на образование утолщения). Процесс электровысадки применяют как для свободного набора металла, так и для его набора в жестких матрицах. Электровысадочные машины выполняют как горизонтального, так и вертикального исполнения. На рис. 7.29 представлена принципиальная схема электровысадочной машины.

Принцип работы электровысадочной машины заключается в следующем. Часть заготовки 4 помещают между двумя электрическими контактами: упорным 2 и радиальным 3. Контакты 3 изготавливают из материала с высокой электропроводностью (меди, бронзы). Радиальный контакт 3 выполняют разъемным: нижняя половина неподвижная, а верхняя перемещается с помощью плунжера гидроцилиндра 3, который обеспечивает надежный электрический контакт. Упорный контакт 2 закреплен на подвижных салазках, которые приводятся в движение с помощью гидроцилиндра 1. Скорость движения салазок регулируется клапанами 6.

В начале процесса электровысадки на контакты подается напряжение 2...7 В. При прохождении электрического тока через заготовку она нагревается на заданную температуру. Под действием силы, развиваемой рабочим цилиндром 5, нагретая заготовка деформируется. Затем в зону нагрева через радиальный контакт перемещается следующий участок заготовки.

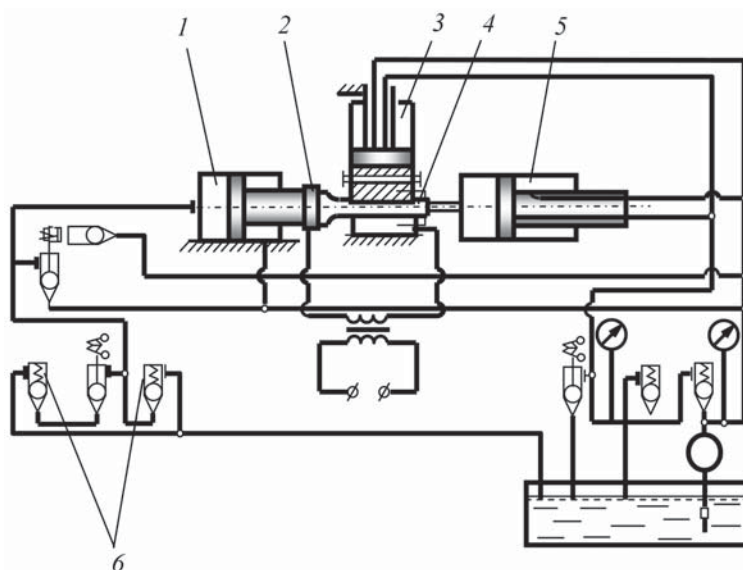


**Рис. 7.29. Гидромеханическая схема электровысадочной машины:**

1 и 3 — гидроцилиндры; 2 — электроконтакты; 4 — заготовка; 5 — рабочий гидроцилиндр;  
6 — насос; 7 — клапаны

Во время подачи заготовки упорный контакт 2 с определенной скоростью отходит назад. Такая последовательность работы исполнительных механизмов машины дает возможность начинать высадку нагретой части заготовки при небольшой ее длине ( $\leq 2 \dots 2,5$  диаметра). Это обеспечивает продольную устойчивость заготовки в зоне деформации.

Совершенствование электровысадочных машин и их полная автоматизация позволяют использовать их в массовом производстве однотипных деталей.

Встройка электровысадочных машин в автоматические линии совместно с ГШКП и другим оборудованием значительно расширяет технологические возможности производства и область применения процессов электровысадки.

#### 7.1.9.4. Вертикально-ковочные и радиально-обжимные машины

Вертикально-ковочные машины предназначены для изготовления мелких поковок простейшей формы последовательной протяжкой и осадкой. Они отличаются от традиционных кривошипных машин отсутствием жесткой связи между кривошипным валом и ползуном. Из-за сложности автоматизации в настоящее время эти машины не выпускают.

Радиально-обжимные машины служат для изготовления длинномерных заготовок (поковок). Они оснащаются числовым программным управлением и используются при производстве, например, заготовок ступенчатых валов с цилиндрическими и коническими участками, а также для профилирования прутковых и трубных заготовок.

Высокая производительность машин этой группы в сочетании со сравнительно легкой переналадкой обусловили их широкое применение в крупно- и мелкосерийном производствах.

Благодаря сравнительно высокой точности заготовок, получаемых ковкой на радиально-обжимных машинах, значительно сокращается трудоемкость их последующей обработки резанием.

#### 7.1.10. Основные характеристики оборудования дляковки и штамповки

К основным характеристикам оборудования дляковки и штамповки относят:

- число ходов (ударов) в минуту;
- скорость рабочего хода, м/с;
- открытую и закрытую высоты рабочей зоны (для прессов), мм;
- возможность регулировки закрытой высоты рабочей зоны;
- габаритные размеры стола (для прессов), мм;
- номинальную силу, МН;
- массу падающих частей (для молотов), кг.

Основные параметры ГШКП регламентирует ГОСТ 6809–87, основные параметры ГKM – ГОСТ 7023–89.

#### 7.1.11. Выбор оборудования

Основными критериями для выбора кузнечно-штамповочного оборудования являются: для молота – масса падающих частей; для ГШКП – сила, развиваемая прессом, размеры стола пресса, открытая и закрытая высоты рабочей зоны пресса.

Как правило, пресс или молот выбирают по силе осадки, которая является максимальной среди сил, необходимых для выполнения иных технологических операцийковки. Поэтому расчет требуемой силы осадки и выбор соответствующего данной силе оборудования имеют важное практическое значение.

**Выбор молота.** Молот выбирают по необходимой работе деформации за последний удар. Это объясняется тем, что при предшествующих ударах работа деформации, пропорциональная площади поковки, меньше, чем при последнем ударе.

Для определения силы тяжести падающих частей молота рекомендуется следующая формула:

$$G = 1,5 \cdot 10^2 \sigma_{\text{в}} \left( 1 + 0,17 \frac{D_1}{H_1} \right) \varepsilon V, \quad (7.18)$$

где  $G$  – сила тяжести падающих частей молота, т;  $D_1$  и  $H_1$  – соответственно средний диаметр и высота заготовки после осадки, м;  $\sigma_{\text{в}}$  – предел прочности деформируемого металла при температуре концаковки, МПа;  $\varepsilon$  – относительная деформация заготовки за последний удар ( $\varepsilon = 0,025 \dots 0,06$ );  $V$  – объем поковки, м<sup>3</sup>.

Средний диаметр поковки без учета бочкообразования при осадке можно определить по выражению

$$D_1 = D_0 \sqrt{\frac{H_0}{H_1}}, \quad (7.19)$$

где  $D_0$  и  $H_0$  – исходные диаметр и высота заготовки соответственно, мм.

Предел прочности деформируемого металла  $\sigma_b$  выбирают, пользуясь справочными данными. Относительную деформацию  $\varepsilon$  принимают равной для крупных поковок 0,025, для мелких 0,06.

*Пример.* Определить силу тяжести падающих частей молота, необходимую для осадки заготовки следующих размеров:  $D_0 = 100$  мм и  $H_0 = 180$  мм до высоты  $H_1 = 90$  мм. Материал заготовки — сталь 20.

*Решение.* По таблице для стали 20 определяем температурный интервал штамповки: начало 1200 °С, окончание 900 °С. По справочнику находим, что для стали 20 при температуре концаковки 900 °С,  $\sigma_b = 4,5$  кгс/мм<sup>2</sup> = 45 МПа.

Вычисляем средний диаметр после осадки:

$$D_1 = D_0 \sqrt{\frac{H_0}{H_1}} = 100 \sqrt{\frac{180}{90}} = 100 \cdot 1,4142 \approx 141 \text{ мм} \quad (0,141 \text{ м}). \quad (7.20)$$

Затем находим объем заготовки:

$$V = \frac{\pi D^2}{4} H_0 = \frac{3,14 \cdot 0,1^2}{4} 0,18 \approx 1,41 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3. \quad (7.21)$$

Величину относительной деформации заготовки выбираем равной  $\varepsilon = 0,06$ , так как осадке подвергается сравнительно небольшая заготовка.

Далее определяем силу тяжести падающих частей молота:

$$\begin{aligned} G &= 1,5 \cdot 10^2 \sigma_b \left( 1 + 0,17 \frac{D_1}{H_1} \right) \varepsilon V = \\ &= 1,5 \cdot 10^2 \cdot 45 \left( 1 + 0,17 \frac{141}{90} \right) 0,06 \cdot 1,41 \cdot 10^{-3} = 0,725 \text{ т}. \end{aligned} \quad (7.22)$$

Выбираем молот с массой падающих частей  $G = 1$  т.

**Выбор прессы.** Пресс, так же как и молот, рекомендуется выбирать по силе, необходимой для выполнения операции осадки. При этом для определения силы прессы можно воспользоваться выражением

$$P = \psi \sigma_b \left( 1 + 0,17 \frac{D_1}{H_1} \right) F, \quad (7.23)$$

где  $P$  — сила прессы, МН;  $\psi$  — масштабный коэффициент;  $D_1$   $H_1$  — соответственно диаметр и высота заготовки после осадки, м;  $F$  — площадь поперечного сечения поковки после осадки, м<sup>2</sup>.

При осадке крупных заготовок на прессах металл охлаждается менее интенсивно, чем при осадке мелких поковок. Это учитывают, вводя масштабный коэффициент  $\psi$ . Чем больше масса поковки, тем меньше  $\psi$ . Для поковок массой 0,5 т коэффициент  $\psi = 0,8$ ; при массе поковки ~100 т он равен 0,5.

*Пример.* Определить необходимую силу прессы для осадки заготовки с исходными размерами  $D_0 = 0,75$  м,  $H_0 = 1$  м до высоты  $H_1 = 0,6$  м. Материал заготовки — сталь 45.

*Решение.* По таблице находим температурный интервал ковки для стали 45: начало 1200 °С, окончание 1050 °С. Далее определяем: для стали 45 при температуре конца ковки 1050 °С  $\sigma_b = 5,1 \text{ кгс/мм}^2$  (51 МПа). Масса заготовки ~4 т, поэтому принимаем  $\psi = 0,75$ .

Средний диаметр заготовки после осадки

$$D_1 = D_0 \sqrt{\frac{H_0}{H_1}} = 0,75 \sqrt{\frac{1}{0,6}} = 0,968 \text{ м.} \quad (7.24)$$

Площадь поперечного сечения заготовки после осадки

$$F_1 = \frac{\pi D_1^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,968^2}{4} \approx 0,74 \text{ м}^2. \quad (7.25)$$

Тогда сила прессы

$$P = \psi \sigma_b \left(1 \pm 0,17 \frac{D_1}{H_1}\right) F_1 = 0,75 \cdot 51 \left(1 + 0,17 \frac{968}{600}\right) 0,74 \approx 36 \text{ МН.} \quad (7.26)$$

Выбираем пресс силой 50 МН.

В данном разделе на простейших примерах показан принцип выбора кузнечного оборудования для технологической операции осадка, являющейся одной из наиболее распространенных кузнечных операций.

При выборе оборудования для более сложных технологических операций, для расчета силы прессы и массы падающих частей молота, необходимо пользоваться специальной литературой и справочниками.

## 7.2. ВСПОМОГАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

К вспомогательному оборудованию кузнечно-штамповочных цехов относят оборудование для резки проката, очистки поковок от окалины и для термообработки поковок.

**Резка проката на штучные заготовки.** Для резки сортового проката круглого, квадратного или шестигранного сечения на мерные заготовки применяют пресс-ножницы, дисковые и ленточные пилы, станки для резки тонкими абразивными кругами, хладноломы, станки для электроэрозионной резки и другое оборудование.

Резку проката на мерные заготовки, как правило, осуществляют в заготовительных группах кузнечно-штамповочных цехов. Наиболее распространена и высокопроизводительна резка проката на пресс-ножницах. Для обеспечения более качественной поверхности реза и достаточно точной длины штучной заготовки используют резку на ленточных или дисковых пилах. Для небольших диаметров поперечных сечений применяют резку на отрезных станках с помощью абразивных кругов. Резку заготовок из жаропрочных материалов часто выполняют на станках для электроэрозионной и лазерной резки.

Для удаления заусенцев на отрезанных заготовках служат наждачные станки. Их также используют и при зачистке заусенцев и острых кромок после обрезки (у поковок и штамповок) облоя.



**Очистка поковок от окалины.** Чистота поверхности поковок (штамповок) очень значима при оценке их качества. Это особо важно для поковок (штамповок) с точными размерами, не подвергающихся дальнейшей обработке резанием или имеющих минимальный припуск, например, на шлифовку.

Очистка от окалины должна проводиться на всех этапах кузнечного производства: перед штамповкой, после термической обработки, между операциями штамповки и после выполнения окончательной штамповки.

В зависимости от технических условий, марки материала поковки, ее размера, массы применяют различные способы очистки от окалины: дробеметную, дробе- и пескоструйную, галтовку, травление, очистку ультразвуком, гидравлическую и механическую очистку и другие методы.

**Дробеметная очистка** поковок наиболее производительна и универсальна. К тому же она обходится в несколько раз дешевле, чем очистка другими способами. Дробеметную очистку осуществляют струей металлической дроби, выбрасываемой на поковку лопатками быстро вращающегося колеса турбины. Скорость летящих дробинок достигает до 60 м/с.

**Дробеструйная очистка.** Дробеструйную очистку выполняют с помощью специальных устройств, из сопел которых под действием сжатого воздуха дробь вылетает с большими силой и скоростью, и, ударяясь о поверхность поковки, очищает ее. Этот способ очистки несколько уступает дробеметному по производительности и экономичности, будучи столь же универсальным.

**Пескоструйная очистка.** Пескоструйную очистку применяют в основном для мелких и тонких поковок, для которых нежелательно поверхностное упрочнение, а также для поковок из мягких и цветных сплавов. Ее можно осуществлять как сухим песком, так и мокрым, смешанным с жидкостью; такой вид очистки называют гидropескоструйной (или гидроабразивной).

**Травление.** Травление проводят двумя способами: электролитическим и химическим.

Электролитическое травление не нашло широкого применения в кузнечно-штамповочных цехах из-за сложности реализации и недостаточной экономичности.

Химическое травление применяют в кузнечно-штамповочных цехах, довольно часто оно является универсальным и надежным способом удаления окалины. Его используют главным образом для очистки ответственных поковок и поковок сложной конфигурации с внутренними отверстиями, когда очистка окалины другими способами либо затруднена, либо невозможна.

Травление проводят следующим образом. Поковки укладывают в специальную кислотостойкую тару, погружают в ванну с растворами кислот или щелочей с последующими нейтрализацией и промывкой в горячей и холодной воде. Для интенсификации процесса травления растворы подогревают. Для травления различных материалов используют ванны различного состава.

**Галтовку** поковок осуществляют в специальных галтовочных барабанах следующим образом: поковки средних размеров (до 30 кг) загружают во вращающийся барабан вместе с абразивным боем и т.п. При вращении барабана поковки перекатываются, ударяются друг о друга и об абразивные остатки и очищаются от окалины.

**Ультразвуковой способ очистки** от окалины не получил широкого распространения в кузнечно-штамповочных цехах.



**Гидравлическую очистку** выполняют так: горячую заготовку подвергают воздействию струи холодной воды высокого давления. Под действием воды окалина охлаждается, сжимается, растрескивается и смывается с поверхности заготовки струей воды. Данный способ очистки наиболее эффективен для удаления окалина под последующую штамповку при изготовлении поковок с точными размерами и малыми припусками.

**Механический способ очистки.** Механическую очистку также применяют при очистке заготовок под штамповку, часто непосредственно на рабочем месте. Для этого служат различные металлические скребки, щетки и т.п.

**Термическое оборудование.** Для термической обработки поковок в основном используют различные электрические печи. Эти печи подразделяют, как было описано ранее, по габаритным размерам, рабочим температурам и конструктивным особенностям. Термическую обработку в кузнечно-штамповочных цехах применяют для снятия остаточных напряжений как между операциями штамповки, так и после окончательной штамповки.

## Глава 8

# ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ РУЧНОЙ КОВКИ И КОВКИ НА МОЛОТАХ

### 8.1. ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ РУЧНОЙ КОВКИ

Ручную ковку главным образом применяют при ремонтных и сборочных работах, а также при изготовлении уникальных, в том числе художественных изделий в небольших количествах. В связи с этим в настоящее время ручная ковка получает интенсивное развитие.

В зависимости от вида ковки кузнечный инструмент подразделяют на инструмент для ручной и машинной ковки. По функциональному назначению весь кузнечный инструмент классифицируют на основной технологический; поддерживающий и контрольно-измерительный. В зависимости от характера использования инструмент может быть универсальным и специализированным.

Основным технологическим называют инструмент, непосредственно деформирующий металл и придающий ему заданные чертежом поковки формы и размеры. В свою очередь, основной технологический инструмент для ручной ковки по назначению подразделяется на опорный, ударный и подкладной.

#### 8.1.1. Основной технологический инструмент для ручной ковки

Операции ручной ковки, такие как протяжка, осадка, гибка, пробивка и прошив-ка отверстий, разрубка, кузнечная сварка и правка, выполняют с применением опорного инструмента, к которому относят наковальни (рис. 8.1). Их изготавливают литьем из стали марки 45Л массой 70...350 кг. Верхнюю плоскую часть наковальни называют лицом. Иногда на лицо сверху приваривают стальную пластину толщиной до 30...40 мм, которую именуют наличником. После термической обработки твердость лица или наличника должна составлять 40...45 HRC.

По числу конических частей, называемых рогами, различают три типа наковален: безрогие (ГОСТ 11396–75), однорогие (ГОСТ 11397–75) и двурогие (ГОСТ 11398–75). Рога наковален используют, например, при выполнении операций гибки и ковки пустотелых поковок. На плоской части наковален обычно вы-

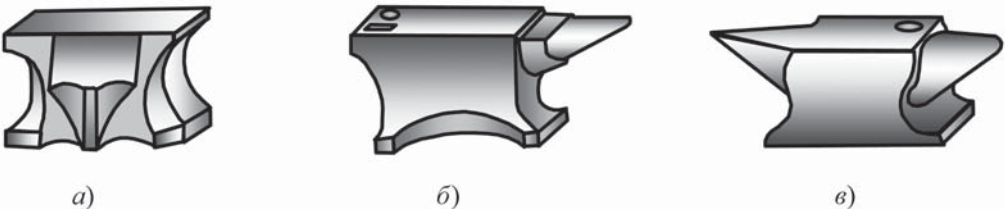


**Рис. 8.1. Наковальни:**  
а — безрогая; б — однорогая; в — двурогая

полняют два сквозных отверстия: круглое для пробивки отверстий в заготовках и квадратное — для установки подкладного инструмента.

Нижняя часть наковальни — башмак имеет четыре лапы, которыми с помощью костылей или хомутов наковальня крепится к стулу. Последний представляет собой бетонную тумбу или деревянный чурбак, вкопанный в землю на глубину 1...1,5 м. При этом лицевая поверхность наковальни должна находиться на расстоянии 750...800 мм над уровнем пола.

**Шперак** (ГОСТ 11400–75) — небольшая наковальня (рис. 8.2) с двумя рогами массой до 50 кг. Изготавливают ее литьем или ковкой из стали 45. Его наличник имеет твердость 40...45 HRC. Шперак устанавливают в квадратное отверстие наковальни.



Рис. 8.2. Шперак

**Ударным инструментом** при ручной ковке являются кувалды и молотки. Последние иногда называют ручниками. Кузнец пользуется молотком как для нанесения ударов, так и для указания молотобойцу места удара кувалдой при обработке сравнительно крупных заготовок. Молотки изготавливают массой 0,5...2 кг ковкой из стали У7 или У8.

Молоток содержит два бойка, один из которых круглый или квадратный, иногда восьмигранный, имеет гладкую ударную поверхность с заваленными гранями. Другой боек, называемый также задком, или носком, может быть шарообразным, заостренным с округлым ребром или тупым. Бойки молотка подвергают закалке с последующим отпускком.

**Кувалды** — основной инструмент при ручной ковке. Они служат для нанесения ударов по нагретой до ковочных температур заготовке, также имеют два бойка и подразделяются на тупо- (ГОСТ 11401–75) и остроносые (ГОСТ 11402–75) (рис. 8.3). Масса кувалд равна 2...16 кг. Остроносые кувалды могут быть с поперечным или продольным расположением носков (задков).

Для закрепления рукоятки в кувалде предусматривается овальное насадное отверстие, которое расширяется от середины к краям. Кувалды изготавливают ковкой или штамповкой из сталей 40, 45, 50 и У7 с последующей обработкой резанием рабочих поверхностей. После термической обработки кувалд твердость рабочего слоя глубиной до 30 мм должна составлять 48...52 HRC.

**Кузнечные зубила** (ГОСТ 11418–75) производят из стали У7 и 6ХС и применяют для горячей и холодной рубки металла (рис. 8.4). Первые затачивают на угол  $\geq 60^\circ$ , вторые — на угол  $\leq 50^\circ$ . Лезвие зубил выполняют прямым, полукруглым или фасонным. Его твердость на длине ~30 мм от рабочей кромки равна 50...56 HRC, а твердость по ударяемой части на длине ~20 мм составляет 30...40 HRC.

**Гладилки** (рис. 8.5 и 8.6) используют для сглаживания неровностей и окончательной отделки

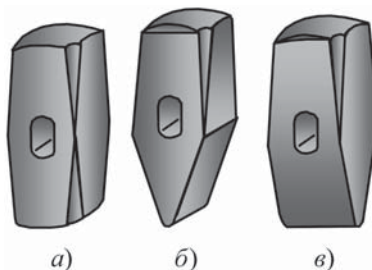


Рис. 8.3. Кувалды:  
а — тупоносая; б и в — остроносые с поперечным и продольным задками соответственно

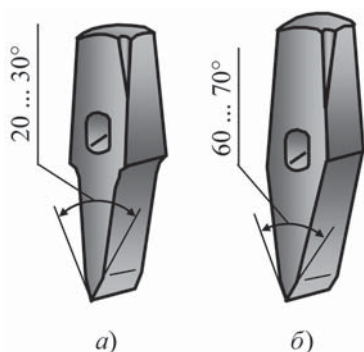


Рис. 8.4. Кузнечные зубила для холодной (а) и горячей (б) рубки

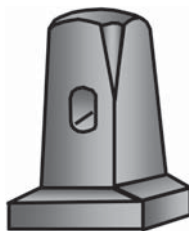
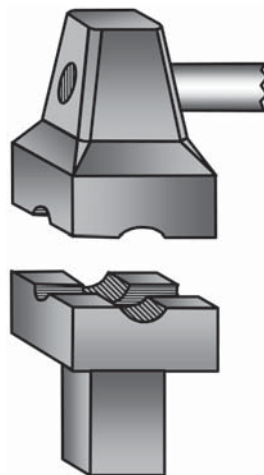


Рис. 8.5. Гладилка

Рис. 8.6. Гладилки → (верхняя и нижняя) для ковки крестообразной заготовки (конец XIX в.)



как плоских, так и фасонных поверхностей поковок; изготавливают ковкой или штамповкой из стали У7, сталей 40 и 45 с последующей обработкой резанием. Масса 1...5 кг.

**Пробойники**, или **бородки** (рис. 8.7), служат для пробивки круглых, квадратных, прямоугольных и иных отверстий; производят их ковкой из стали У7, сталей 40 и 45. Твердость рабочей части 40...45 HRC. Масса 0,7...2,0 кг.

**Подсечки** (рис. 8.8) изготавливают по ГОСТ 11420–75 из стали У7. Они являются подкладными зубилами и вставляются квадратным хвостовиком в такое же отверстие наковальни. Подсечки значительно ускоряют и облегчают процесс рубки. Лезвие подсечки может быть прямым и фасонным. Его закаливают до твердости 48...52 HRC.

**Обжимки** (рис. 8.9) применяют для подкатки и отделки боковых и иных поверхностей поковок. Они состоят из двух частей: нижней (нижника), вставляемой хвостовиком в наковальню, и верхней (вершника), насаженной на ручку. Обжимки получают ковкой из стали У7, сталей 40, 45, 50, 40Х, обрабатывают резанием и подвер-

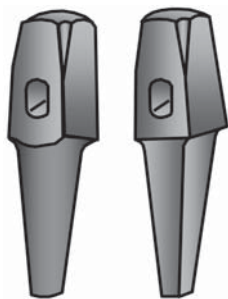


Рис. 8.7. Пробойники



Рис. 8.8. Подсечка

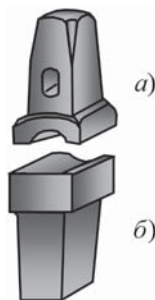


Рис. 8.9. Верхняя (а) и нижняя (б) обжимки

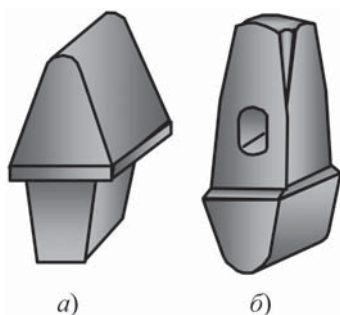


**Рис. 8.10. Полукруглые подбойки:**  
а — нижняя; б — верхняя

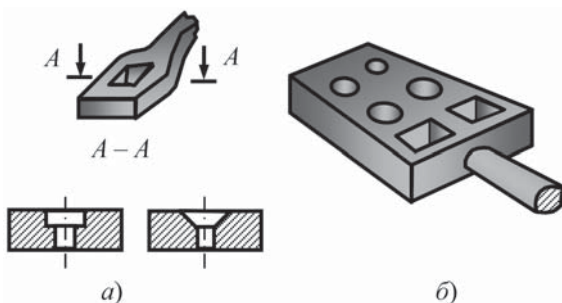


**Рис. 8.11. Гвоздильни:**  
а — простая; б — специальная

гают закалке с отпуском до твердости 48...52 HRC по рабочей части и 30...40 HRC — по ударяемой. Масса обжимок колеблется в диапазоне от 3 до 25...35 кг.

**Подбойки** (рис. 8.10) используют для протяжки, выполнения желобов, вогнутых поверхностей, а также для отделки некоторых участков или всей поверхности поковки. Форма рабочих участков подбоек определяется их назначением и может быть самой разнообразной: плоской, серповидной и т.п. Изготавливают подбойки ковкой из стали У7, сталей 50Г, 40Х с твердостью рабочих частей 40...45 HRC.

**Гвоздильни** (рис. 8.11) — металлические пластины, изготовленные ковкой из сталей 45 или У7. Имеют отверстия для высадки головок болтов, заклепок, гвоздей и т.д.

**Кузнечная форма** (рис. 8.12) — литая плита из стали 35Л или 40Л массой до 50 кг со сквозными отверстиями и фасонными вырезами на боковых поверхностях. Предназначена для отделки поковок, пробивки отверстий и профильно-гибочных работ.

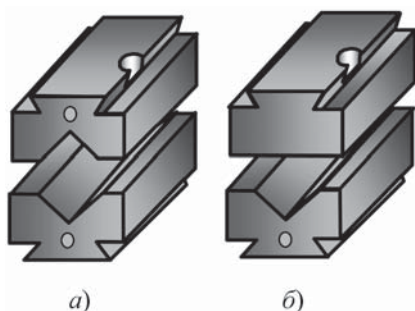


**Рис. 8.12. Кузнечная форма**

## 8.2. ОСНОВНОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ МАШИННОЙ КОВКИ

К основному инструменту, применяемому при ковке на молотах и прессах, относят бойки, топоры с различной формой рабочей части, квадраты, пережимки, раскатки, обжимки, прошивки, наставки, оправки для протяжки и раскатки.

**Бойки** (рис. 8.13) применяют в основном для протяжки, а также осадки, прошивки, гибки и некоторых других операцийковки. В комплект входят два бойка: нижний, неподвижный, выполняющий одновременно роль опоры; верхний, подвижный, через который передается деформирующая нагрузка на заготовку от молота или пресса. Различают универсальные бойки, имеющие плоские рабочие поверх-

**Рис. 8.13. Бойки:**

*а* — нижний и верхний вырезные;  
*б* — верхний плоский и нижний  
 вырезной

ности (рис. 8.14, *а*) и вырезные (фасонные) (рис. 8.14, *б–г*), отличающиеся специальным профилем.

Чем большей площадью вырез (калибр) бойков охватывает поверхность обрабатываемой заготовки, тем меньше при ковке уширение заготовки и тем интенсивнее происходит процесс протяжки. Однако необходимая сила для протяжки при этом значительно возрастает.

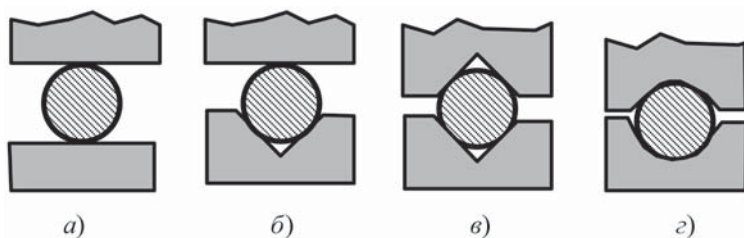
Рабочие поверхности плоских и соприкасающиеся поверхности вырезных и фасонных бойков выполняют строго горизонтальными и плотно, без зазоров, прилегающими друг к другу. На рабочих поверхностях бойков различных выбоин и вмятин не допускается. Во избежание перерезания волокон в поковке кромки рабочих поверхностей бойков всех типов в местах их пересечения с боковыми поверхностями скругляют по радиусу.

Дляковки в нижнем вырезном и верхнем плоском бойках нижний боек часто выполняют составным со вкладышами. Вкладыши позволяют быстро изменить размер и форму выреза на требуемые. Кроме того, по мере износа вкладышей облегчается их замена.

Цельные бойки и сменные вкладыши изготавливают ковкой в зависимости от условий работы из сталей 50, 50Г, 40ХН, 5ХНВ, 5ХГМ. После механической обработки подвергают термической обработке на твердость 40...45 HRC.

**Топоры** (рис. 8.15) применяют для осуществления операций отрубки части исходной или откованной заготовки или их разрубки на мерные заготовки. На рис. 8.16 приведена схема выполнения операции отрубки части заготовки кузнечным топором. В зависимости от назначения конструкции топоров, используемые в кузнечном деле, разнообразны.

Топоры изготавливают ковкой из стали 18ХНВА или стали 50, сталей 35ХМ, 5ХНВ, 7Х3, 8Х3, 5ХНМ, подвергают термообработке до твердости 40...45 HRC.

**Рис. 8.14. Рабочие поверхности бойков:**

*а* — плоские у верхнего и нижнего бойков; *б* — плоская у верхнего и вырезная у нижнего бойков; *в* — вырезная у верхнего и нижнего бойков; *г* — фасонная у верхнего и нижнего бойков

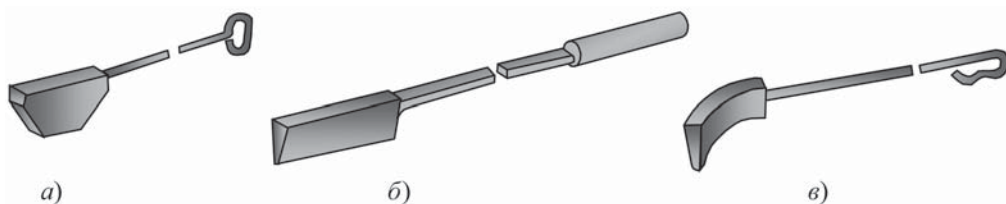


**Рис. 8.15. Кузнечные топоры:**

*а* — трапецеидальный топор для рубки в вырезном бойке; *б* — топор с цельной кованной ручкой; *в* — полукруглый

Ручки топоров делают из стали 20 или Ст 3. Крупные, тяжелые топоры изготавливают с быстросменными ручками или подвесными к траверсе пресса. Для облегчения работы с такими топорами часто используют манипуляторы.

**Пережимки** применяют для создания одно- или многосторонних углублений для последующего образования уступов или пережимов на заготовке.

Углубления на заготовке (засечки) служат для фиксации (или отметки) объема металла, который следует подвергнуть, например, протяжке, чтобы получить требуемую геометрию заготовки после ковки. Засечки обычно выполняют вдавливанием в заготовку круглого или прямоугольного прутка. Чтобы увеличить глубину засечки, например до образования уступа на заготовке, применяют пережимки различной геометрии.

На рис. 8.17 приведена схема выполнения операции пережима, а на рис. 8.18 — технологическая последовательность изготовления ступенчатой поковки протяж-

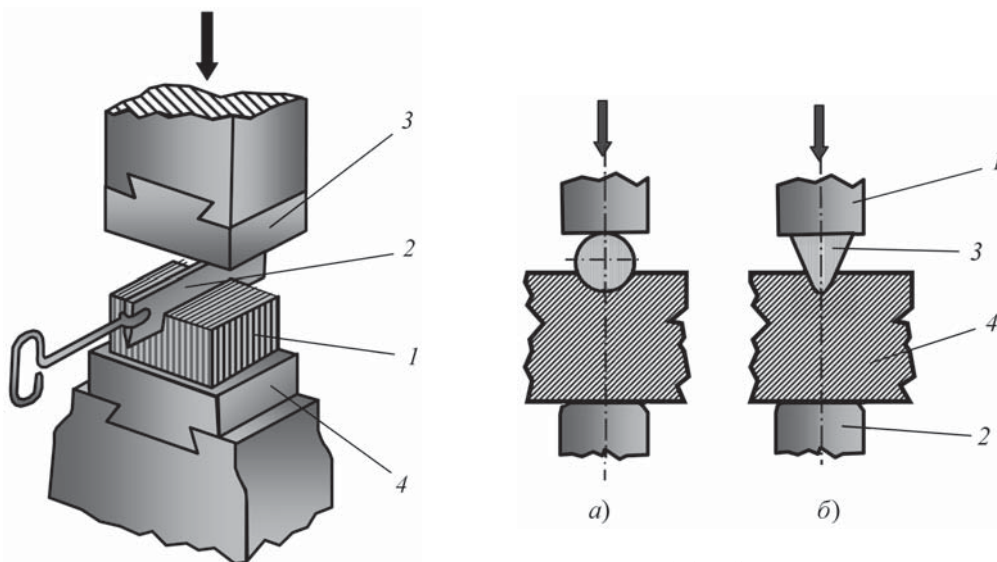


**Рис. 8.16. Отрубка части заготовки кузнечным топором:**

*1* — заготовка; *2* — топор; *3*, *4* — бойки

**Рис. 8.17. Схема пережима:**

*а* — круглой раскаткой; *б* — треугольной пережимкой; *1*, *2* — соответственно верхний и нижние бойки; *3* — инструмент; *4* — обрабатываемая заготовка



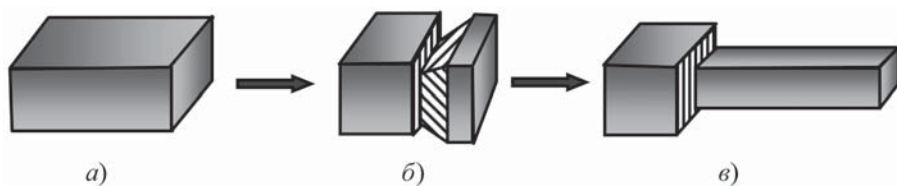


**Рис. 8.18. Технологическая последовательность изготовления объемной Т-образной заготовки:**  
 а — исходная заготовка; б — заготовка после пережима с четырех сторон; в — заготовка после протяжки

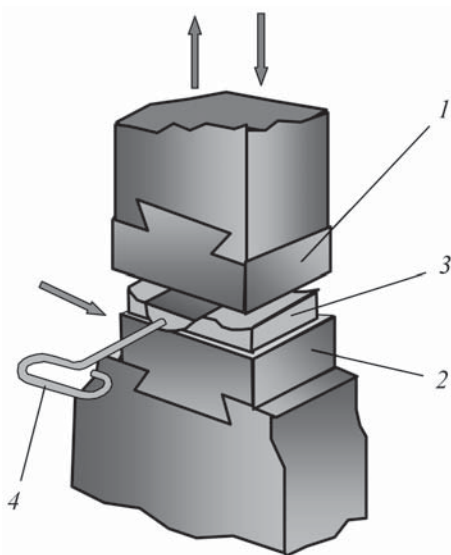


**Рис. 8.19. Разгонка:**  
 1, 2 — бойки; 3 — заготовка; 4 раскатка (прожимка)

кой с применением пережима. Изготавливают пережимки из сталей 40, 45, 40Х.

**Раскатки** (прожимки) — инструмент, применяемый для выполнения местных углублений и разгонки металла. Под разгонкой (рис. 8.19) понимают увеличение ширины заготовки или ее диаметра локальным обжатием смежных участков заготовки с уменьшением ее толщины. Преимущественное течение металла при разгонке всегда перпендикулярно к направлению перемещения бойка. После разгонки полученную волнистую поверхность проглаживают плоским (прожимкой) бойком. Применяемый инструмент — раскатки — изготавливают различной формы (рис. 8.20) из сталей 50, 40, 45, 40Х и др.

Ручки раскаток выполняют из низкоуглеродистых сталей, например Ст 3 или стали 10.

**Обжимки** применяют для перераспределения металла вдоль оси заготовки (подкатки) или отделки поковок, а также при изготовлении поковок на молотах и прессах.

По конструкции обжимки подразделяют на разъемные (рис. 8.21, а) и неразъем-

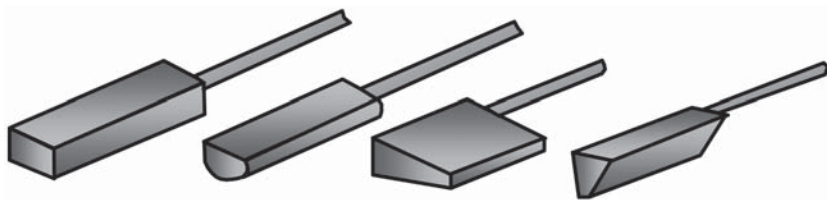
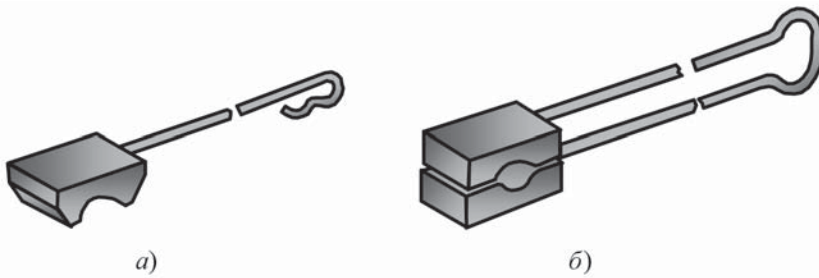
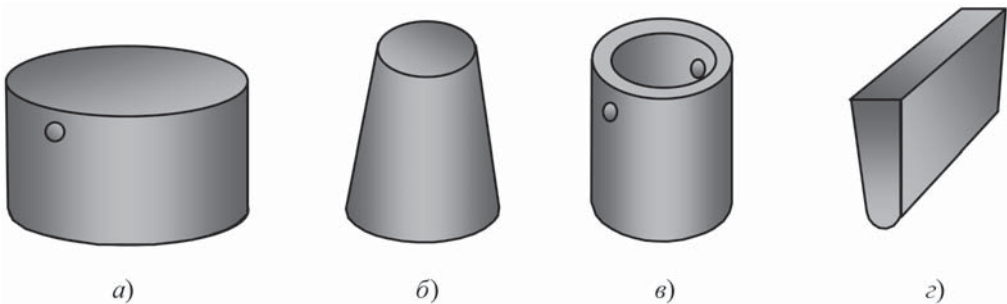


**Рис. 8.20. Некоторые типы раскаток**



**Рис. 8.21. Обжимки:**

*а* — подкатная разъемная; *б* — подкатная пружинная

**Рис. 8.22. Прошивни:**

*а* — цилиндрический; *б* — конический; *в* — полый; *г* — клиновидный

ные (рис. 8.21, б), насаженные на одну общую рукоятку. Изготавливают их из сталей 40, 45, 50, У7, 40Х.

**Прошивни** (рис. 8.22) являются основным инструментом при прошивке — кузнечной операции выполнения отверстий в поковках путем вытеснения материала.

Для удобства работы с прошивнями на их поверхности выполняют цилиндрические сквозные или глухие отверстия, в которые вводят транспортировочные или установочные штыри. Изготавливают прошивни из сталей 40Х, 50Х, 5ХНВ с твердостью 40...45 HRC.

### 8.3. РУЧНОЙ ПОДДЕРЖИВАЮЩИЙ ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ РУЧНОЙ КОВКИ И КОВКИ НА МОЛОТАХ

Основным поддерживающим инструментом при ручной ковке и ковке на молотах являются клещи с разнообразной геометрией губок (рис. 8.23). Их применяют для захвата, удержания, вращения и перемещения заготовок и поковок в процессе ихковки. Практикой выработаны рациональные виды клещей применительно к габаритным размерам и профилям обрабатываемых заготовок и характеру выполняемых операций.

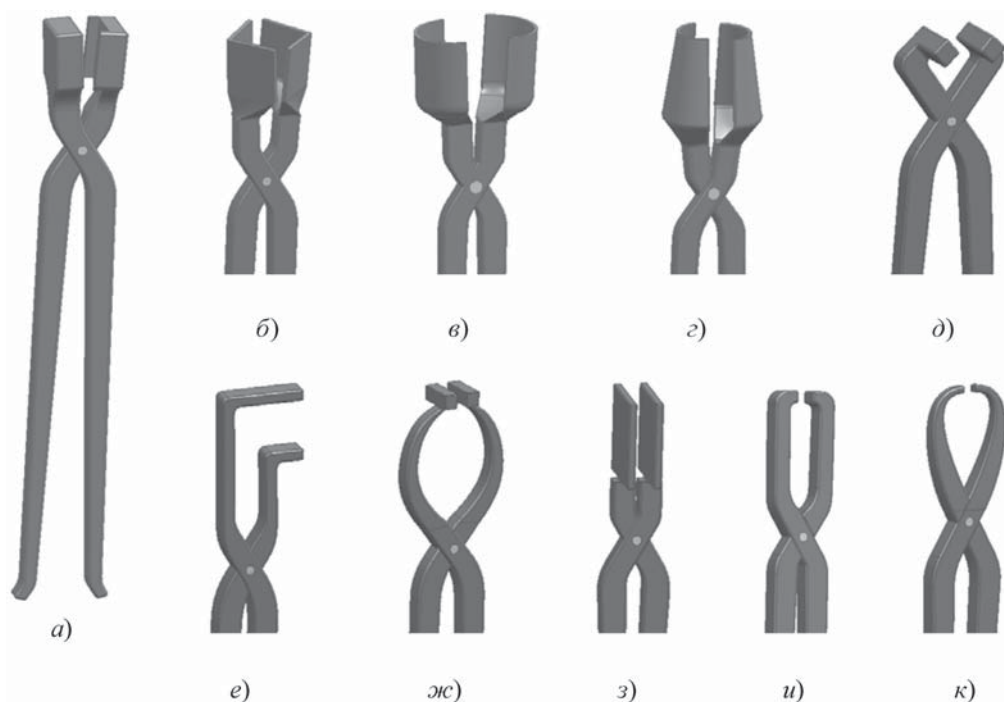


Рис. 8.23. Кузнечные клещи:

с продольными губками (*а* — прямоугольными; *б* — квадратными; *в* — цилиндрическими; *г* — коническими); с поперечными губками (*д* — квадратными отогнутыми; *е* — плоскоокруглыми; *ж* — отогнутыми; *з* — плоскими; *и* — прямоугольными; *к* — острыми)

Традиционно клещи состоят из двух половин, каждая из которых имеет с одной стороны ручку, а с другой — губку. Каждая половина клещей закреплена на общей оси. Для лучшей фиксации заготовок профиль обеих губок клещей должен соответствовать форме захватываемого конца заготовки и контактировать с ним по максимальной длине губок. (При необходимости для обеспечения лучшего соприкосновения губок клещей с заготовкой их нагревают для повышения пластичности, охватывают ими холодную заготовку и обжимают губки по заготовке ударами молотка.)

Клещи должны иметь свободное, без заеданий вращение рукояток на общей оси, точное совпадение губок при сжатом состоянии клещей, а ручки клещей должны располагаться в одной плоскости. Не допускается наличия трещин, складок и надрубов. Для повышения надежности фиксации заготовки в клещах их ручки во время работы охватывают различными кольцами или С- и S-образными крючками.

Во время работы клещи периодически охлаждают в воде. Различные типы клещей изготавливают в соответствии с ГОСТ 11385–75 или по ГОСТ 11395–75 ковкой из Ст 3 и сталей 15, 20, 25, т.е. сталей, не закаливающихся при их нагреве во время работы (с содержанием углерода  $\leq 0,25\%$ ).

Для транспортирования и манипуляций как при нагреве, так и при ковке крупногабаритных, тяжелых заготовок и поковок используют различные устройства: манипуляторы, приспособления или подъемно-транспортное оборудование кузнечного цеха.

#### **8.4. НЕКОТОРЫЕ ПРАВИЛА ИЗГОТОВЛЕНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ КУЗНЕЧНОГО ИНСТРУМЕНТА**

Кузнечные инструменты: бойки, топоры, прошивни, оправки и другие инструменты — работают при высоких температурах, частом нагреве и последующем быстром охлаждении, испытывая значительные динамические (на молотах) и статические (на прессах) нагрузки.

Кроме того, они подвержены интенсивному истиранию, в том числе и окалиной, действующей как абразив. Поэтому материал для изготовления основного технологического инструмента должен обладать стойкостью против отпуска и сохранять необходимые твердость, ударную вязкость, прочность после нагрева до температур 400...500 °С. Дополнительно он должен отличаться высокой разгароустойчивостью, т.е. не образовывать трещин при резких сменах температур.

Перед началом работы с целью уменьшения термических напряжений, возникающих при соприкосновении холодного инструмента с горячим металлом, а также для повышения ударной вязкости инструмента, в особенности испытывающего динамические нагрузки, его предварительно подогревают до температур 150...250 °С.

Для снятия напряжений инструмент для прессов и тяжелых молотов не реже раза в полугодие подвергают термической обработке. Сильно нагретые массивные бойки, осадочные плиты, оправки и т.п. охлаждают равномерно, не допуская сквозняков и исключая попадание на них влаги. Иногда их охлаждение выполняют в специально отведенных ямах. Прошивни, топоры и другие подобные им инструменты, которые в процессе работы нагреваются до высоких температур, периодически контролируют на твердость и при необходимости подвергают повторной термической обработке.

Кроме режима работы большое влияние на эксплуатационную стойкость основного технологического инструмента оказывают качество отделки его рабочих поверхностей и применяемые при ковке смазки. То и другое значительно уменьшает контактное трение и потребные силы дляковки, а следовательно, снижает износ инструмента. Своевременное удаление окалины в процессековки с рабочих поверхностей инструмента также минимизирует износ инструмента и увеличивает его стойкость.

Металлические ручки к переносному инструменту (топорам, раскаткам, пережимкам и т.п.) приваривать не рекомендуется. Изготовление инструмента с цельнотянутыми ручками практикуется только при ковке сравнительно небольших поковок. Во всех остальных случаях ручки и инструмент выполняют сборными. Поскольку после работы такие инструменты нередко охлаждают в воде, то ручки к ним во избежание закалки изготавливают из низкоуглеродистых сталей (стали 10 и 20). Ручки, выполненные отдельно, вставляют в гнезда, предусмотренные в инструменте на глубину 50...100 мм и заковывают в горячем состоянии.

Применяемые при ручной ковке кувалды, молотки, зубила и другие подобные инструменты должны иметь деревянные ручки из клена, кизила, бука, рябины или

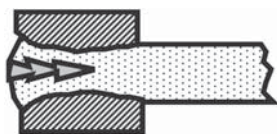


**Рис. 8.24. Форма отверстия насаживаемого на ручку кузнечного инструмента**

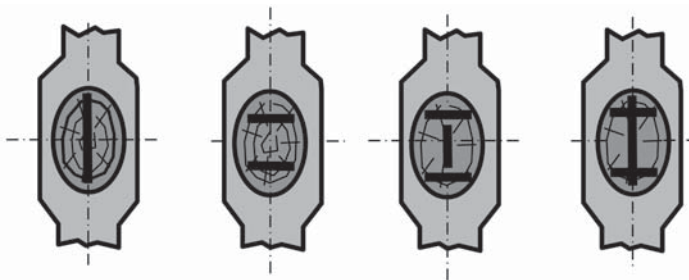


**Рис. 8.25. Схемы расклинивания деревянных рукояток кузнечного инструмента железными или деревянными клиньями**

молодого дуба. Изготавливать их из крупнослоистых пород дерева, например из ели или сосны, запрещается. Заготовки для рукояток должны быть выдержаны в течение некоторого времени и хорошо высушены, чтобы не было значительной усушки после насадки. Очень важны прочность и надежность насадки на рукоятки ударного инструмента — ручников (молотков) и кувалд. Для этого отверстия в них выполняют расширяющимися от середины в обе стороны, а форма отверстий должна соответствовать правильному овалу (рис. 8.24 и 8.25). Рукоятки должны плотно вгоняться в отверстия и расклиниваться деревянными или завершенными металлическими клиньями (см. рис. 8.24). Длина клиньев не должна превышать  $2/3$  длины насадного отверстия. При ослаблении насадки замачивания ручников и кувалд не допускается, клинья необходимо подбить или заменить новыми.

Любой инструмент периодически осматривают для выявления неисправностей как рабочей части, так и ручек. При обнаружении механических повреждений (трещин, вмятин, зарубов и т.п.) инструмент ремонтируют или заменяют новым. Пользоваться неисправным инструментом запрещается.

## Глава 9

# ОСНОВНЫЕ КУЗНЕЧНЫЕ ОПЕРАЦИИ

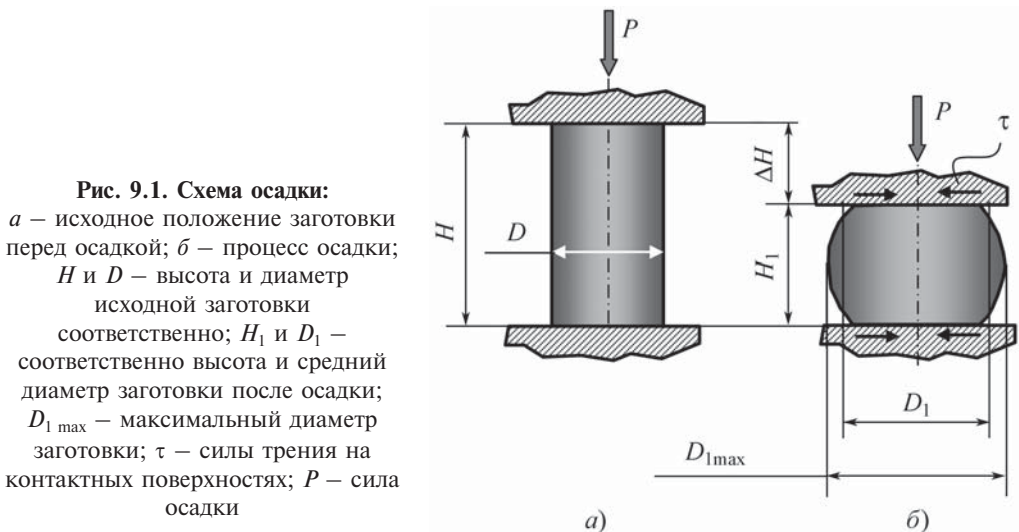
### 9.1. ОСАДКА

#### 9.1.1. Общие вопросы

Осадкой называют технологическую операцию, позволяющую уменьшить высоту исходной заготовки с одновременным увеличением площади ее поперечного сечения. Осадку применяют, например, для решения следующих задач:

- увеличения диаметра поперечного сечения исходной заготовки, у которой достаточен объем, но мал диаметр;
- раздробления, измельчения исходной крупнозернистой структуры металла заготовки, в том числе в сталях карбидного класса (например, инструментальных) снижения балла карбидной неоднородности (измельчения карбидов, обеспечив более равномерное их распределение в объеме поковки);
- получения текстуры деформации (волокна определенного направления) для повышения служебных характеристик изготавливаемой детали;
- выравнивания механических свойств вдоль и поперек оси поковки;
- заваривания имеющихся в металле флокенов;
- выполнения параллельными друг другу торцев поковки, например перед последующим образованием в поковке отверстия;
- удаления окалины перед дальнейшим деформированием заготовки.

Цилиндрические заготовки в результате осадки принимают бочкообразную форму (рис. 9.1), квадратные получают искажение поперечных сечений, которые из квадрата стремятся трансформироваться в круг. Основной причиной искажения



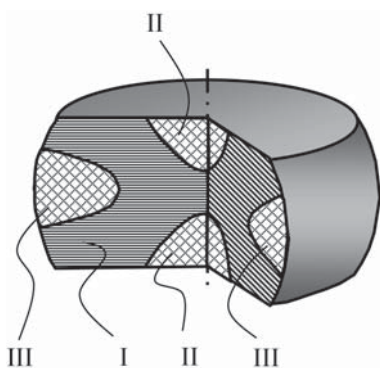


**Рис. 9.2. Зоны деформации в осаживаемой цилиндрической заготовке**

формы являются силы трения, возникающие в зонах контакта торцев заготовки с жесткими поверхностями машины — орудия (пресса, молота). Этому способствует также подхлаживание торцев заготовки при их контакте, например, с холодными бойками.

В осаженной заготовке можно выделить три характерные зоны (рис. 9.2): I — зону интенсивной деформации; II — зону "затрудненной деформации", состоящую из двух областей, примыкающих к торцам заготовки и находящихся в условиях неравномерного всестороннего сжатия. Эти области как бы расклинивают зону I в осевом и радиальном направлениях.

Зона III выходит на боковые поверхности заготовки. Интенсивность деформации в этой зоне больше, чем в первой, и меньше, чем во второй зоне. В зоне III возникают растягивающие напряжения, которые ограничивают максимальную степень деформации заготовки при осадке и являются инициаторами образования трещин на ее боковой, бочкообразной поверхности при увеличении деформации сверх предельной.

Степень деформации определяют по выражению  $\varepsilon = \Delta H / H$ , которая может изменяться от 0 до 1. Допустимая степень деформации определяется свойствами материала заготовки при температуре осадки.

Диаметр поковки  $D_1$  определяют без учета бочкообразности по выражению

$$D_1 = \sqrt{\frac{4V_3}{\pi H_1}}, \quad (9.1)$$

где  $V_3$  — объем исходной цилиндрической заготовки.

В зависимости от интенсивности нанесения ударов по заготовке, например молотом, степени деформации осаживаемой заготовки, величины трения, действующего по торцам заготовки, последняя приобретает различную бочкообразность, как показано на рис. 9.3.

"Нормальная" бочка (рис. 9.3, а) образуется при осадке цилиндрической заготовки, имеющей соотношение  $H/D \leq 2,5$ , при выполнении осадки "тяжелыми", мощными ударами молота или в случае медленного давления пресса. Вогнутая ("рюмкообразная") бочка (рис. 9.3, б) получается при коротких и легких ударах молота, наблюдается при осадке высоких заготовок ( $H > 2D$ ) на высокоскоростных молотах, а также на молотах с недостаточной массой падающих частей, когда деформация не успевает распространиться в глубину заготовки, а происходит "расклепывание" торцевых участков заготовки.

Двойная бочка с цилиндрической частью (рис. 9.3, в) образуется при малой степени осадки. В ходе дальнейшей осадки диаметр цилиндрической части возрастает и заготовка принимает форму цилиндра, к которому примыкают концевые участки в виде усеченных конусов (рис. 9.3, г).

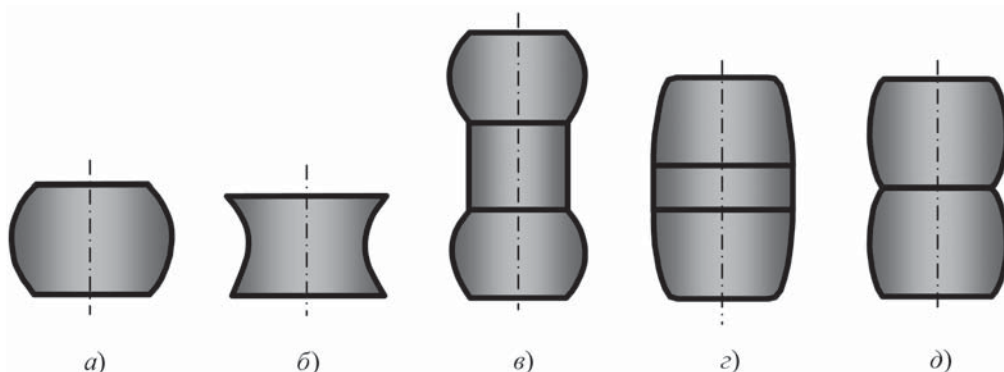


**Рис. 9.3. Формы бочкообразования при осадке:**

*a* — "нормальная" бочка; *б* — вогнутая; *в* — двойная с цилиндрической частью; *г* — конусообразная; *д* — двойная

При увеличении деформации ( $\varepsilon \approx 40...50\%$ ) диаметр среднего сечения растет более интенсивно и заготовка принимает "нормальную" бочкообразную форму (рис. 9.3, *a*). При больших отношениях  $D/H$  ( $< 0,5$ ) можно получить "двойную" бочку (рис. 9.3, *д*), которая при дальнейшей осадке переходит в одинарную (рис. 9.3, *a*).

Бочкообразование особенно нежелательно при ковке высоколегированных, труднодеформируемых сплавов (жаропрочных и др.), так как кроме искажения формы поковки бочкообразование приводит к неравномерности распределения деформаций в объеме поковки и, следовательно, неравномерности механических свойств металла.

Для уменьшения бочкообразования, успешного выполнения осадки (исключения брака в виде закованных складок, трещин и т.п.) и снижения требуемых деформирующих нагрузок необходимо выполнять ряд правил, рассматриваемых далее.

1. Успешно осадить можно такую заготовку, высота  $H$  которой не превышает трех диаметров  $D$ . Обычно высоту выбирают равной  $2,5D$ . Большие отношения могут привести к продольному изгибу заготовки и необходимости ее выравнивания.

2. Торцы осаживаемой заготовки должны быть по возможности гладкими, параллельными друг другу и перпендикулярными к ее оси (чем выше заготовка, тем важнее это условие). Выравнивание торцев проводят легкими ударами молота или несильными нажатиями прессы.

3. Для снижения степени бочкообразования поковки применяют подогрев осадочных плит (бойков), в отдельных случаях между торцами заготовки и осадочными плитами (бойками) помещают прокладки из пластичной стали или цветных металлов, используют различные смазки (рис. 9.4).

4. Заготовка перед осадкой должна быть равномерно прогрета до максимально допустимых температур (верхняя граница температурного интервалаковки).

5. При осадке на молоте необходимо учитывать, что чем длиннее заготовка, тем меньше будет рабочий ход молота, а следовательно, и меньше энергия удара. Поэтому необходимо, чтобы перед ударом оставалось не менее  $1/4$  полного хода бабы молота.



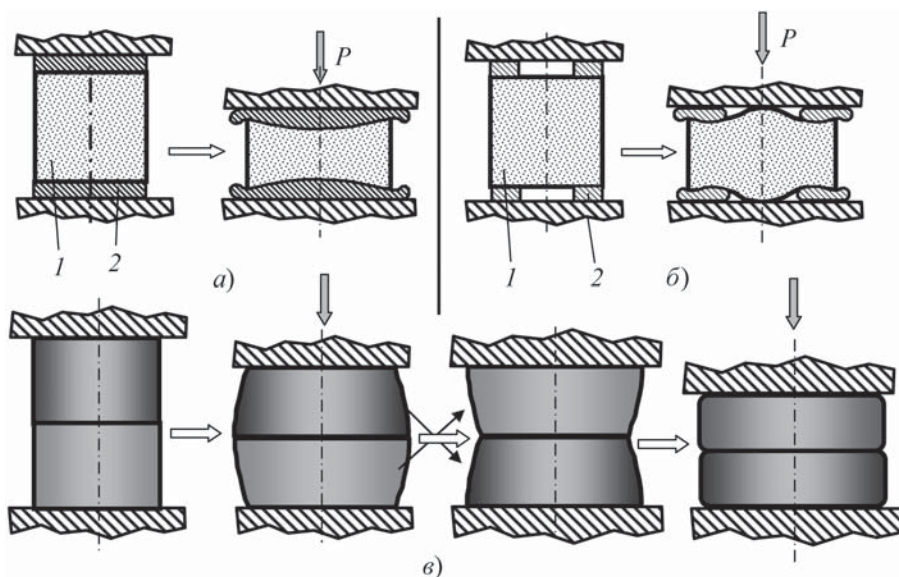


**Рис. 9.4. Схемы осадки, снижающие или устраняющие образование бочки при осадке:**

*а* — осадка заготовки *1* с применением высокопластичных сплошных прокладок *2*; *б* — то же, с использованием кольцевых прокладок; *в* — технологическая последовательность осадки двух заготовок с поворотом и сменой взаимного положения

6. При осадке следует избегать критических степеней деформации, учитывать диаграмму рекристаллизации обрабатываемого материала.

### 9.1.2. Разновидности осадки

**В ы с а д к а** — осадка части заготовки (рис. 9.5). Высадкой получают утолщение концевой или срединной зоны заготовки. Перед высадкой торцевой части заготовки нагревают только зону высадки, а при высадке срединной части — срединную часть заготовки, подвергаемую высадке. Холодные зоны заготовок обеспечивают передачу деформирующей силы нагретым участкам заготовок.

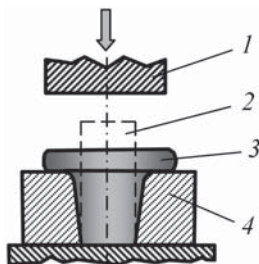


**Рис. 9.5. Высадка верхнего участка заготовки:**

*1* — боек молота;  
*2* — заготовка после высадки; *4* — матрица (подкладное кольцо)

При высадке утолщений (фланцев) на длинных и тяжелых поковках валов выполняют местный нагрев зоны будущего утолщения. Высадку осуществляют с помощью подвешенной на цепи крана стальной штанги с утолщением *4* на конце, называемой "соколом" (рис. 9.6). (В некоторых источниках штангу именуют "романом", а процесс высадки — "романением".) Нанося удары "соколом", высаживают нагретый участок.

В настоящее время выпускают гидравлические прессы, оснащенные устройствами, заменяющими функцию стальной раскачиваемой штанги.



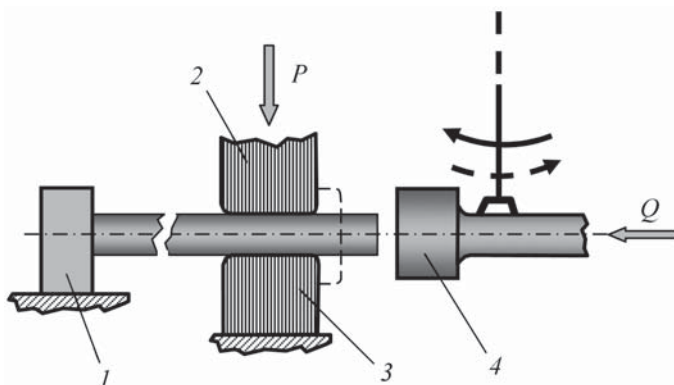


**Рис. 9.6. Высадка нагретого конца длинной заготовки:**  
1 – упор; 2, 3 – бойки; 4 – подвешенная болванка ("роман", "сокол")

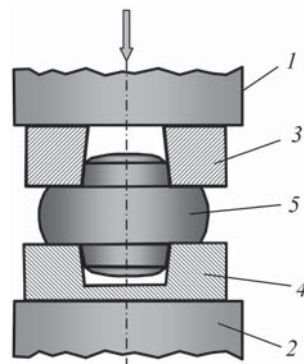


**Рис. 9.7. Осадка в подкладных кольцах с затеканием металла в полости колец:**

1, 2 – бойки; 3, 4 – подкладные кольца; 5 – осаженная заготовка

Осадку в подкладных кольцах применяют для изготовления заготовок — поковок при производстве крупногабаритных зубчатых колес, турбинных дисков с бобышками с двух сторон и тому подобных деталей. При этом заготовки осаживают или с предварительной ковкой хвостовиков, которые помещают в отверстия колец, или с затеканием металла в отверстия колец (рис. 9.7).

## 9.2. ПРОТЯЖКА

### 9.2.1. Общие вопросы

Протяжка — операцияковки, предназначенная для удлинения заготовки или ее части за счет уменьшения площади поперечного сечения (рис. 9.8). Протяжку осуществляют путем хода бойка молота или прессы перпендикулярно к оси заготовки (обжимами) с ее подачей вдоль оси.

При протяжке различают переходы и проходы. Переход состоит из обжатия и подачи. Смежные переходы на длине протягиваемой заготовки составляют проход. Протяжка может быть одно-, двухпроходной и т.д., но по исполнению всегда многопереходная. Для выравнивания деформации в объеме заготовки применяют протяжку: с кантовкой заготовки после прохода на всю длину протяжки; протяжку с кантовкой в обе стороны; протяжку по винтовой линии. Последний способ более трудоемок, и его применяют в основном дляковки труднодеформируемых материалов, например инструментальных сталей.

К основным характеристикам протяжки относят относительное обжатие и относительное уширение.

Относительное обжатие — степень деформации по высоте заготовки (рис. 9.8)

$$H_{\text{н}} = \frac{H_0 - H_1}{H_0}. \quad (9.2)$$

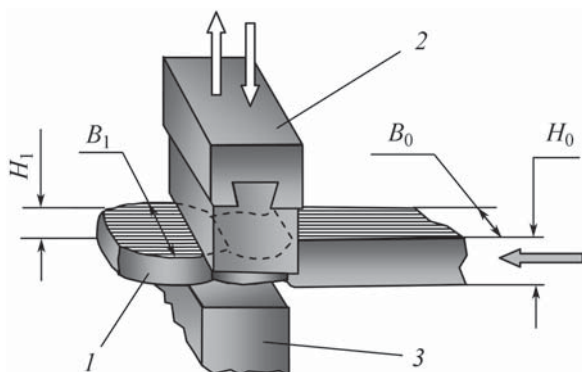


**Рис. 9.8. Схема протяжки:**  
1 – протягиваемая заготовка;  
2, 3 – бойки

Относительное уширение – степень деформации по ширине заготовки:

$$H_v = \frac{B_1 - B_0}{B_0}. \quad (9.3)$$

Допустимая величина обжатия зависит от пластических свойств деформируемого металла. Малыми подачами обычно пользуются для повышения интенсивности протяжки, уменьшения уширения или увеличения максимальных обжатий. От протяжки с большими подачами возрастает неравномерность деформации, она сопровождается значительным уширением, требует повышенных энергозатрат и приводит к уменьшению относительного обжатия.

В зависимости от массы, длины протягиваемой заготовки и способа ее удержания в производстве применяют различные способы протяжки. Последнюю начинают с конца заготовки или с ее середины. При протяжке короткой заготовки ковку осуществляют с дальнего ее конца от кузнеца. Этот способ протяжки называют "на себя". Если протяжку ведут от середины или с ближнего торца заготовки к ее дальнему торцу, то этот способ протяжки именуют "от себя".

При протяжке круглых заготовок (протяжке "на круг") плоскими бойками круглые заготовки вначале превращают в квадратные со стороной квадрата, равной 0,6...0,7 диаметра исходной заготовки, затем сбивают углы и придают заготовке примерную форму тела вращения. Высоколегированные стали, склонные к трещинообразованию, проковывают на пластину, а затем перековывают на требуемый профиль, например круг.

Ковку с круга на круг проводят в вырезных бойках (см. гл. 8, рис. 8.14). При этом используют комбинированные бойки: верхний – плоский, нижний – вырезной (фасонный). За счет того, что уширение в таких бойках ограничено, интенсивность вытяжки заготовки увеличивается на 20...40 %.

При протяжке заготовок прямоугольного сечения для предотвращения изгиба осаживаемой зоны заготовки в вертикальном направлении отношение высоты сечения заготовки к его ширине не должно превышать 2...2,5.

### 9.2.2. Протяжка на оправке

Эта операция является частным случаем, разновидностью операции протяжки. Протяжку на оправке применяют для увеличения длины прошивной или просверлен-

ной заготовки за счет уменьшения ее наружного диаметра и толщины стенки заготовки. Внутренний диаметр заготовки при этом изменяется незначительно. Конструкция оправки показана на рис. 9.9.

Рабочую часть оправки выполняют конусной с уклоном 5...12 мм на 1 м длины с буртом в зоне большего основания конуса. Бурт является упором для металла заготовки при ее обработке, а также облегчает удаление оправки из полости заготовки после завершения операции. Иногда для облегчения съема обработанной заготовки с оправки между буртом и торцом заготовки помещают кольцо, называемое муфтой. Применяют оправки сплошные и с осевым сквозным отверстием, служащим для охлаждения оправки проточной водой. Материал оправок — стали 35, 40, 40ХН, 5ХГМ и др.

При протяжке кольцевой заготовки оправку вставляют с небольшим зазором в отверстие нагретой до ковочных температур заготовки и удерживают при ковке с одного или двух концов на цепях крана.

Протяжку на оправке применяют для изготовления сосудов высокого давления, корпусов химических реакторов, котлов и других ответственных деталей различных устройств.

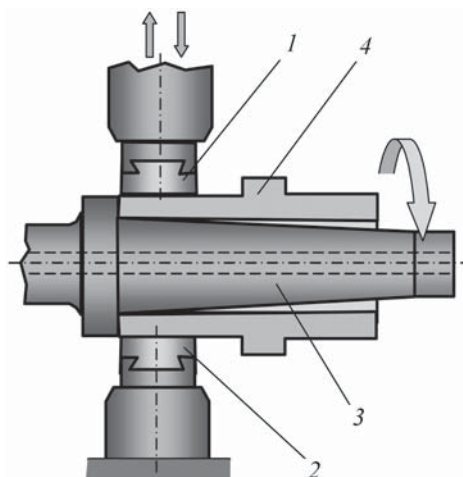


**Рис. 9.9. Схема протяжки пустотелой заготовки на конической оправке:**

1, 2 — бойки; 3 — оправка;  
4 — обрабатываемая заготовка

### 9.3. РАСКАТКА

**Раскатка** — кузнечная операция, с помощью которой увеличивают диаметр исходной заготовки с отверстием, например после операции прошивки, уменьшая ее толщину посредством бойка и оправки (рис. 9.10). Эту операцию применяют при изготовлении поковок типа колец, зубчатых венцов, бандажей, различных обечаек и других деталей, имеющих сравнительно тонкие стенки и отверстия достаточно большого диаметра.

Иногда операцию раскатки представляют как протяжку заготовки, предварительно изогнутой по окружности. При этом длина заготовки будет равна длине средней окружности кольцевой заготовки, ширина кольца — соответственно ширине, а толщина — высоте заготовки.

При раскатке на оправке роль нижнего бойка играет оправка, опирающаяся на две подставки (стойки). Обработку нагретой до ковочных температур кольцевой заготовки выполняют с ее вращением после каждого обжатия. Вращают часто вручную с помощью клещей, крупные кольца поворачивают цепями с использованием мостовых ковочных кранов. Иногда вращение заготовке передают путем вращения оправки, которая, в свою очередь, передает вращающий момент заготовке благодаря

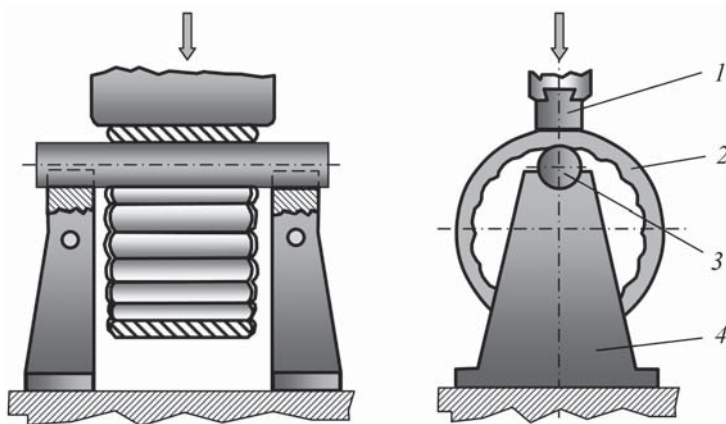


Рис. 9.10. Схема раскатки кольцевой заготовки на оправке:

1 – боек; 2 – заготовка; 3 – оправка; 4 – стойки

силам трения. Обычно требуемые размеры заготовки получают раскаткой за несколько оборотов заготовки. При этом много значат квалификация и опыт кузнеца, так как в процессе раскатки одновременно изменяются три параметра: диаметр, ширина и толщина раскатываемой кольцевой заготовки.

#### 9.4. СКРУЧИВАНИЕ

**Скручивание** является кузнечной операцией, при выполнении которой осуществляют поворот части заготовки вокруг продольной оси на определенный угол. Часто ее применяют при изготовлении заготовок деталей, имеющих форму коленчатого или кривошипного вала, поковок с уступами и выступами. Эта операция упрощает ковку сложных поковок, позволяя обрабатывать все части поковки в одной плоскости.

Для предотвращения образования трещин и разрывов закручиваемая часть поковки не должна иметь резких переходов между сечениями, но должна быть равномерно прогрета до ковочных температур. Нагрев перед скручиванием проводят как всей поковки, так и части, подлежащей закручиванию. При кручении уменьшается длина поковки. Это обстоятельство учитывают, добавляя соответствующие припуски при проектировании поковки.

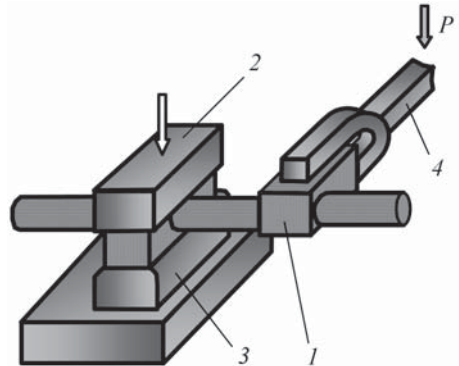
Операцию кручения выполняют с помощью рычага-вилки, который надевается на закручиваемую часть поковки (рис. 9.11), при этом базовая часть поковки зажимается между бойками. Поворот рычага на заданный угол осуществляют как вручную (для мелких поковок), так и посредством, например, мостовых кранов кузнечного цеха.

Силу закручивания можно определить по выражению

$$P = \frac{0,2 d^3 \sigma_{\text{в}}}{l \cos \alpha}, \quad (9.4)$$

**Рис. 9.11. Схема закручивания заготовки:**

1 – заготовка; 2, 3 – бойки; 4 – рычаг-вилка



где  $P$  – сила, Н;  $d$  – диаметр поковки в зоне скручивания, м;  $\sigma_b$  – предел прочности материала поковки при температуре закручивания, Па;  $l$  – длина рычага, м;  $\alpha$  – угол скручивания, град.

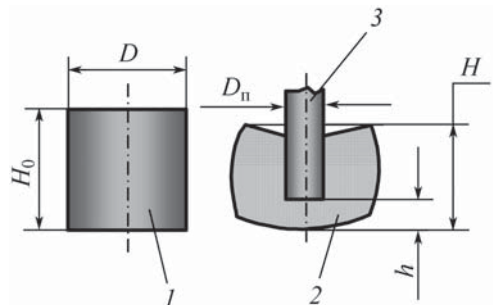
## 9.5. ПРОШИВКА

**Прошивка** – основная операцияковки, предназначенная для получения осевых сквозных полостей в заготовке путем вытеснения материала (сквозная прошивка) или углублений (несквозная прошивка).

Основным инструментом при прошивке является конический сплошной или цилиндрический полый прошивень диаметром  $D_n$  (рис. 9.12). В общем случае форма поперечного сечения прошивня должна соответствовать форме сечения отверстия или углубления, выполняемого в поковке. Внедрение сплошного прошивня в заготовку сопровождается изменением ее формы (см. рис. 9.12), связанным с вытеснением металла из-под торца внедряемого в заготовку прошивня. При этом цилиндрическая поверхность заготовки диаметром  $D$  приобретает бочкообразную форму с одновременным уменьшением своей высоты с  $H_0$  до  $H$ .

При прошивке на сплошной опоре внедрение прошивня в металл  $(H_0 - h)$  допустимо не более чем на 80...90 % от высоты заготовки  $H_0$ .

В общем виде операция прошивки сплошным прошивнем изображена на рис. 9.13, а на рис. 9.14 – схема прошивки полым прошивнем.

**Рис. 9.12. Искажение формы заготовки при прошивке:**

1, 2 – соответственно исходная и прошиваемая заготовки; 3 – прошивень

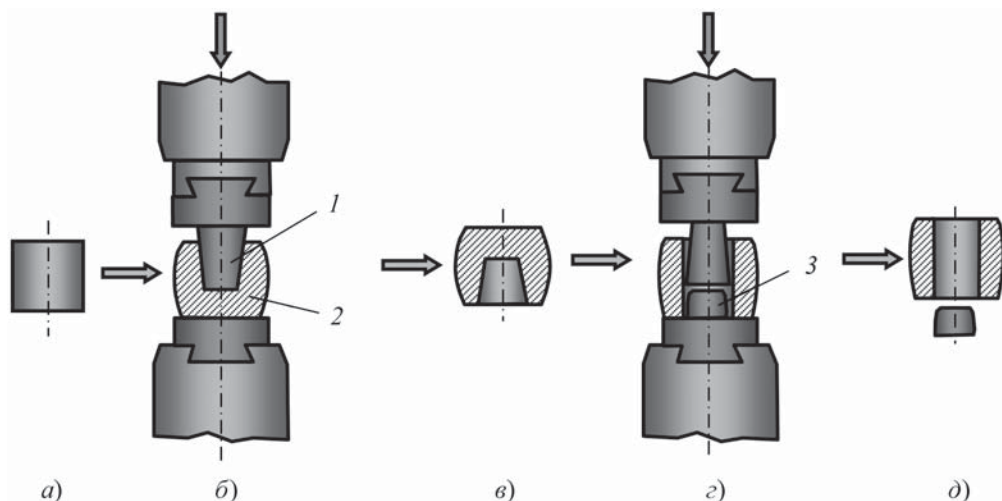
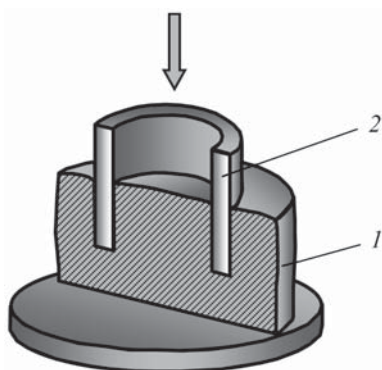


**Рис. 9.13. Технологическая последовательность выполнения осевого отверстия в поковке прошивкой сплошным прошивнем:**

*а* — исходная заготовка, равномерно нагретая до ковочных температур; *б* — внедрение конусного прошивня *1* в заготовку *2* ударами молота; *в* — удаление конусного прошивня и переворачивание заготовки; *г* — пробивка отверстия прорезным прошивнем с образованием отхода *3* (выдры); *д* — поковка с выполненным отверстием и отход (выдра)



**← Рис. 9.14. Промежуточный этап выполнения отверстия в поковке *1* полым прошивнем *2***

Для уменьшения трения между поверхностями прошивня и заготовки, а также снижения вероятности перегрева прошивня применяют смазки в виде графита, толченого угля или кокса. При этом первоначально вдавливают прошивень на небольшую глубину, затем извлекают, в образовавшееся углубление закладывают смазку и вновь продолжают прошивку.

## Глава 10

# ШТАМПОВКА НА ПРЕССАХ И МОЛОТАХ

### 10.1. СПОСОБЫ ГОРЯЧЕЙ ОБЪЕМНОЙ ШТАМПОВКИ

В современном авиационном двигателестроении широко применяются различные способы горячей объемной штамповки: облойная и безоблойная; выдавливанием; изотермическая; в разъемных матрицах и др.

**Штамповка в открытых штампах** (открытая штамповка). Облойную штамповку называют открытой, безоблойную — закрытой.

Штамповка в открытых штампах, или облойная, характеризуется тем, что рабочая полость штампа в процессе деформирования заготовки остается незамкнутой, открытой, т.е. с зазором  $\Delta$  (рис. 10.1) между подвижной и неподвижной частями штампа, изменяющимся от максимального в момент касания с заготовкой до нуля в конце штамповки.

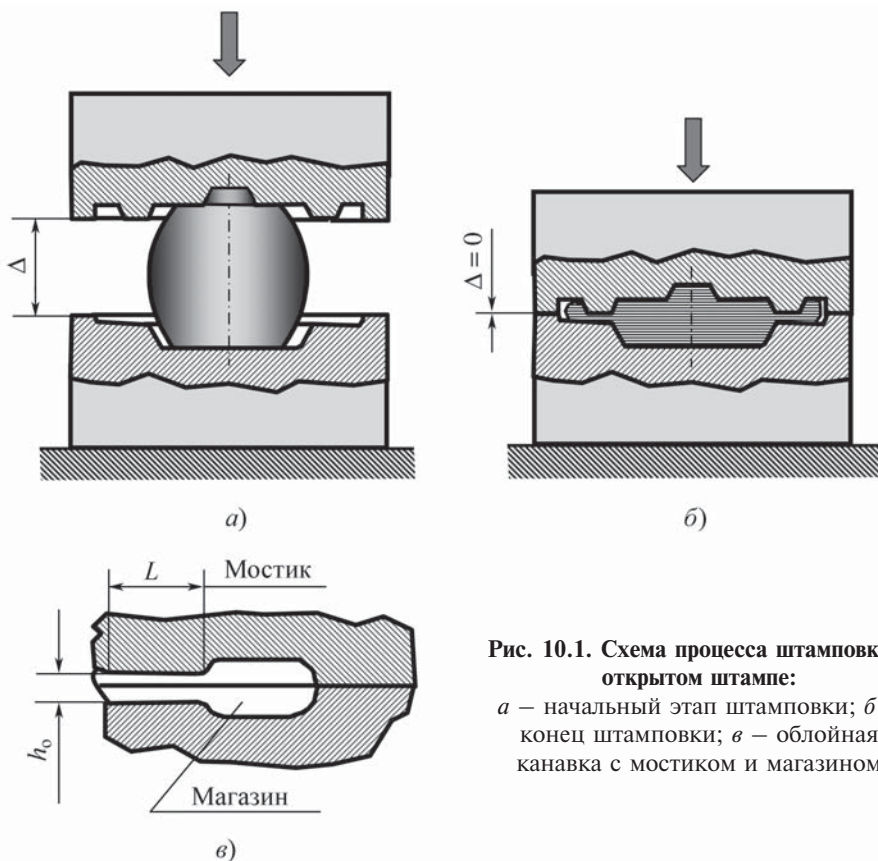


Рис. 10.1. Схема процесса штамповки в открытом штампе:

а — начальный этап штамповки; б — конец штамповки; в — облойная канавка с мостиком и магазином



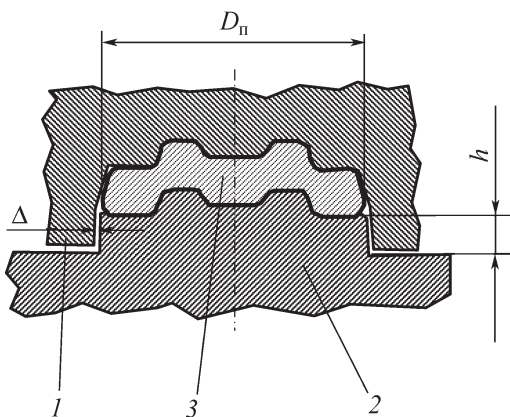


**Рис. 10.2. Схема штамповки в закрытых штампах (безоблойная штамповка):**

1, 2 — подвижная и неподвижная части штампа; 3 — штампуемая заготовка;  $\Delta$  — зазор между подвижной и неподвижной частями штампа;  $h$  — высота замка;  $D_{\text{п}}$  — диаметр поковки

При открытой штамповке наиболее трудно заполняются угловые зоны ручья штампа; металл, прежде чем заполнить эти зоны, вытекает в зазор  $\Delta$ , образуя вокруг поковки облой. К концу штамповки зазор  $\Delta$  становится малым, сопротивление течению металла в облой нарастает и металл, подчиняясь закону наименьшего сопротивления, начинает заполнять угловые зоны ручья штампа. Происходит процесс окончательного формирования геометрии штамповки.

При этом лишний по объему металл вытесняется в специальные облойные канавки, выполненные по периферии ручья штампа. На рис. 10.1, в приведен широко распространенный тип облойной канавки, состоящей из облойного мостика шириной  $L$ , высотой  $h_0$  и магазина. Облойная штамповка в открытых штампах, несмотря на потери металла в облой (в среднем потери составляют 10...30 % от массы штамповки), наиболее универсальна.

**Штамповка в закрытых штампах (закрытая).** Штамповка в закрытых штампах, или безоблойная, характеризуется тем, что штамп в процессе деформирования заготовки остается закрытым, а зазор  $\Delta$  (рис. 10.2) между подвижной и неподвижной частями штампа в конце штамповки является постоянной величиной, равной  $\sim 0,1...0,5$  мм на сторону.

В закрытых штампах отсутствуют облойные канавки, поэтому при закрытой штамповке необходимо строго соблюдать равенство объемов заготовки и полости ручья штампа. В противном случае часть металла будет затекать в зазор  $\Delta$ , образуя торцевой заусенец и вызывая при этом ускоренный износ полости штампа в зоне заусенца. Для того чтобы при штамповке исключить соударение частей штампа, размер  $h$  (высоту замка) выбирают таким образом, чтобы при окончании штамповки заготовки зазор между плоскостями подвижной и неподвижной частей штампа составлял 2...5 мм.

Штамповка в закрытых штампах — прогрессивный и экономичный способ горячей штамповки. При этом вследствие реализации схемы всестороннего неравномерного сжатия металла в объеме штампуемой заготовки закрытой штамповкой деформируют стали и сплавы, имеющие в обычных условиях пониженную пластичность, обеспечивая при этом высокие механические свойства деталей в эксплуатации.

**Штамповка выдавливанием** является частным случаем закрытой безоблойной штамповки. По направлению течения металла деформируемой заготовки относи-



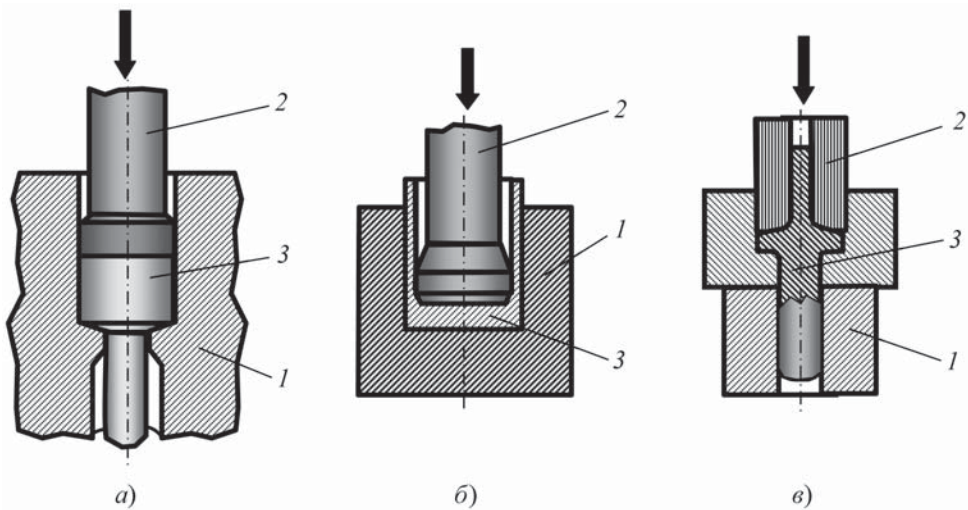


Рис. 10.3. Схема прямого (а), обратного (б) и комбинированного (в) выдавливания:

1 – матрица; 2 – пуансон; 3 – заготовка

тельно направления перемещения пуансона различают прямое (рис. 10.3, а), обратное (рис. 10.3, б) и комбинированное (рис. 10.3, в) выдавливание.

Штамповка прямым выдавливанием получила широкое распространение при изготовлении поковок стержневого типа различной сложности. Штамповку обратным выдавливанием используют при получении поковок с глухой полостью типа стаканов, фланцев, корпусов и других аналогичных деталей различной сложности. Комбинированное выдавливание применяют при изготовлении штампов, имеющих противоположно расположенные стержневые части.

Штамповка выдавливанием — прогрессивный способ получения отштампованных заготовок обработкой металлов давлением.

**Штамповка в разъемных матрицах.** Штамповку в разъемных матрицах применяют для изготовления заготовок сложной формы с боковыми отrostками и значительной разницей в сечениях вдоль оси (например, таких деталей, как форсунки, тройники, наконечники, корпусы, диффузоры и т.д.). Штамповка в разъемных матрицах может выполняться как на обычных прессах, так и на специальных многоплунжерных гидравлических прессах. С помощью многоплунжерных прессов можно получить точные штамповки сложной конфигурации благодаря применению штамповой оснастки с несколькими плоскостями разъема. Примеры схем процесса штамповки в разъемных матрицах приведены на рис. 10.4.

На рис. 10.4, а показана схема штамповки поковки с боковыми отrostками, имеющей вертикальную плоскость разъема, на одноплунжерном гидравлическом прессе. Данная схема может быть реализована и при штамповке на КГШП. На рис. 10.4, б представлена схема процесса штамповки сложнопрофильной поковки в разъемных матрицах, имеющих две взаимно-перпендикулярные плоскости разъема. Эта схема может быть реализована на двух- или трехплунжерных гидравлических прессах.

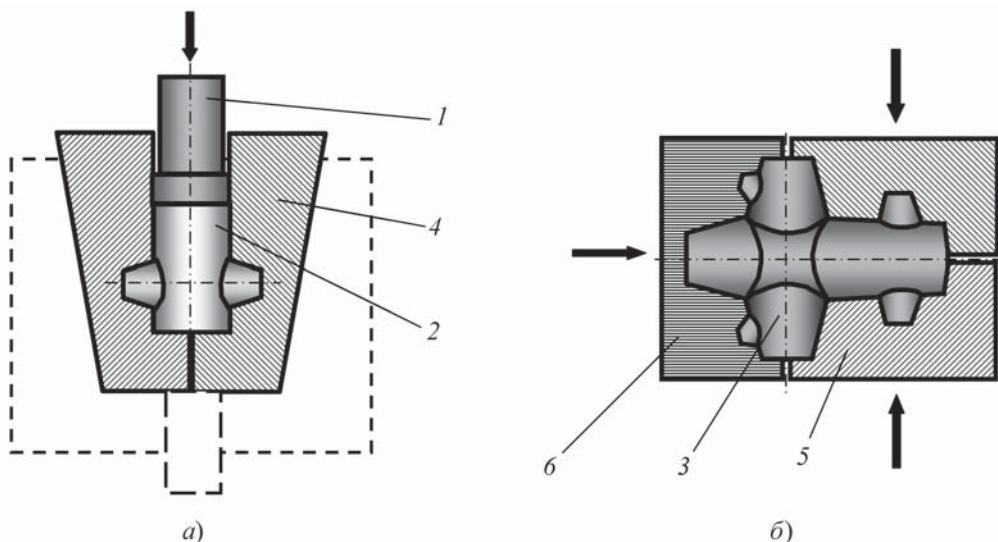


**Рис. 10.4. Схема штамповки в разъемных матрицах:**

*а* — с вертикальной плоскостью разреза; *б* — с двумя взаимно-перпендикулярными плоскостями разреза матриц; 1 — пуансон; 2, 3 — заготовки; 4 — матрицы

Штамповкой на многоплунжерных прессах изготавливают заготовки-штамповки с высокой точностью и малой шероховатостью. Нагрев заготовок под точную штамповку на многоплунжерных прессах выполняют в электропечах с защитной атмосферой или в обычных электропечах с применением защитной обмазки. Штампы, как правило, подогревают до  $\sim 350^\circ\text{C}$  индуктором, встроенным в блок под каждой полуматрицей. Температура деформирования заготовки поддерживается автоматически во время всего цикла штамповки.

Точность размеров штамповок, получаемых на многоплунжерных прессах, соответствует четвертому классу, а шероховатость поверхности  $R_z 10\ldots 40$ . Макроструктура поковок плотная, волокна располагаются эквидистантно конфигурации штамповки.

## 10.2. ШТАМПОВКА НА МОЛОТАХ

Горячая штамповка на молотах — один из наиболее распространенных способов получения различных по массе и форме поковок.

В современном производстве штамповкой на молотах изготавливают поковки из углеродистых и легированных сталей, алюминиевых, титановых и жаропрочных сплавов. На молотах можно осуществлять штамповку как в открытых, так и в закрытых штампах. Она является более универсальной по отношению к штамповке на КГШП.

К недостаткам штамповки на молотах относятся необходимость назначать большие штамповочные уклоны и радиусы закруглений на поковках, что приводит к

увеличенному расходу металла, а также ударная работа молотов, вызывающая повышенные вибрации.

### 10.2.1. Основные этапы разработки технологического процесса

Показателем, характеризующим в целом эффективность производства, является коэффициент использования металла (КИМ), определяемый по выражению

$$\text{КИМ} = G_{\text{д}} / G_{\text{м}} , \quad (10.1)$$

где  $G_{\text{д}}$  и  $G_{\text{м}}$  — соответственно силы тяжести детали и металла, израсходованного на ее изготовление.

При этом чем выше КИМ, тем эффективнее производство.

Другим показателем, по которому судят о точности поковки, служит коэффициент весовой точности (КВТ), определяемый по выражению:

$$\text{КВТ} = G_{\text{д}} / G_{\text{п}} , \quad (10.2)$$

где  $G_{\text{п}}$  — сила тяжести поковки.

КВТ характеризует эффективность процесса штамповки: чем он выше, тем эффективнее технология, тем меньше металла уйдет в стружку при обработке заготовки резанием. Поэтому одной из главных целей технолога при разработке технологии изготовления детали является обеспечение максимальных значений КИМ и КВТ.

**Разработка чертежа поковки.** Основным документом при разработке технологического процесса штамповки на молотах считается чертеж поковки, который проектируют на основании чертежа готовой детали. При конструировании чертежа поковки необходимо выбрать плоскость разреза штампа, назначить напуски, припуски и допуски, определить штамповочные уклоны, радиусы закруглений, установить форму и размеры наметок для отверстий и геометрию перемычек, а также решить вопросы, связанные с расположением волокон в поковке и базовых поверхностей, используемых для последующей ее обработки резанием.

Плоскость, которая делит поковку на две части, одна из которых штампуются, например в верхней половине штампа, а другая — в нижней, называется *плоскостью разреза штампа*. Правильный выбор последней играет важную роль.

При выборе плоскости разреза необходимо обеспечить следующие основные требования:

- свободное удаление поковки из ручьев как верхней, так и нижней половин штампа;
- возможность контроля смещения верхней половины штампа относительно нижней по внешнему виду поковки;
- минимальную трудоемкость изготовления ручьев штампа;
- минимальную глубину и максимальную ширину ручьев штампа;
- наиболее благоприятное расположение волокон в поковке, повышающее служебные свойства детали.

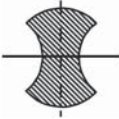
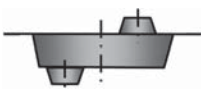
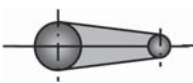
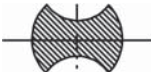
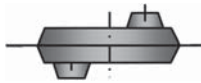
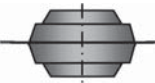
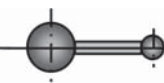
На табл. 10.1 приведены варианты построения плоскостей разреза штампа, показаны наиболее характерные ошибки при их выборе:

А — нарушено условие свободного удаления поковки из штампа;

Б — не выполнено условие контроля смещения половин штампа по внешнему виду поковки;

10.1. Варианты построения плоскостей разъема штампа

Ошибки при выборе построения плоскостей разъема

| А                                                                                 | Б                                                                                 | В                                                                                 | Г                                                                                 | Д                                                                                  |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>Неправильный выбор плоскостей разъема штампа</i>                               |                                                                                   |                                                                                   |                                                                                   |                                                                                    |
|  |  |  |  |  |
| <i>Правильный выбор плоскостей разъема штампа</i>                                 |                                                                                   |                                                                                   |                                                                                   |                                                                                    |
|  |  |  |  |  |

В — не выдержано условие наиболее технологичного изготовления ручьев штампа;

Г — не соблюдено условие минимальной глубины и максимальной ширины ручья штампа;

Д — повышена трудоемкость изготовления ручьев из-за выполнения разъема штампа ступенчатой формы.

**Припуски и допуски.** Припуск на обработку поковки или штамповки резанием назначают из условия получения годной детали после удаления припуска. Припуск должен учитывать возможное искажение формы заготовки после изготовления ее пластической деформацией, смещение, коробление, дефекты на поверхности в виде плен, зажимов, обезуглероженного слоя на стальных поковках или альфированного слоя на титановых поковках и т.д. Чем выше требования к поверхности детали, тем большую величину припуска необходимо назначать. Для титановых и стальных поковок требуется предусматривать большие припуски, чем для поковок из алюминиевых и магниевых сплавов.

Припуски и допуски на поковки, изготавливаемые из труднодеформируемых и жаропрочных сталей и сплавов, титановых, алюминиевых, магниевых и медных сплавов назначают по ОСТ 1.41187–72, а на поковки из конструкционных углеродистых и легированных сталей — по ГОСТ 7505–89.

По ОСТ 1.41187–72 предусмотрено три класса точности поковок: четвертый — шестой. По пятому и шестому классам точности получают поковки, используя традиционные способы горячей штамповки, четвертый класс точности применяют при более точной штамповке, в отдельных случаях с последующей горячей калибровкой. При этом четвертый класс точности целесообразно назначать для поковок с необрабатываемыми поверхностями.

Припуски устанавливают исходя из наибольшего габаритного размера поковки, материала и требуемой шероховатости обработки ее поверхностей; допуски на вертикальные размеры поковок и смещение половин последних в плоскости разреза штампа — по площади проекции поковки на плоскость разреза штампа, а допуски на горизонтальные размеры и коробление поковок — в зависимости от их величины. Припуски и допуски по ГОСТ 7505–89 назначают на основании массы и размеров поковки.

**Штамповочные уклоны** на боковые поверхности ручьев штампов назначают для того, чтобы штамповку можно было легко удалить из ручья штампа после ее изготовления, а также для улучшения условий затекания металла исходной заготовки в ручьи штампа. Однако штамповочные уклоны увеличивают объем поковки, повышая тем самым расход металла. Поэтому при конструировании поковки штамповочные уклоны необходимо назначать по возможности минимальными. Если штамповочное оборудование оснащено выталкивателями поковок, то поковки проектируют с минимальными уклонами или без них.

Удаление поковок из ручья штампа особенно затруднено, если профиль поковки имеет внутренние поверхности, образующие полости. При этом после штамповки поковка охлаждается и размеры ее уменьшаются. В результате этого наружные поверхности поковки, имеющие уклон  $\alpha$ , отходят от стенок ручья штампа, а внутренние — с уклоном  $\beta$ , наоборот, плотно охватывают его. Поэтому внутренние уклоны  $\beta$  выполняют большими наружных  $\alpha$ . Штамповочные уклоны и схема сил, действующих при охлаждении поковки, приведены на рис. 10.5.

Штамповочные уклоны также зависят от габаритных размеров поковки и ее элементов: высоты  $h$  и ширины  $b$  (рис. 10.5, а), свойств штампуемого металла, наличия или отсутствия выталкивателей в применяемом оборудовании, формы поковки. Наружные и внутренние уклоны для различных типов штампов и материалов в зависимости от отношения  $h/b$  приведены в табл. 10.2.

**Радиусы закруглений.** При конструировании поковок все переходы от одной поверхности к другой сопрягают радиусами, которые различают как наружные и внутренние (см. рис. 10.6). Определить, какие из радиусов относятся к внутренним, а какие к наружным, можно следующим образом: если центр радиуса находится внутри

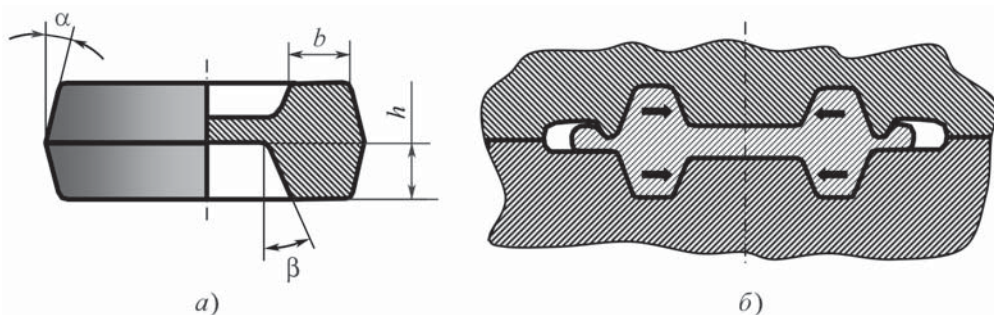


Рис. 10.5. Штамповочные уклоны (а) и силы (б), действующие при охлаждении поковки в штампе

10.2. Штамповочные уклоны

| <i>h/b</i> | Штампы<br>с выталкивателем |           | Штампы без выталкивателя  |         |                |           |
|------------|----------------------------|-----------|---------------------------|---------|----------------|-----------|
|            | всех сплавов               |           | стали и титановых сплавов |         | легких сплавов |           |
|            | $\alpha$                   | $\beta^*$ | $\alpha$                  | $\beta$ | $\alpha$       | $\beta^*$ |
| $\leq 2,5$ | 1                          | 2         | 7                         | 7       | 5**            | 5         |
| 2,5...4,0  | 2                          | 3         |                           | 10      | 5              | 7         |
| 4...5      | 3                          | 5         | 10                        | 12      | 7***           |           |

\* Для стенок полостей штампа, ограниченных поверхностью вращения, и для удлиненных полостей  $\alpha = \beta$ .

\*\* Для тонких ребер при толщине ребра  $> 5$  мм.

\*\*\* При отсутствии внутренних стенок  $\alpha = 5^\circ$

тела поковки, то этот радиус наружный, в противном случае, т.е. вне поковки, — внутренний.

Наружные радиусы закруглений  $r_i$  (для высоты полости ручья  $h_1 \rightarrow r_1, h_2 \rightarrow r_3$  и т.д.) назначают на выступающие части поковки и, соответственно, на углы ручья штампа. Малые радиусы закруглений приводят к чрезмерной концентрации напряжений в радиусных зонах и в отдельных случаях к разрушению штампа. Внутренние

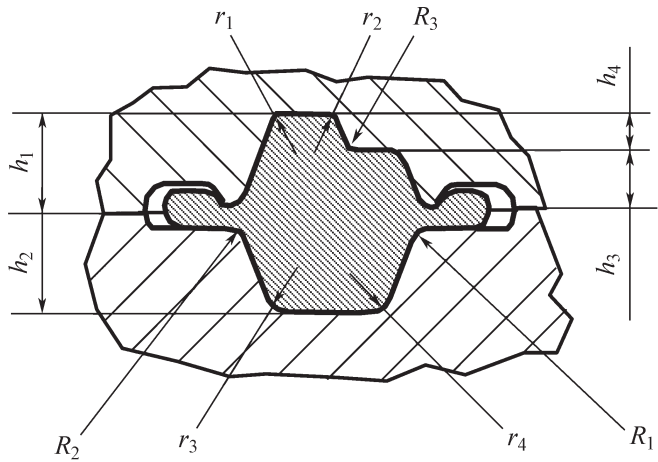
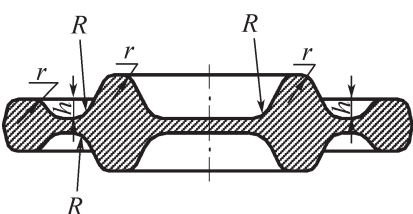
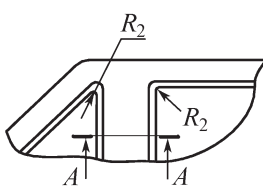
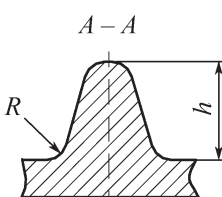


Рис. 10.6. Наружные  $r_1$  и внутренние  $R_1$  радиусы закруглений поверхностей поковки

## 10.3. Радиусы закруглений наружных и внутренних углов поковок

|  |                                  |                                               |  |                                               |  |  |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|--|
| Высота ребра $h$ , мм                                                             | Алюминиевые или магниевые сплавы | Титановые сплавы и жаропрочные стали и сплавы | Алюминиевые и магниевые сплавы МА2 и ВМ65-1                                       | Титановые сплавы и жаропрочные стали и сплавы | Алюминиевые, магниевые и титановые сплавы                                          |  |
|                                                                                   | $R$ , мм                         |                                               | $r$ , мм                                                                          |                                               | $R_2$ , мм                                                                         |  |
| До 5                                                                              | 3                                |                                               | 1,5                                                                               | 1,5                                           | 5                                                                                  |  |
| 5...10                                                                            | 4                                |                                               |                                                                                   |                                               | 8                                                                                  |  |
| 10...16                                                                           | 5                                |                                               | 2                                                                                 |                                               |                                                                                    |  |
| 16...25                                                                           | 8                                | 6                                             | 2,5                                                                               | 2                                             | 10                                                                                 |  |
| 25...35                                                                           | 10                               | 8                                             | 3                                                                                 | 2,5                                           | 12,5                                                                               |  |
| 35...50                                                                           | 12,5                             | 10                                            | 4                                                                                 | 3                                             | 15                                                                                 |  |
| 50...70                                                                           | 15                               | 12,5                                          | 5,5                                                                               | 4                                             | 20                                                                                 |  |
| 71...100                                                                          | 20                               | 15                                            | 7                                                                                 | 6                                             | 25                                                                                 |  |

радиусы закруглений  $R_i$  назначают на впадины поковок и выступы в полости штампа. Их уменьшение нарушает плавность течения штампуемого металла, способствуя образованию складок и интенсивному износу выступающих частей штампа.

Радиусы закруглений наружных и внутренних углов поковок в зависимости от высоты ребра для различных материалов приведены в табл. 10.3.

**Облой и облойная канавка.** Облойные канавки, располагаемые по контуру окончательных (чистовых) ручьев штампов для открытой штамповки, выполняют всегда независимо от вида применяемого кузнечно-штамповочного оборудования. Основное назначение облоя:

- способствовать качественному заполнению гравюры штампа (ручья), так как на последней стадии штамповки сопротивление металла истечению в облой резко возрастает и металл начинает заполнять наиболее удаленные угловые зоны полости ручья (гравюры) штампа;

- компенсировать неточности изготовления заготовки и укладки ее в штамповый ручей, иначе при штамповке поковок сложной формы исключить образование облоя практически невозможно.



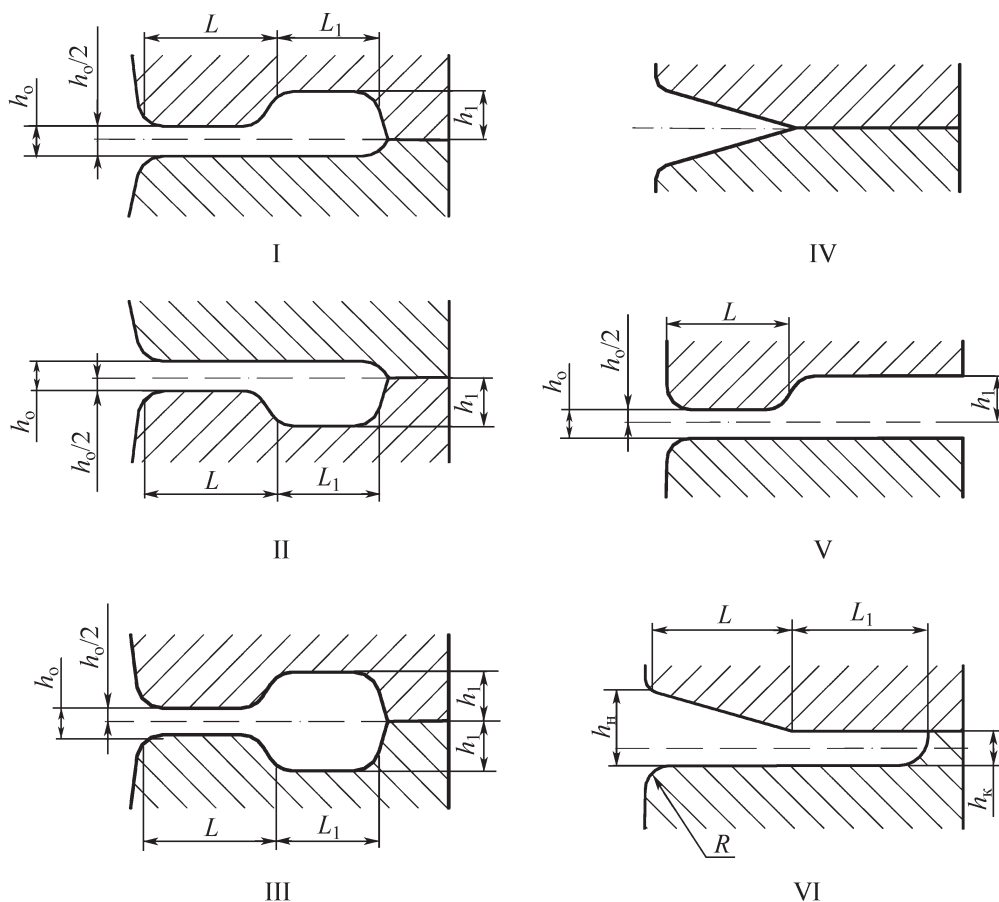


Рис. 10.7. Типы облойных канавок

Применяемые на практике профили сечений облойных канавок приведены на рис. 10.7.

Тип I — наиболее распространенная закрытая облойная канавка, используемая в штампах для всех видов оборудования, за исключением КГШП.

Тип II — закрытая канавка, применяемая при штамповке в нижнем штампе, чаще при плоском верхнем бойке.

Тип III — закрытая канавка, необходимая при большом объеме облоя.

Тип IV — закрытая канавка при малооблойной штамповке.

Тип V — открытая канавка, применяемая в штампах для КГШП (имеющих жесткий ход) для того, чтобы верхняя и нижняя части штампа не соударялись в нижнем положении ползуна, что предотвратит заклинивание прессы.

Тип VI — облойная канавка с клиновым облойным мостиком. Применение штампов с этой канавкой вместо штампов с канавкой традиционной формы (тип I) дает возможность значительно сократить время (число ударов) штамповки, умень-



шить потери металла в облой, повысить КИМ и стойкость штампов. При использовании облойной канавки типа VI потери металла в облой составляют 5...10 % от массы поковки, производительность увеличивается на 30...50 %, стойкость штампов возрастает в 1,5–2,0 раза.

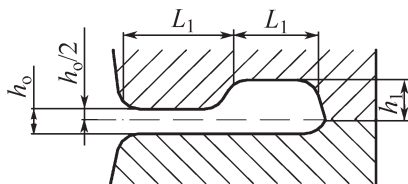
Размеры облойных канавок зависят от сложности формы поковок и площади проекции поковки на плоскость разреза штампа. Толщину облоя  $h_o$  на участке облойного мостика определяют по выражению

$$h_o = 0,015 \sqrt{F_n}, \quad (10.3)$$

где  $h_o$  — толщина облойного мостика, мм;  $F_n$  — площадь проекции поковки на плоскость разреза штампа, мм<sup>2</sup>.

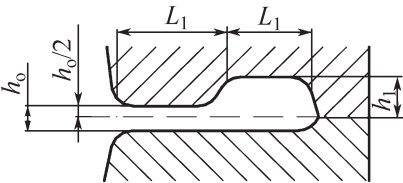
Остальные размеры канавки типа I приведены в табл. 10.4.

**10.4. Размеры облойных канавок типа I**



| Масса поковки, кг | Размеры, мм |     |          |       | Площадь сечений, мм <sup>2</sup> |          |
|-------------------|-------------|-----|----------|-------|----------------------------------|----------|
|                   | мостика     |     | магазина |       | мостика                          | магазина |
|                   | $h_o$       | $L$ | $h_1$    | $L_1$ | $f_n$                            | $F_n$    |
| До 0,05           | 0,6         | 3   | 2,2      | 10    | 1,8                              | 20       |
| 0,05...0,1        | 0,8         | 4   | 2,4      | 12    | 3,2                              | 27       |
| 0,1...0,2         | 1           | 5   | 2,5      | 15    | 5                                | 39       |
| 0,2...0,3         | 1,2         | 5   | 3,4      | 20    | 6                                | 68       |
| 0,3...0,5         | 1,4         | 6   | 4,3      | 20    | 8,4                              | 81       |
| 0,5...1,0         | 1,6         | 6   | 4,5      | 25    | 9                                | 107      |
| 1...2             | 2           | 7   | 4,7      | 30    | 14                               | 124      |
| 2...3             | 2,6         | 7   | 5        | 35    | 18                               | 156      |
| 3...5             | 3           | 8   | 6        | 40    | 24                               | 212      |

Окончание табл. 10.4



| Масса поковки, кг | Размеры, мм |     |          |       | Площадь сечений, мм <sup>2</sup> |          |
|-------------------|-------------|-----|----------|-------|----------------------------------|----------|
|                   | мостика     |     | магазина |       | мостика                          | магазина |
|                   | $h_o$       | $L$ | $h_1$    | $L_1$ | $f_n$                            | $F_n$    |
| 5...12            | 4           | 9   | 7        | 45    | 36                               | 287      |
| 12...25           | 5           | 10  | 8        | 50    | 50                               | 373      |
| 25...40           | 6           | 12  | 9        | 55    | 72                               | 457      |
| 40...100          | 7           | 15  | 12       | 75    | 105                              | 1020     |
| >100              | 10          | 20  | 15       | 90    | 200                              | 1750     |

Основные размеры клиновой канавки (тип VI) можно определить следующим образом.

Начальную высоту  $h_n$  облойного мостика канавки определяют по выражению:

$$h_n = k \frac{F_n}{P_n}, \tag{10.4}$$

где  $k$  – коэффициент формы, равный 0,07...0,1;  $P_n$  – периметр поковки в плане по линии среза обля, мм.

Длину облойного мостика  $h_k$  с учетом степени сложности формы поковки можно определить как

$$h_k = (0,3 \dots 0,5) h_n. \tag{10.5}$$

Остальные размеры уточняют экспериментально.

Кроме того, размеры клиновых облойных канавок типа VI можно определить по табл. 10.5 в зависимости от размеров поковки при штамповке поковок круглых в плане и в зависимости от силы тяжести падающих частей молота для штамповок с вытянутой осью.

10.5. Размеры клиновых облойных канавок VI типа

| Диаметр поковки, мм | $h_{нр}$ мм | $h_{кз}$ мм | $l$ , мм | $l_1$ , мм | $R$ , мм  | Сила тяжести падающих частей молота, т | Площадь сечения облоя, мм <sup>2</sup> |
|---------------------|-------------|-------------|----------|------------|-----------|----------------------------------------|----------------------------------------|
| До 65               | 1           | 0,5         | 6        | 12         | 0,5...1,0 | 0,5                                    | 8                                      |
| 65...80             | 1,2         | 0,6         | 7        | 14         | 0,6...1,2 | 0,75                                   | 10                                     |
| 80...100            | 1,5         | 0,75        | 9        | 16         | 1,0...1,5 | 1                                      | 12                                     |
| 100...120           | 1,8         | 0,9         | 10       | 18         | 1...2     | 1,5                                    | 14                                     |
| 120...150           | 2,2         | 1,1         | 12       | 20         | 1...2     | 2                                      | 18                                     |
| 150...180           | 2,6         | 1,3         | 13       | 22         | 1,5...2,5 | 2,5                                    | 25                                     |
| 180...220           | 3           | 1,5         | 15       | 25         | 1,5...2,5 | 3                                      | 35                                     |
| 220...260           | 3,8         | 1,9         | 19       | 25         | 1,5...3,0 | 4                                      | 55                                     |
| 260...310           | 4,6         | 2,3         | 23       | 27         | 1,5...3,0 | 5                                      | 80                                     |
| 310...360           | 5,5         | 2,75        | 27       | 30         | 2,0...3,5 | 6                                      | 110                                    |
| 360...440           | 6,5         | 3,25        | 30       | 35         | 2...4     | 8                                      | 160                                    |
| 440...500           | 7,5         | 3,75        | 35       | 38         | 3...5     | 10                                     | 210                                    |

**Расчет исходной заготовки при облойной штамповке.** Объем исходной заготовки

$$V_{\text{заг}} = V_{\text{п}} + V_{\text{о}} + V_{\text{у}} + V_{\text{к}}, \quad (10.6)$$

где  $V_{\text{п}}$ ,  $V_{\text{о}}$ ,  $V_{\text{у}}$ ,  $V_{\text{к}}$  — соответственно объемы поковки, облоя, угара, клещевины.

Силу тяжести исходной заготовки  $G_{\text{заг}}$  определяют суммированием сил тяжести поковки и отходов, т.е.

$$G_{\text{заг}} = G_{\text{п}} + G_{\text{о}} + G_{\text{у}} + G_{\text{к}}, \quad (10.7)$$

где  $G_{\text{п}}$ ,  $G_{\text{о}}$ ,  $G_{\text{у}}$ ,  $G_{\text{к}}$  — соответственно силы тяжести поковки, облоя, угара, клещевины.

Сила тяжести поковки  $G_{\text{п}}$  равна произведению объема поковки  $V_{\text{п}}$  на плотность (удельный вес) материала поковки  $\gamma$ . При этом объем поковки  $V_{\text{п}}$  определяют по номинальным размерам ее чертежа с прибавлением к каждому размеру половины положительного допуска на точность изготовления поковки.

Сила тяжести облоя  $G_{\text{о}}$  зависит от силы тяжести и сложности поковки, от площади поперечного сечения облойной канавки  $F_{\text{о.к}}$  и степени ее заполнения, а также периметра  $P_{\text{п}}$  поковки в плоскости разъема штампа (по линии среза облоя) и определяется как

$$G_{\text{о}} = (0,3 \dots 0,8) F_{\text{о.к}} P_{\text{п}} \gamma. \quad (10.8)$$

Силу тяжести металла, расходуемого на угар  $G_{\text{у}}$ , принимают в зависимости от способа нагрева. При нагреве стальной заготовки в мазутной печи сила тяжести металла, расходуемая на угар, составляет 2...3 % от силы тяжести заготовки; в газовой печи 1,5...2,0 %, при электронагреве 0,5...1,0 %. При определении силы тяжести заготовки из легких сплавов угар обычно не учитывают, так как заготовки из алюминиевых и магниевых сплавов во время нагрева покрываются лишь тонкой пленкой оксидов, а окалина, образующаяся на заготовках из титановых сплавов, крайне незначительна.

Силу тяжести  $G_{\text{к}}$  и размеры клещевины выбирают в зависимости от диаметра заготовки. Длину клещевины принимают равной 1,0...1,5 диаметра заготовки, а затем определяют силу тяжести  $G_{\text{к}}$  клещевины.

Диаметр  $d_{\text{заг}}$  и высоту  $h_{\text{заг}}$  исходной цилиндрической заготовки при ее штамповке в торец определяют из расчета объема  $V_{\text{заг}}$  с учетом обеспечения ее устойчивости:  $1,25 < h_{\text{заг}} / d_{\text{заг}} < 2,5$ . Аналогично поступают и при определении стороны квадрата  $a_{\text{заг}}$  и высоты  $h_{\text{заг}}$  исходной квадратной в сечении заготовки. При этом, обозначив отношение  $h_{\text{заг}} / d_{\text{заг}}$  и  $h_{\text{заг}} / a_{\text{заг}}$  через  $m$ , определяют

$$\text{— для круглой заготовки } d_{\text{заг}} = 1,08 \sqrt[3]{\frac{V_{\text{заг}}}{m}};$$

$$\text{— для заготовки с квадратным поперечным сечением } a_{\text{заг}} = \sqrt[3]{\frac{V_{\text{заг}}}{m}}.$$

После определения  $d_{\text{заг}}$  или  $a_{\text{заг}}$  выбирают ближний размер сортамента по соответствующему государственному стандарту на сортament и затем вычисляют высоту исходной заготовки.

**Расчет исходной заготовки при безоблойной штамповке.** При расчете заготовки, изготавливаемой из стали, необходимо учитывать угар. При этом объем заготовки будет равен

$$V_{\text{заг}} = V_{\text{п}} + V_{\text{у}}. \quad (10.9)$$

При расчете заготовки из легких сплавов, как было отмечено ранее, угаром металла можно пренебречь, и тогда объем заготовки будет равен объему поковки, т.е.

$$V_{\text{заг}} = V_{\text{п}}. \quad (10.10)$$

Далее расчет силы тяжести и диаметра исходной заготовки осуществляют, как было описано ранее.

**Выбор переходов штамповки.** Правильный выбор переходов штамповки обеспечивает качественное и достаточно надежное заполнение полости ручья штампа. При этом достигается удовлетворительная стойкость штампа при минимальном расходе металла на изготовление штамповки.

Необходимые технологические переходы штамповки поковок с длинной осью (длинноосных поковок) определяют путем построения так называемой расчетной заготовки или эпюры диаметров, т.е. воображаемой заготовки с круглыми поперечными сечениями. Площади этих сечений равны суммарной площади соответствующих сечений поковки и облоя, образуемого с двух сторон по линии разреза штампов:

$$S = S_{\text{п}} + 2 \xi S_{\text{о}}, \quad (10.11)$$

где  $S$  — площадь сечения расчетной заготовки;  $S_{\text{п}}$  — площадь поковки;  $S_{\text{о}}$  — площадь одностороннего облоя;  $\xi$  — коэффициент заполнения облойной канавки штампа.

Диаметр сечения расчетной заготовки определяют по формуле

$$d_3 = \sqrt{\frac{4S}{\pi}} = 1,13 \sqrt{S}. \quad (10.12)$$

Элементарная схема эпюры диаметров (расчетной заготовки) приведена на рис. 10.8.

Объем тела вращения, получающегося поворотом эпюры диаметров длиной  $l$ , вокруг продольной оси, равен сумме объемов расчетной заготовки и поковки с обломом, т.е.

$$V = V_{\text{п}} + V_{\text{о}}. \quad (10.13)$$

Если объем расчетной заготовки  $V$  разделить на ее длину  $l$ , то можно получить площадь поперечного сечения средней расчетной заготовки, т.е. цилиндра с постоянным круговым сечением площадью

$$S_{\text{ср}} = \frac{V}{l} \text{ с диаметром } d_{\text{ср}} = \sqrt{S_{\text{ср}}}. \quad (10.14)$$

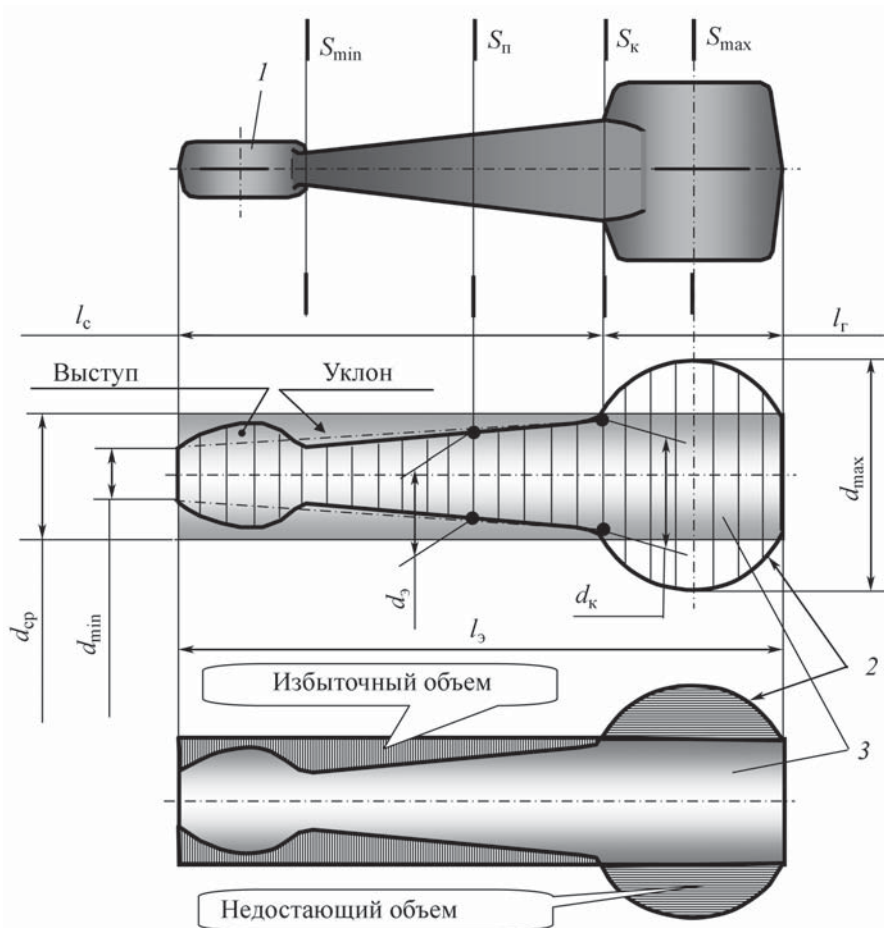


**Рис. 10.8. Построение эпюры диаметров и расчетной заготовки:**

1 – поковка; 2 – расчетная заготовка; 3 – средняя расчетная заготовка

Таким образом, расчетная заготовка соответствует фасонной заготовке, которая должна деформироваться в штамповочном ручье, а средняя расчетная заготовка отвечает исходной заготовке постоянного сечения, из которой в заготовительных ручьях штампа необходимо получить фасонную заготовку.

Часть расчетной заготовки, в пределах которой  $d_з > d_{\text{ср}}$ , называют головкой, а разницу объемов между объемом головки и объемом средней расчетной заготовки в пределах головки (на длине  $l_г$ ) – недостающим объемом. Часть расчетной заготовки, в пределах которой  $d_з < d_{\text{ср}}$ , именуют стержнем, а разницу в объемах средней заготовки и стержня (на длине  $l_c$ ) – избыточным объемом.

Заготовительные переходы штамповки должны вытеснить избыточный объем металла в головку. Стержень можно привести к виду усеченного конуса с малым основанием  $d_{\min}$ , соответствующим наименьшему диаметру расчетной заготовки, и

высотой  $l_c$ . Большее основание конуса  $d_k$  определяют, используя формулу для подсчета объема усеченного конуса:

$$d_k = \sqrt{3,82 \frac{V_c}{l_c} - 0,75 d_{\min}^2 - 0,5 d_{\min}}, \quad (10.15)$$

где  $V_c$  — объем расчетной заготовки на участке стержня.

Работа, необходимая на формоизменение цилиндрической заготовки в фасонную, пропорциональна величине

$$\alpha = \frac{d_{\max}}{d_{\text{cp}}}. \quad (10.16)$$

Величина совершаемой работы зависит также от коэффициентов

$$\beta = \frac{l}{d_{\text{cp}}} \quad \text{и} \quad c = \frac{d_k - d_{\min}}{l_c}, \quad (10.17)$$

т.е. от величины пути, на котором происходит перемещение металла, и от конусности стержня.

Определив коэффициенты  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $c$ , характеризующие степень сложности поковки, устанавливают необходимость применения заготовительных ручьев, пользуясь диаграммой А.В. Ребельского (рис. 10.9).

*Пример.* Определить переходы штамповки для поковки шатуна силой тяжести 1,2 кг. Коэффициенты  $\alpha = 1,23$ ;  $\beta = 5,2$ ;  $c = 0,03$ .

На вертикальной оси диаграммы, соответствующей силе тяжести  $> 1$  кг, откладываем отрезок, равный значению коэффициента  $\alpha = 1,23$ , и проводим вправо горизонтальную линию. На горизонтальной оси диаграммы откладываем отрезок, равный значению коэффициента  $\beta = 5,2$ , и проводим вертикаль.

Точка пересечения находится в пятой области диаграммы, т.е. для получения поковки должен быть применен протяжной ручей (один или в комбинации с другими ручьями). Так как  $0,02 < c < 0,05$ , то следует использовать протяжной ручей в комбинации с подкатным открытым ручьем.

На рис. 10.10 приведены эскиз молотового штампа и пример использования ручьев по переходам штамповки, на рис. 10.11 — заготовительные и штамповочные ручьи молотового штампа.

Расчетную заготовку, содержащую только одну головку с одним стержнем, называют **элементарной расчетной заготовкой**. Расчетная заготовка с одной головкой и двумя стержнями, именуется **сложной расчетной заготовкой**. При определении заготовительных ручьев сложную заготовку приводят к нескольким элементарным.

При выборе ручьев молотового штампа придерживаются следующих правил:

— если расчетная заготовка имеет значительные выступы и головку сложной формы, а по расчету требуется один протяжной ручей, то дополнительно применяют формовочный или подкатной открытый ручей;

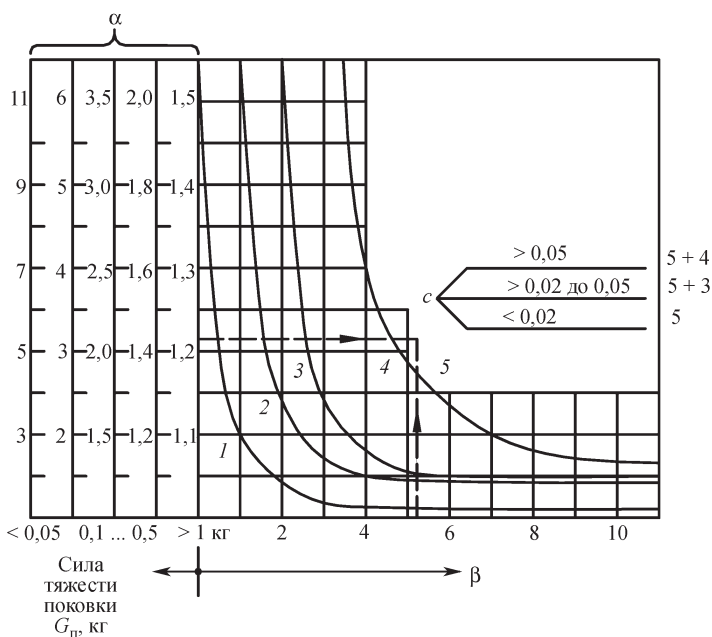


**Рис. 10.9. Диаграмма для выбора заготовительных ручьев (по А.В. Ребельскому):**

1 – без предварительных ручьев; 2 – с пережимным ручьем; 3 – с подкатным открытым; 4 – с подкатным закрытым; 5 – с одним протяженным или в комбинации с подкатным ручьем

– если по расчету нужен только протяжной ручей, а штамповку ведут с клешевинной, то при  $d_{\text{ср}} > 30$  мм дополнительно применяют подкатку заготовки для оформления участка между поковкой и клешевым концом;

– если при штамповке в окончательном ручье используют исходную заготовку, сечение которой больше сечения расчетной, то перед штамповкой в окончательном ручье заготовку подвергают протяжке в протяжном ручье;

– применение гибочного ручья устраняет необходимость применения формовочного. Построение расчетной заготовки для поковки с изогнутой осью проводят после распрямления оси в прямую линию и далее как для поволоков с вытянутой осью.

При штамповке на КГШП для определения переходов штамповки и выбора предварительных ручьев аналогично строят расчетную заготовку, привлекая диаграмму А.В. Ребельского. Однако для выполнения операции протяжки КГШП не предназначен. Ввиду этого, если по расчету необходимо применение операции протяжки, поволоки штампуют на две штуки с применением только одного пережимного ручья.

Для осесимметричных поволоков в качестве заготовительного перехода обычно применяют осадку в торец. При молотовой штамповке часто достаточно осадки и штамповки в окончательном ручье. Предварительный ручей применяют для повышения стойкости штампов, например, при штамповке поволоков с прошиваемым отверстием. При штамповке поволоков типа фланца с отрезками пользуются высадоч-



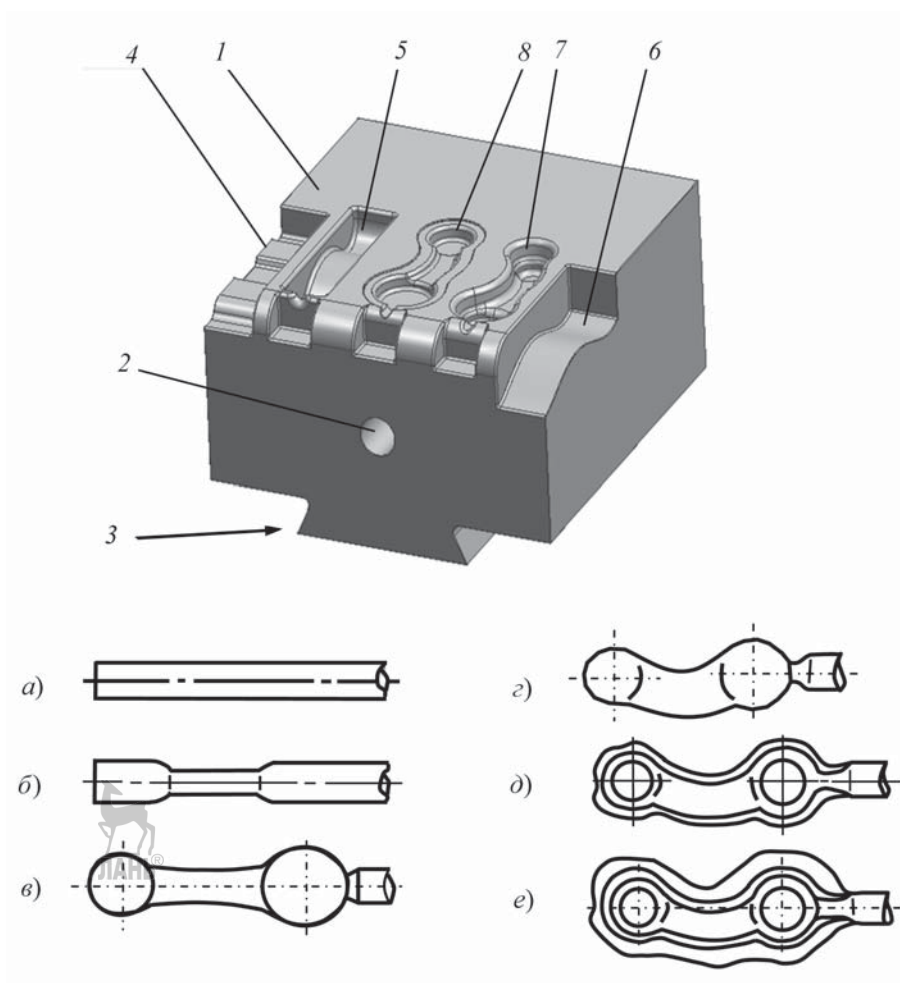


**Рис. 10.10. Эскиз молотового штампа (нижний штамп):**

*1* – зеркало штампа; *2* – транспортировочное отверстие; *3* – хвостовик штампа и пример использования ручьев по переходам штамповки; *4* – протяжной ручей; *5* – закрытый подкатной ручей; *6* – гибочный ручей; *7* – предварительный штамповочный ручей; *8* – окончательный штамповочный ручей; *а* – исходя заготовка; *б* – протяжка; *в* – подкатка; *г* – гибка; *д* – предварительная штамповка; *е* – окончательная штамповка

ным ручьем. Штамповку осесимметричных поковок на КГШП осуществляют, применяя фасонную осадку, предварительно-заготовительный и окончательный ручки.

В результате применения осадки и предварительно-заготовительного ручья получают фасонную заготовку, которая при последующей штамповке заполняет полость окончательного ручья преимущественно осадкой.

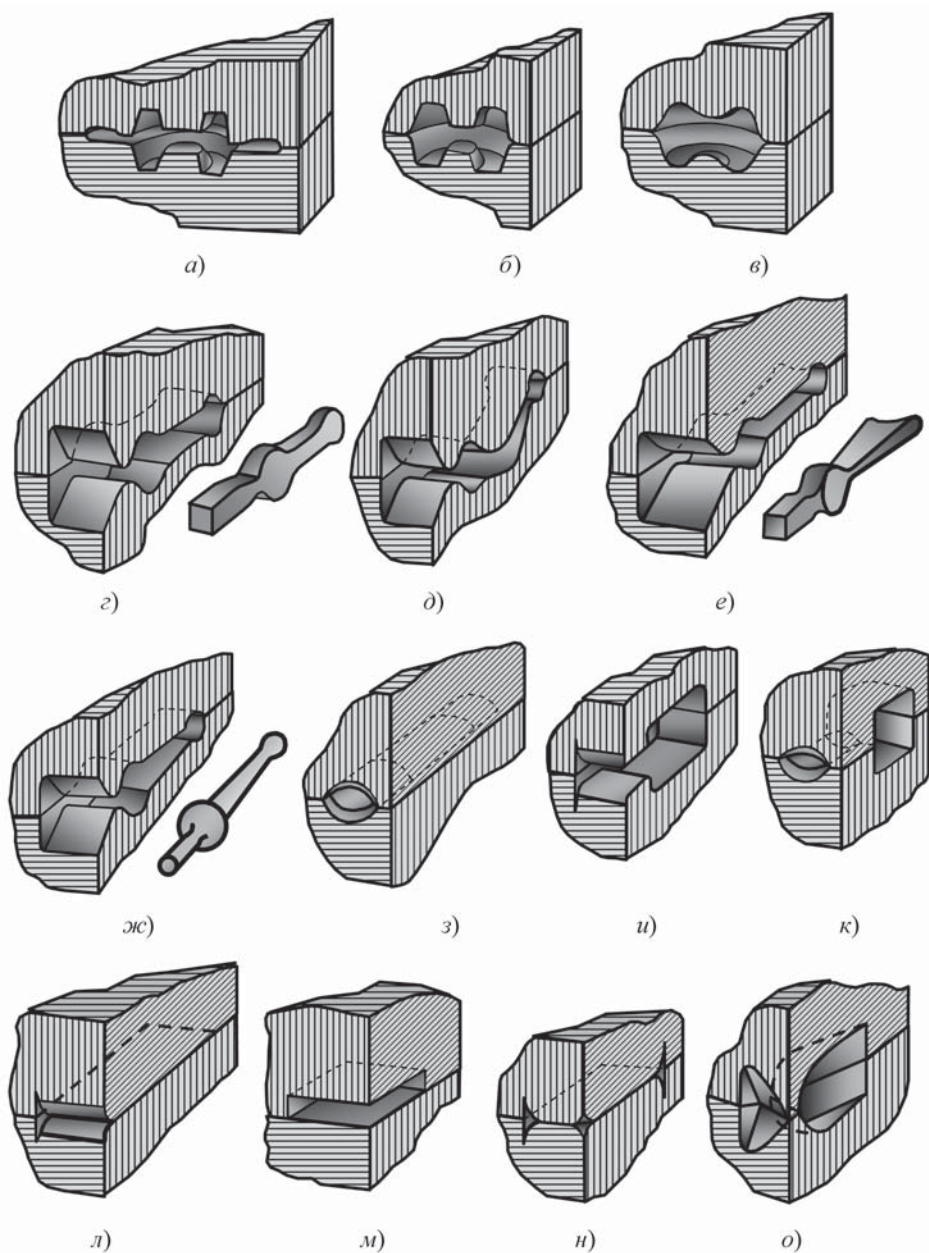


**Рис. 10.11. Заготовительные и штамповочные ручки молотового штампа:**

*а* – открытый окончательный; *б, в* – предварительный и предварительный заготовительный; *г* – формовочный; *д* – гибочный; *е* – пережимной; *ж* – подкатной открытый; *з* – подкатной закрытый; *и* – протяжной открытый; *к* – протяжной закрытый; *л* – площадка для оттяжки; *м* – площадка для осадки; *н* – площадка для расплющивания; *о* – отрубной нож

### 10.3. ШТАМПОВКА НА КРИВОШИПНЫХ ГОРЯЧЕШТАМПОВОЧНЫХ ПРЕССАХ

КГШП появились значительно позже молотов. Однако их применение расширяется, и они вытесняют штамповочные молоты в крупносерийном и массовом производствах. Штамповка на КГШП по сравнению с молотом обладает следующими преимуществами:

- КГШП обеспечивает повышение точности поковок и экономию металла. Поковки, получаемые на КГШП, имеют меньшие штамповочные уклоны и допуски на недоштамповку;

- производительность штамповки на КГШП на 30...50 % выше, чем на молоте. Это объясняется тем, что деформация в каждом ручье штампа осуществляется за один ход пресса;

- КГШП отличается более спокойным характером работы, меньшим шумом;

- по расходу энергии КГШП экономичнее, их КПД в 2–4 раза выше КПД молотов;

- КГШП можно широко применять и для штамповки выдавливанием.

Некоторые недостатки штамповки на КГШП:

- меньшая универсальность;

- штампы для КГШП значительно сложнее и дороже молотовых;

- стоимость КГШП в 3–4 раза выше аналогичных по мощности молотов.

Особенности штамповки на КГШП снижают область их эффективности в мелкосерийном производстве, поэтому КГШП применяют в крупносерийном и массовом производствах. Для нагрева исходной заготовки используют печи электронагрева, обеспечивающие минимальное образование окалины. На КГШП можно осуществлять штамповку как в закрытых, так и в открытых штампах. При закрытой штамповке целесообразно использование нижних и верхних выталкивателей пресса, что позволяет значительно уменьшить уклоны на поковках. Поковки сложной формы часто изготавливают комбинированной штамповкой, т.е. предварительное фасонирование проводят на ином виде оборудования, а штамповку – на КГШП.

В зависимости от конфигурации все поковки, штампуемые на КГШП, можно разделить на следующие основные группы: 1) поковки круглые или квадратные в плане или близкие к ним, штампуемые осадкой в торец; 2) поковки с вытянутой осью, включая все их разновидности; 3) поковки, получаемые в закрытых штампах выдавливанием как в направлении оси поковки, так и в перпендикулярном к оси направлении.

Разработка технологического процесса штамповки на КГШП, назначение припусков, радиусов закруглений, размеров перемычек для отверстий и выбор плоскости разреза при составлении чертежа поковки осуществляют по тем же правилам, что и для штамповки на молоте. На рис. 10.12 показаны переходы штамповки поковки зубчатого колеса.

Для того чтобы после штамповки в предварительном ручье заготовку можно было свободно положить в окончательный (чистовой) ручей, размеры предварительно (чернового) ручья в горизонтальной плоскости должны быть меньше соответствующих размеров готовой поковки. Построение полости окончательного (чистового) ручья при штамповке на КГШП осуществляется так же, как и при штамповке на молотах: по чертежу поковки с учетом усадки.

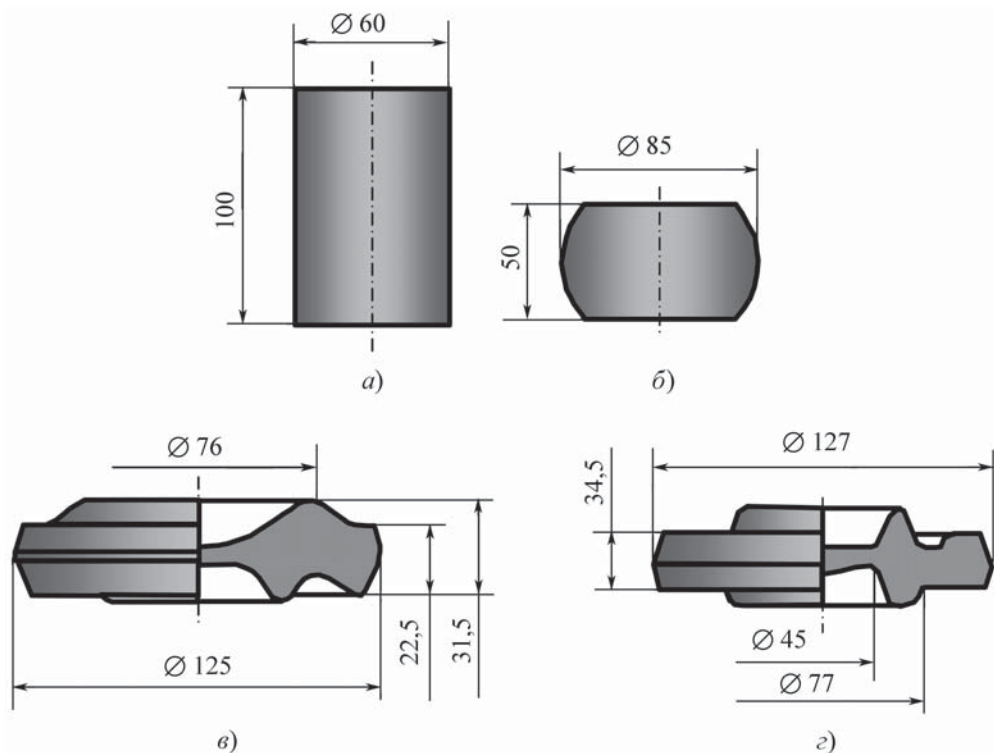


**Рис. 10.12. Переходы штамповки зубчатого колеса:**

*а* — исходная заготовка; *б* — осадка заготовки; *в* — штамповка в предварительном ручье; *г* — штамповка в окончательном ручье

При изготовлении поковок сложной формы на КГШП, чтобы не было большого вытеснения металла в облойную канавку, а также для повышения равномерности деформации необходимо, чтобы формоизменение заготовки происходило постепенно. Для этого целесообразно увеличивать число предварительных переходов штамповки с целью постепенного приближения формы заготовки к форме окончательной поковки. При этом следует учитывать, что при штамповке алюминиевых, магниевых и титановых сплавов на промежуточных переходах необходимо исключать острые кромки и тонкие выступы в геометрии полуфабрикатов, которые при последующей штамповке, охлаждаясь интенсивнее, чем остальная поковка, могут вызвать образование складок и зажимов.

Размеры и форма облойных канавок для прессовых штампов отличаются от облойных канавок молотовых штампов. Чтобы штампы не работали враспор, верхняя и нижняя их части при штамповке не должны соприкасаться по разьему при нижнем положении ползуна, т.е. облойные канавки в этом случае делают открытыми. Толщина облоя при штамповке на КГШП на участке мостика равна величине недохода верхнего штампа до нижнего при нижнем положении ползуна без нагрузки и величине упругих деформаций прессы, возникающих при штамповке. Поэтому высота поковки равна суммарной глубине ручьев штампа плюс толщина облоя  $h_0$ . Тол-

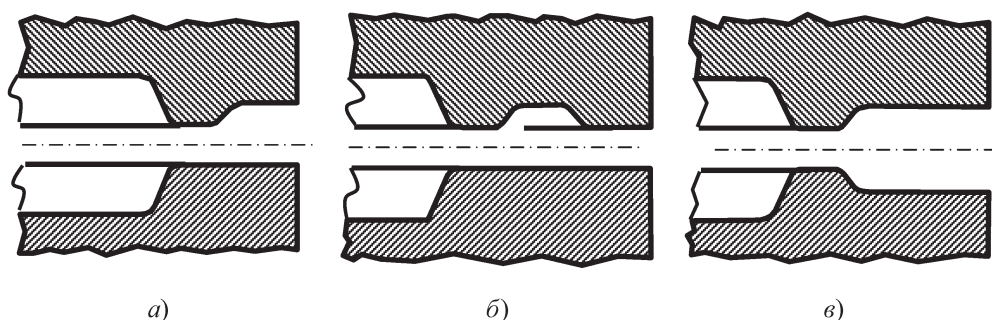


**Рис. 10.13. Формы облойных канавок прессовых штампов:**

*а* — универсальная; *б* — с полузакрытым магазином; *в* — с двусторонним открытым магазином

щину облоя можно изменить с помощью перемещения наклонной плиты клинового стола пресса. Формы облойных канавок прессовых штампов приведены на рис. 10.13.

Форма канавки, показанная на рис. 10.13, *а*, является основной и наиболее распространенной. Магазин канавки открыт с одной стороны и располагается сверху или снизу — в соответствии с расположением пуансона штампа для обрезки заусенца. Канавка с полузакрытым магазином, показанная на рис. 10.13, *б*, применяется для уменьшения припуска на обработку резанием при большой толщине стенок штамповой вставки, устанавливаемой в штамповый блок. Канавка с двусторонним открытым магазином, показанная на рис. 10.13, *в*, рекомендуется для тех случаев, когда в облой выдавливается значительный объем металла (сложные поковки). Размеры облойных канавок выбираются в зависимости от силы пресса по специальным таблицам.

При штамповке поковок, имеющих тонкие ребра и высокие бобышки, для выхода находящегося в полости штампа воздуха и образующихся паров смазки в полости штампа выполняют газоотводящие каналы (рис. 10.14). При штамповке поковок из титана и сталей эти каналы следует делать диаметром до 1,5 мм во избежание затекания металла в каналы. Вероятность затекания алюминия и магния в каналы выше, поэтому их диаметры должны быть еще меньше. Обычно газоотводящие каналы предусматривают со стороны ручья на глубину 20...30 мм, а с обратной стороны вставки, соосно им, сверлят отверстия диаметром 8...15 мм. Для сообщения газоотводящих каналов с атмосферой на опорной поверхности вставок выполняют открытые канавки глубиной 3...6 мм, соединяющие все отверстия.

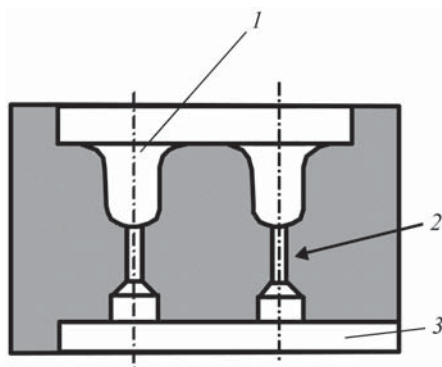


**Рис. 10.14. Элемент штампа с газоотводящими каналами:**

*1* — рабочий ручей штампа;  
*2* — газоотводящий канал; *3* — канавка

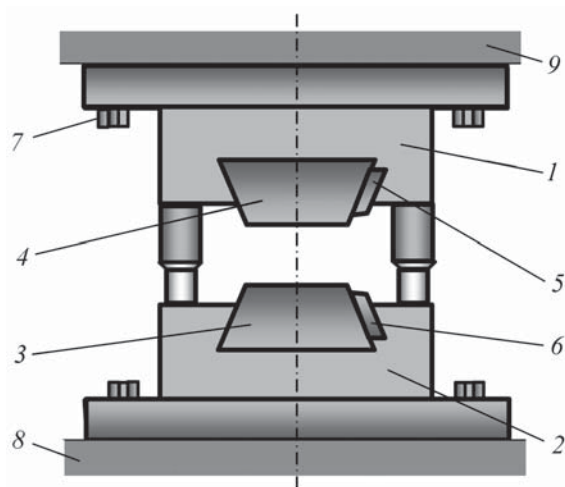


**Рис. 10.15. Принципиальная схема универсального блока со вставками для КГШП:**

1, 2 — соответственно верхний и нижний корпуса, образующие универсальный блок; 3, 4 — соответственно нижняя и верхняя вставки; 5, 6 — соответственно верхний и нижний клин; 7 — болты крепления блока к столу и ползуну пресса; 8 — стол пресса; 9 — ползун пресса

Безударный характер нагрузки при штамповке на КГШП позволяет применять сборные штампы, которые состоят из универсального блока и рабочих ручьевых вставок. Число вставок обычно колеблется от одной до трех. Каждая вставка предназначена для одного ручья и при износе ручья может быть заменена независимо от других. Сборные штампы дают возможность изготовления вставки из легированных инструментальных сталей, а остальные детали штампа: универсальный блок и т.п. — из конструкционных сталей.

Блоки, как правило, включают в себя направляющие колонки, втулки и выталкивающий механизм, работающий от толкателя пресса.

Принципиальная схема универсального блока со вставками показана на рис. 10.15.

Универсальный блок состоит из нижнего 1 и верхнего 2 корпусов, которые крепятся соответственно к столу пресса 8 и ползуну 9 с помощью специальных болтов 7. Рабочие вставки 3 и 4 крепятся в верхнем и нижнем корпусах блока посредством клиньев 5 и 6. Блок имеет направляющие колонки с втулками. Кроме универсальных блоков, которые получили широкое распространение, применяют блоки специальных конструкций со встроенными нагревателями.

Размеры деталей блоков КГШП регламентированы нормами машиностроения МН 4808–63 и МН 4812–63.

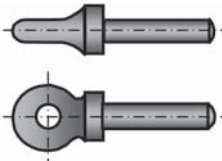
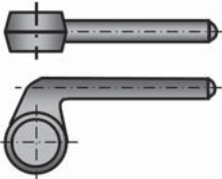
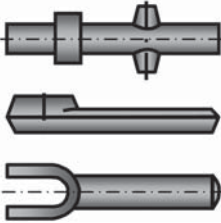
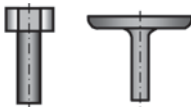
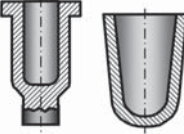
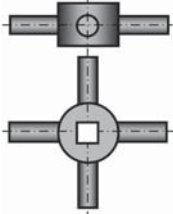
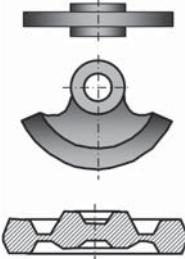
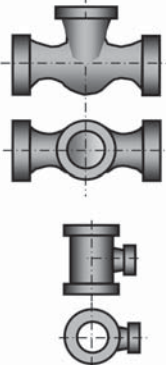
#### 10.4. ШТАМПОВКА НА ЭЛЕКТРОВИНТОВЫХ ПРЕССАХ

Штамповка на электровинтовых прессах занимает промежуточное место между штамповкой на молотах и КГШП. Электровинтовые прессы применяют для изготовления поковок в серийном и массовом производствах при горячей штамповке различных заготовок и деталей из черных и цветных металлов и сплавов. Электровинтовые прессы не предназначены для штамповки с эксцентричным приложением нагрузки, поэтому их, как правило, используют при одноручьевой штамповке с приложением нагрузки вдоль оси пресса. Наличие выталкивателей у винтовых прессов расширяет их технологические возможности по сравнению с молотами.



Поковки, штампуемые на электровинтовых прессах, в зависимости от их сложности условно подразделяют на три группы. Классификация поковок приведена в табл. 10.6.

**10.6. Классификация поковок, изготавливаемых на винтовых прессах**

| Группа                                                           | Подгруппы                                                                                                         |                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                |
|------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                  | а                                                                                                                 | б                                                                                                                                                                              | в                                                                                                                                                              |
| I — поковки удлиненной формы                                     | С прямой осью<br>                | С изогнутой осью<br>                                                                          | С отрезками и развилинами<br>                                                |
| II — поковки круглые и квадратные в плане и близкие к этой форме | В виде стержня с утолщением<br> | С глухой или сквозной полостью<br>                                                           | Сложной формы<br>                                                           |
| III — поковки промежуточной, смешанной и комбинированной форм    | Промежуточной формы<br>        | Смешанной формы (состоящей из элементов, относящихся к предыдущим группам и подгруппам)<br> | Комбинированной формы (штампуют в штампах с двумя плоскостями разреза)<br> |

I группа — поковки удлиненной формы типа молотовых, штампуемые в одном чистовом ручье и редко с применением пережимного или формовочного ручья.

II группа — поковки круглые и квадратные в плане и близкие к ним в виде стержня с утонением на одном конце (болты, винты, заклепки и т.д.), штампуемые высадкой; поковки в виде колпачков и стаканчиков с глухой или сквозной полостями, штампуемые прошивкой в закрытом штампе; поковки сложной формы, например в виде цилиндрических и конических шестерен, крестовины и т. п., штампуемые в открытых штампах.

III группа — поковки промежуточной и смешанной форм, а также с буртами, отростками и отверстиями, например в виде корпусов вентилях, тройников с фланцами и других деталей арматуры трубопроводов, штампуемые в закрытых сборных штампах с двумя плоскостями разъема.

При разработке чертежа поковки, выборе переходов штамповки и определении размеров исходной заготовки используют те же методики и правила, что и при проектировании молотовых поковок соответствующей группы.

### 10.5. ШТАМПОВКА НА ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПРЕССАХ

Гидравлические прессы являются наиболее тихоходными кузнечно-штамповочными машинами (скорость перемещения подвижной траверсы  $\sim 0,1 \dots 0,2$  м/с). Поэтому штамповку на гидравлических прессах выполняют в том случае, если поковка не может быть изготовлена на другом кузнечно-штамповочном оборудовании.

Гидравлические прессы в основном применяют для штамповки очень крупных по габаритным размерам поковок; при штамповке малопластичных сплавов, требующих малой скорости деформирования, а, кроме того, в случаях, когда требуется большой рабочий ход ползуна, например при глубокой прошивке и протяжке полых поковок.

На гидравлических прессах применяют следующие виды штамповки: открытую и закрытую; выдавливанием и прошивкой; в разъемных матрицах, а также протяжку заготовок типа гильз, стаканов и др. При штамповке легких сплавов инструмент обычно подогревают, при штамповке сталей его охлаждают.

Если при штамповке сравнительно длинных поковок силы гидропресса недостаточно для изготовления детали целиком или требуется штамп значительных габаритных размеров, превышающих рабочее пространство пресса, применяют секционную штамповку, т.е. последовательную штамповку по частям. При этом штампуемую заготовку перемещают, например, с помощью выдвижного стола пресса. Секционную штамповку используют, в частности, при изготовлении поковок крупных панелей, длинных коленчатых валов и т.п.

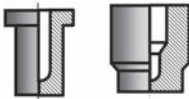
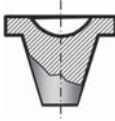
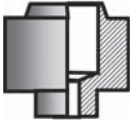
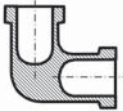
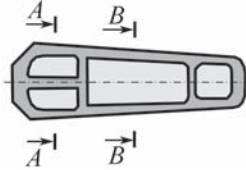
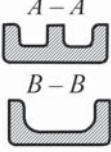
Прошивку и протяжку мелких и средних поковок часто осуществляют на вертикальных гидравлических прессах в двухручьевых штампах с общим корпусом. Крупные поковки прошивают на вертикальных, а протяжку заготовок выполняют на горизонтальных прессах, как правило, с одного нагрева.

Поковки, штампуемые на гидропрессах, можно подразделить на пять групп, приведенных в табл. 10.7.

Составление чертежа поковки, выбор переходов штамповки, определение размеров исходной заготовки осуществляют так же, как и при штамповке на молотах.



**10.7. Классификация поковок, штампуемых на гидравлических прессах**

| Группа                               | Подгруппы                                                                                                  |                                                                                                                |
|--------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                      | а                                                                                                          | б                                                                                                              |
| I — поковки в виде стаканов и втулок | С глубокими полостями<br> | Со сквозными отверстиями<br> |
| II — поковки в виде чашек и втулок   | Сплошные<br>              | С неглубокими полостями<br>  |
| III — поковки фасонные               | Сплошные<br>              | Пустотелые<br>               |
| IV — поковки с боковыми полосками    |                         |                             |
| V — поковки различных панелей и т.п. |                         |                             |

**10.6. ИЗОТЕРМИЧЕСКАЯ ШТАМПОВКА**

Процессы изотермического деформирования отличаются от традиционных способов горячей штамповки тем, что формоизменение нагретой заготовки осуществляют в инструменте (штампе), нагретом до температуры деформирования заготовки. Термин "изотермическое деформирование" отражает условия процесса, а не температуру

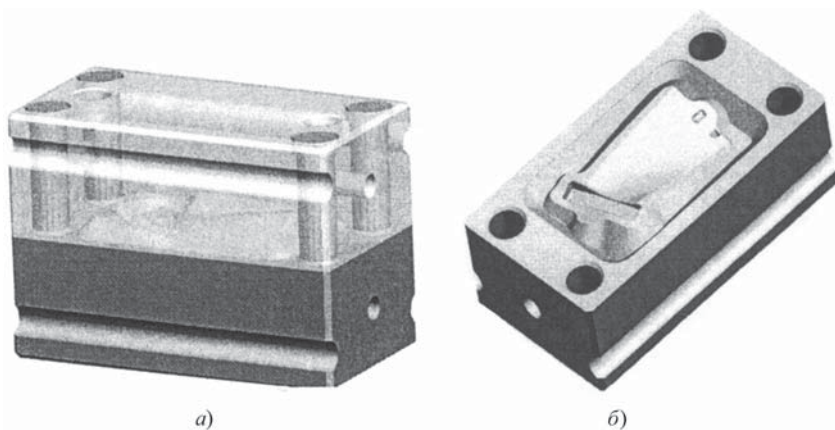


**Рис. 10.16. Компьютерные модели:**

*a* — внешний вид штампа для изотермической штамповки заготовки лопатки авиационного двигателя; *б* — гравюра штампа

штампуемого металла, которая в процессе деформирования будет повышаться благодаря тепловому эффекту деформации (выделению дополнительного количества теплоты при деформировании заготовки).

В настоящее время изотермическую штамповку применяют для получения точных заготовок сложной формы из титановых, алюминиевых и труднодеформируемых жаропрочных сталей и сплавов.

Изотермические условия создают, используя специальные установки, позволяющие со сравнительно небольшими затратами энергии нагревать инструмент до температуры деформации заготовки ( $\sim 1000^\circ\text{C}$ ). Штамповыми материалами обычно служат жаропрочные литейные сплавы типа ЖС6У на никелевой основе. На рис. 10.16 приведена компьютерная модель штампа для изотермической штамповки. Заготовки под изотермическую штамповку нагревают или автономно в нагревательном устройстве, или непосредственно в штамповом блоке. При деформировании в качестве смазки используют различные стеклоэмали и пылевидные вещества.

Основным элементом установок является монтируемый на прессе штамповый блок с нагревательным устройством. На рис. 10.17 показан один из вариантов конструкции штампового блока с нагревательными элементами.

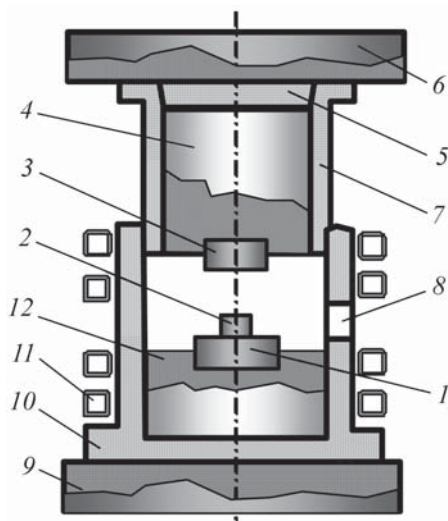


**Рис. 10.17. Схема штампового блока для изотермической штамповки:**

*1, 3* — нижняя и верхняя части штампа; *2* — деформируемая заготовка; *4, 12* — штамподержатели; *5, 7, 10* — теплоизолирующие кожухи; *6, 9* — опорные плиты; *8* — загрузочное окно; *11* — индукторы

Нижняя 1 и верхняя 3 части штампа крепятся соответственно к штамподержателям 12 и 4, которые связаны с плитами 9 и 6. Штамповой блок снабжен теплоизолирующей защитой, выполненной в виде двух кожухов: нижнего неподвижного 10 и верхнего подвижного 7. Кожух 7 при ходе ползуна вверх не выходит из кожуха 10, не нарушая теплоизоляцию. Штампы нагревают, например, с помощью индукторов 11, а загрузка и выгрузка заготовок 2 выполняется через специальное окно 8, выполненное в кожухе 10.

Для изотермической штамповки используют гидравлические прессы, обеспечивающие скорость деформирования до 5 мм/с, а в отдельных случаях — и иное кузнечно-штамповочное оборудование. Гидравлические прессы позволяют иметь различные скорости деформации, что является важным для выполнения изотермической штамповки. На рис. 10.18 приведен общий вид участка изотермической штамповки, в состав которого входят модернизированные гидравлические прессы номинальной силой 6,3 МН (630 тс), а на рис. 10.19 — рабочая зона прессы для изотермической штамповки.

В состав установок для изотермического деформирования входят: система нагрева инструмента с устройством для теплоизоляции штампов и штампового пространства; система терморегулирования, необходимая для стабилизации температуры нагретого



Рис. 10.18. Общий вид участка изотермической штамповки (вид сзади), оснащенного изотермическими установками, выполненными на базе гидравлических прессов с номинальной силой 6,3 МН (630 тс)

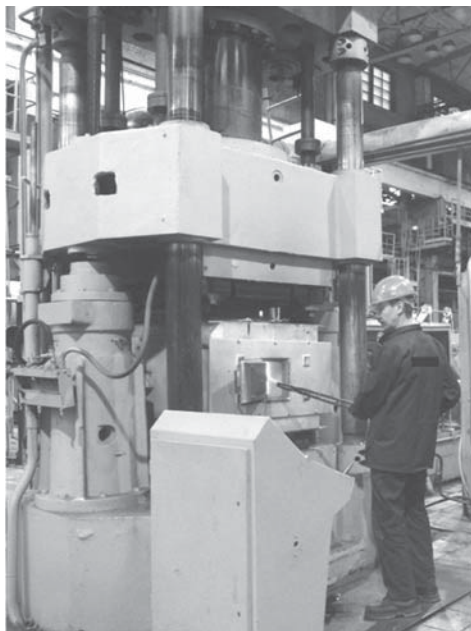


**Рис. 10.19. Рабочая зона пресса для изотермической штамповки**

улучшение пластичности металла, связанное с более полным протеканием разупрочняющих процессов, а также "залечивание" микропор при пониженных скоростях деформации. Изотермические условия открывают большие возможности для штамповки малопластичных в обычных условиях материалов.

Изотермическая штамповка позволяет получать штамповки (поковки) повышенной точности и сложной конфигурации (рис. 10.20), изготовление которых объемной штамповкой затруднительно, с небольшими штамповочными уклонами или без них, с резкими перепадами сечений, малыми радиусами и припусками на обработку резанием, сложной формы с минимальным числом переходов штамповки. Высокая точность штамповок обеспечивается:

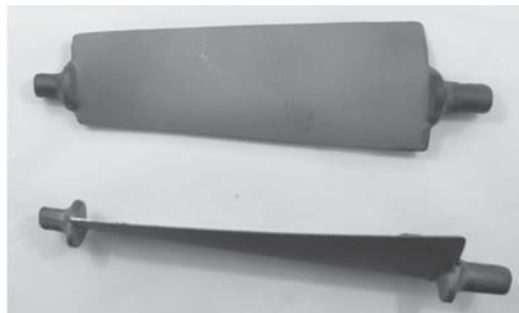


**Рис. 10.20. Заготовки титановых лопаток авиационного двигателя, отштампованные в изотермических условиях**

инструмента; система охлаждения. Снижение скорости деформации заготовки при изотермической штамповке смещает динамическое равновесие между процессами деформационного упрочнения и термического разупрочнения, что ведет к значительному уменьшению силы деформирования. Этому способствует также и применение эффективных стеклосмазок.

Уменьшение силы деформирования позволяет использовать для изотермической штамповки менее мощное оборудование, экономя производственные площади и энергию. Изотермическая штамповка способствует уменьшению числа переходов штамповки деталей сложной формы и реализации возможности многоступенчатой штамповки, особенно для деталей простой геометрической формы.

Значительное уменьшение контактного трения благодаря применению стеклосмазочных материалов и однородность температурного поля повышают равномерность деформации.

Существенным преимуществом изотермического деформирования является

- путем уменьшения упругих деформаций системы пресс-штамп из-за значительного снижения сопротивления деформированию штампуемого металла;
- посредством сокращения диапазона колебаний температуры деформирования и, как следствие, повышения стабильности геометрических размеров поковок;
- снижением остаточных напряжений в объеме штамповки, что позволяет уменьшить ее поводки при остывании и термообработке;
- уменьшением толщины поверхностного дефектного слоя и улучшением качества поверхности поковок в результате меньшего взаимодействия нагретого металла с окружающей средой, а также применением эффективных защитно-смазочных покрытий на основе стекла (например, стеклосмазок типа ЭВТ-24, ЭВТ-25 и др.).

Изотермические условия расширяют возможности выбора оптимального термомеханического режима деформации заготовки и при определенных условиях позволяют осуществлять штамповку в состоянии сверхпластичности.

Для создания изотермических условий могут быть использованы электрические тэновые и спиральные, индукционные и газовые нагревательные установки.

При разработке чертежа штамповки и определении формы и числа промежуточных переходов пользуются теми же рекомендациями, что и дляковки на молотах, соответственно уменьшив уклоны и припуски.



## Глава 11

# ОБРАБОТКА ДАВЛЕНИЕМ АВИАЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

---

---

### 11.1. ОБРАБОТКА ДАВЛЕНИЕМ ЛЕГИРОВАННЫХ ТЕПЛО- И КОРРОЗИОННО-СТОЙКИХ СТАЛЕЙ

Развитие современных отраслей промышленности, особенно авиационной, оборонной и др., связано с применением труднодеформируемых высокопрочных сталей и сплавов с особыми физико-химическими свойствами. Изготовление высококачественных поковок и штамповок из этих материалов усложняется тем, что эти материалы значительно трудней поддаются обработке давлением, чем обычные конструкционные углеродистые стали, что обусловлено их пониженной пластичностью, более высоким сопротивлением деформированию, низкой теплопроводностью и сравнительно узким температурным интервалом штамповки. Поэтому при изготовлении штамповок из труднодеформируемых материалов очень важно правильно установить температурный интервал горячей деформации, т.е. температуру начала и конца штамповки.

Главными факторами, определяющими температурный интервал штамповки, являются химический состав и свойства стали. Для данных материалов в силу их теплофизических свойств (низкой теплопроводности) важно строго соблюдать режимы нагрева и время выдержки заготовок в печи перед горячей штамповкой.

По режиму нагрева под горячую пластическую деформацию легированные, тепло- и коррозионно-стойкие стали можно разделить на две группы: группа I — конструкционные легированные стали; группа II — тепло- и коррозионно-стойкие стали. Время нагрева заготовок устанавливают в зависимости от диаметра (толщины) нагреваемой заготовки. Время выдержки заготовок в печи перед горячей штамповкой, определяемое с момента нагрева металла до заданной температуры, рекомендуется брать для группы I сталей из расчета 1 мин на каждые 4 мм диаметра (толщины) заготовки, а для сталей группы II — 1 мин на каждые 3 мм диаметра. Максимальное время пребывания в печи при температуре штамповки заготовок диаметром или стороной квадрата до 250 мм не должно превышать 1...2,5 ч.

Температурные интервалы горячей штамповки для данных материалов с увеличением степени легирования стали становятся более узкими: так, например, для углеродистых сталей температурный интервал штамповки составляет ~600 °С, для сталей группы I порядка 330 °С, а для сталей группы II ~260 °С. Для уменьшения окалины или обезуглероженного слоя в некоторых случаях верхнюю границу температурного интервала необходимо снижать.

Иногда из-за недостаточной мощности используемого оборудования требуется повышение температуры штамповки, но при этом необходимо иметь в виду, что отклонение от оптимального режима допустимо только в тех случаях, когда оно не оказывает отрицательного действия на качество штамповок.

Горячую штамповку указанных материалов не рекомендуется вести при температурах ниже температур конца интервала горячего деформирования, так как эти материалы отличаются повышенным сопротивлением деформации и сниженной тем-

## 11.1. Температурные интервалы штамповки для сталей

| Группа стали | Марка стали                                                                                                                                                                                                                                           | Температурный интервал штамповки, °С |       | Охлаждение после штамповки                                                                                                                                |
|--------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|              |                                                                                                                                                                                                                                                       | Начало                               | Конец |                                                                                                                                                           |
| I            | 20Х, 40Х, 50Х, 38ХА, 18ХГТ, 12Х2Н4А, 18Х2Н4ВА, 12ХН3А, 40ХН2МА, 20ХН3А, 30Х3ВА, 38ХМЮА, 30ХГСА, 40ХФА, 50ХФА, 40ХН2СВА, 25ХГТ, 12Х2НВФА, 40ХН, 15ХМА, 40ХС, 45ХН, 40ХГМ, 20ХГНМ                                                                       | 1180                                 | 850   | На воздухе                                                                                                                                                |
| II           | 14Х17Н2 (ЭИ 268), 13Х11Н2В2МФ (ЭИ 961), 20Х3МВФ (ЭИ 415), 12Х21Н51 (ЭИ 811), 12Х17Г9АН4 (ЭИ 878), 12Х18Н9Т, 07Х16Н6, 45Х14Н14В2М (ЭИ 69), 12Х13, 20Х13, 30Х13, 40Х13, 12Х17, 95Х18, 12Х25Н16Г7АР (ЭИ 835), 08Х18Н12Б (ЭИ 402), ЭИ 962, ЭИ 684, ЭИ 736 | 1160                                 | 900   | На воздухе, кроме сталей марок 14Х17Н2, 12Х13, 20Х13, 30Х13, 40Х13, 12Х17, 95Х18, для которых требуется медленное охлаждение в таре, термостате или песке |

пературой штамповки до значения ниже нижней границы интервала горячей деформации, что приводит к резкому возрастанию силы деформирования и увеличению неоднородности напряженно-деформированного состояния, а это, в свою очередь, грозит образованием трещин на штамповках.

Температурные интервалы штамповки для сталей приведены в табл. 11.1.

Кроме температурного интервала и режима нагрева важное влияние на качество штамповки оказывают степень и скорость деформации. Изготовление штамповок (поковок) в кузнечно-штамповочных цехах производят на кузнечно-прессовом оборудовании, имеющем различные скорости движения рабочего инструмента.

**Скорости деформирования  $v_{\text{деф}}$  (м/с) для различного кузнечно-прессового оборудования**

Молоты:

паровоздушный штамповочный (ПШМ) . . . . . 6...8  
 бесшамотный штамповочный (БШМ) . . . . . 3...4  
 высокоскоростной (ВСМ) . . . . . 20...30

|                                                |           |
|------------------------------------------------|-----------|
| винтовой пресс-молот (ВПМ). . . . .            | 0,6...2   |
| Прессы:                                        |           |
| кривошипный горячештамповочный (КГШП). . . . . | 0,5...0,8 |
| фрикционный (ФП) . . . . .                     | 3...4     |
| гидравлический штамповочный (ГШП). . . . .     | 0,1...0,2 |
| Горизонтально-ковочная машина (ГКМ) . . . . .  | 0,5...0,8 |

Допустимая степень деформации для любых материалов, подвергаемых горячей штамповке, обуславливается запасом технологической пластичности при заданных термомеханических режимах штамповки (температуре, степени и скорости деформации). Допустимые степени деформации групп сталей при осадке и выдавливании на различном кузнечно-прессовом оборудовании для рекомендованного интервала горячей обработки приведены в табл. 11.2.

Представленные в этой таблице значения допустимых степеней деформации даны для различных схем напряженно-деформированного состояния. Наиболее неблагоприятную схему напряженно-деформированного состояния имеет свободная осадка, при которой наблюдаются две главные составляющие — напряжение и деформация (растяжение), а третья составляющая — сжатие. При других более мягких схемах объемного напряженного и деформированного состояния будет возрастать пластичность сталей и, соответственно, увеличиваться допустимые степени деформации.

Как видно из табл. 11.2, при штамповке на высокоскоростном оборудовании допустимые степени деформации при одной и той же схеме объемного напряженно-деформированного состояния выше, чем при штамповке на ином оборудовании со скоростью деформирования до 9 м/с. Повышение пластичности при штамповке на высокоскоростных молотах достигается путем улучшения температурного режима штамповки, обусловленного малым временем деформирования (в несколько тысячных долей секунды — деформирование осуществляется вследствие этого в узком температурном интервале при незначительном изменении температуры в квазиизотермических условиях); уменьшения окалинообразования в результате отсутствия снижения температуры заготовки из-за передачи теплоты от заготовки более холодному инструменту; благодаря повышению внутренней объемной температуры заготовки за счет деформационной теплоты, выделяющейся вследствие внутреннего трения при ее деформировании.

**11.2. Допустимые степени деформации сталей, в %**

| Группа стали | Штамповочное<br>оборудование,<br>$v_{\text{деф}} < 9 \text{ м/с}$ | ВСМ,<br>$v_{\text{деф}} = 20...30 \text{ м/с}$ | КГШП, ФП, ВПМ<br>$v_{\text{деф}} = 0,5...4,0 \text{ м/с}$ |
|--------------|-------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
|              | Осадка                                                            |                                                | Выдавливание                                              |
| I            | 80                                                                | 90                                             | 90                                                        |
| II           | 60                                                                |                                                |                                                           |



Критическая степень деформации для сталей групп I и II составляет 5...15 %. Для предотвращения образования трещин у штамповок из некоторых марок сталей их охлаждение после горячей штамповки следует выполнять медленно в специальных футерованных коробках-термостатах, металлических ящиках в песке или других устройствах.

Для мартенситных сталей после охлаждения для исключения трещин необходимо проводить высокотемпературный отпуск после каждого перехода горячей деформации.

Для расчета и правильного выбора мощности кузнечно-штамповочного оборудования кроме параметров штамповки, термомеханических режимов и применяемого класса оборудования необходимо знать напряжение текучести  $\sigma_z$  при температуре штамповки. При практических расчетах потребной силы штамповки значения  $\sigma_T$  при температуре деформирования заготовки можно принимать равными пределу прочности  $\sigma_B$  при той же температуре. Значения пределов прочности  $\sigma_B$  для некоторых марок сталей при различных температурах приведены в табл. 11.3.

**11.3. Пределы прочности  $\sigma_B$  (МПа) во время растяжения сталей при различных температурах**

| Группа стали | Марка стали | Температура, °С |     |         |      |
|--------------|-------------|-----------------|-----|---------|------|
|              |             | 20              | 800 | 900     | 1000 |
| I            | 38ХА        | 675             | 79  | 48      | 32   |
|              | 12ХН3А      | 640             | 81  | 52      | 40   |
|              | 12Х2Н4А     | 500             | 705 | 36      | 24   |
|              | 30Х3ВА      | —               | 80  | 60      | 42   |
|              | 40Х3ВА      |                 | 75  | 30...40 | 20   |
|              | 30ХГСА      | 700             | 79  | 40...50 | 36   |
|              | 18Х2Н4ВА    | 1220            | 113 | 50...70 | 45   |
|              | 38ХМЮА      | —               | 80  | 66      | 46   |
|              | 60С2А       | 1021            | 81  | 57      | 34   |
|              | 18ХГТ       | —               | 80  | 60...70 | 48   |

Окончание табл. 11.3

| Группа стали | Марка стали             | Температура, °С |           |           |          |
|--------------|-------------------------|-----------------|-----------|-----------|----------|
|              |                         | 20              | 800       | 900       | 1000     |
| II           | 14X17H2 (ЭИ 268)        | 800             | 140       | 80        | 67       |
|              | 12X18H9T (X18H9T)       | 554             | 180       | 100...140 | 70...100 |
|              | 12X13 (1X13)            | 458             | 75        | 60...70   | 52       |
|              | 20X13 (2X13)            | 500             | 76        | 70        | 60       |
|              | 12X21H5T (ЭИ 811)       | 750             | 145       | 77        | 62       |
|              | 12X17Г9АН4 (ЭИ 878)     | 780             | 250...280 | 238       | 117      |
|              | 12X25H16Г7АР (ЭИ 835)   | 800...870       | 290...360 | 218       | 106      |
|              | 95X18 (9X18, ЭИ 229)    | 770             | 118       | 102       | 85       |
|              | 08X18H12Б (ЭИ 402)      | 612             | 230...250 | 180       | 82       |
|              | 07X16H6 (X16H6, ЭП 288) | 900...1100      | 185       | 102       | 60       |
|              | 13X11H2B2МФ (ЭИ 961)    | 820             | 206       | 140       | 68       |
|              | 45X14H14B2М (ЭИ 69)     | 720             | 230       | 146       | 72       |

Из этой таблицы видно, что для сталей группы I при температуре конца штамповки  $\sigma_b$  изменяется от 30 до 70 МПа, для сталей группы II  $\sigma_b$  изменяется от 10 до 200 МПа.

## 11.2. ОБРАБОТКА ДАВЛЕНИЕМ ЖАРОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА И НИКЕЛЯ

Жаропрочные стали и сплавы, применяемые в авиационном двигателестроении для изготовления наиболее нагруженных деталей современных газотурбинных двигателей (дисков турбин, компрессорных и турбинных лопаток, крепежных деталей, силовых колец, турбинных и компрессорных валов, деталей турбонасосных агрегатов, сопловых устройств и т.д.) характеризуются тем, что термомеханические режимы их горячего деформирования коренным образом отличаются от термомеханических режимов деформирования легированных и тем более углеродистых конструкционных сталей.

Эти отличия заключаются в более высоком сопротивлении деформированию, более низкой технологической пластичности, более узком температурном интервале штамповки, более низкой теплопроводности, требующей более сложных условий нагрева.

Жаропрочные стали и сплавы на железоникелевой и никелевой основах относятся к сложнолегированным гетерофазным материалам, степень их легирования определяет уровень жаропрочности и технологической пластичности при горячей обработке давлением.

Термомеханические режимы горячей деформации жаропрочных сталей и сплавов сильно влияют на структуру, размер зерна и механические свойства изготавливаемых деталей. Поэтому при назначении термомеханических режимов горячей штамповки заготовок из жаропрочных сталей и сплавов следует учитывать возможность не только получения необходимой геометрической формы штамповки, но и получения заготовки с заданными в технических условиях механическими свойствами. Из-за низкой теплопроводности жаропрочных сталей и сплавов для исключения трещин и обеспечения равномерного прогрева по сечению нагрев под горячую деформацию данных материалов надо проводить до температуры 800...900 °С медленно, с выдержкой при определенных температурах.

Начиная с 800...900 °С, скорость нагрева может быть увеличена. Общее время нагрева заготовок из жаропрочных сталей и сплавов по сравнению с конструкционными легированными сталями того же сечения должно быть увеличено в 2–3 раза. Общее время нахождения в печи заготовок при температуре, соответствующей температуре штамповки, не должно превышать 2 ч. Температурные интервалы штамповки жаропрочных сталей и сплавов приведены в табл. 11.4.

#### 11.4. Температурные интервалы горячей штамповки жаропрочных сталей и сплавов

| Материал          | Марка материала        | Температурный интервал штамповки, °С |       |
|-------------------|------------------------|--------------------------------------|-------|
|                   |                        | Начало                               | Конец |
| Жаропрочные стали | 2X18H12C4TЮ (ЭИ 654)   | 1160                                 | 950   |
|                   | 37X12H8Г8МФБ (ЭИ 481)  |                                      | 980   |
|                   | 10X11H20T3P (ЭИ 696)   | 1100                                 | 900   |
|                   | 10X11H23T3MP (ЭП 33)   |                                      |       |
|                   | 40X15H7Г7Ф2МС (ЭИ 388) | 1130                                 | 980   |
|                   | ХН35ВТЮ (ЭИ 787)       | 1100                                 | 900   |
|                   | ХН35МТЮ (ЭП 105)       |                                      |       |

Окончание табл. 11.4

| Материал              | Марка материала     | Температурный интервал<br>штамповки, °С |       |      |
|-----------------------|---------------------|-----------------------------------------|-------|------|
|                       |                     | Начало                                  | Конец |      |
| Жаропрочные<br>стали  | ЭИ 395              | 1100                                    | 960   |      |
|                       | X15H30BMT (ЭП 437)  | 1120                                    | 900   |      |
| Жаропрочные<br>сплавы | XH78T (ЭИ 435)      | 1180                                    | 980   |      |
|                       | XH77ТЮР (ЭИ 437Б)   | 1150                                    |       |      |
|                       | XH60BT (ЭИ 868)     | 1180                                    | 1050  |      |
|                       | XH70MBТЮБ (ЭИ 598)  |                                         |       |      |
|                       | XH77ТЮ (ЭИ 437А)    | 1150                                    | 980   |      |
|                       | XH77ТЮРУ (ЭИ 437БУ) |                                         |       |      |
|                       | XH70BMTЮ (ЭИ 617)   | 1190                                    | 1060  |      |
|                       | XH70BMTЮФ (ЭИ 826)  | 1170                                    |       |      |
|                       | XH62BMKЮ (ЭИ 867)   | 1190                                    |       | 1070 |
|                       | XH56BMKЮ (ЭП 109)   |                                         |       |      |
|                       | XH56BMTЮ (ЭП 199)   | 1180                                    | 1000  |      |
|                       | XH55BMTKЮ (ЭИ 929)  |                                         | 1060  |      |
|                       | ЖС6-КП              | 1120                                    | 1050  |      |
|                       | XH70BMЮТ (ЭИ 765)   | 1180                                    |       |      |
|                       | XH65BMTЮ (ЭИ 893)   |                                         |       |      |

Из данной таблицы видно, что жаропрочные стали и сплавы имеют более узкий температурный интервал горячей штамповки, чем легированные конструкционные стали. Для жаропрочных сталей он составляет ~200 °С, а для жаропрочных сплавов ~150 °С. Температуры начала горячей штамповки для жаропрочных сталей и спла-

вов назначают на 30...40 °С выше температуры нагрева под закалку. При данной температуре сплавы имеют однофазное состояние, обеспечивающее получение более качественных штамповок. Предел прочности жаропрочных сталей и сплавов при температуре конца горячей штамповки в 2–5 раз выше, чем у углеродистых конструкционных и легированных коррозионно-стойких сталей.

При температуре <1000 °С предел прочности  $\sigma_b$  жаропрочных сплавов резко возрастает. Это связано с тем, что при снижении температуры скорость рекристаллизации становится меньше скорости деформационного упрочнения и горячая обработка давлением будет сопровождаться динамическим наклепом. Оптимальными условиями горячей деформации являются условия, при которых соблюдается динамическое равновесие между деформационным динамическим упрочнением и разупрочнением-рекристаллизацией. При снижении температуры горячей штамповки до значения <950 °С деформация жаропрочных сплавов сопровождается интенсивным деформационным упрочнением, способствующим образованию грубой разноструктурности при последующем нагреве под термическую обработку. В этом случае в результате термообработки в поковке развивается зональная рекристаллизация с образованием крупных зерен, снижающих пластичность, жаро- и усталостную прочность деталей в эксплуатации.

Причиной разноструктурности могут быть также холодный или недостаточно прогретый штамповочный инструмент, чрезмерно обильная и неоптимальная смазка, которые могут вызвать местное захлаживание штамповки и, как следствие, высокие локальные напряжения, местный наклеп и зональную рекристаллизацию в штамповках при последующей термообработке.

Для предотвращения грубой разноструктурности в штамповках, связанной с зональной рекристаллизацией, необходимо обеспечить отсутствие подхлаживания заготовки в процессе горячей штамповки, быстрый перенос заготовки от печи к штамповочному оборудованию, а штамповку проводить в предварительно нагретых штампах.

При выполнении горячей штамповки на молотах нельзя допускать интенсивного разогрева металла в очаге деформации, для чего деформирование заготовки следует проводить слабыми ударами.

Если при изготовлении штамповки ее невозможно сформировать окончательно за один ход машины вследствие низкой технологической пластичности жаропрочных сплавов, допускается доштамповка ее за два-три хода машины с промежуточным подогревом или нагревами до температур, соответствующих температуре начала штамповки.

Допустимые степени деформации жаропрочных сталей и сплавов приведены в табл. 11.5.

Как уже отмечалось, при горячей штамповке труднодеформируемых жаропрочных сталей и сплавов с малыми скоростями деформирования диффузионные процессы протекают более полно, что обеспечивает завершение рекристаллизации и разупрочнения металла и повышает возможность увеличения допустимой деформации за один ход машины. При горячей штамповке с большими скоростями деформирования (20...30 м/с) допустимая степень деформации за один ход машины для жаропрочных сталей несколько возрастает, а для жаропрочных сплавов остается на том же уровне. Увеличение технологической пластичности жаропрочных сталей при

**11.5. Допустимые степени деформации жаропрочных сталей и сплавов, %**

| Материал           | Штамповочное<br>оборудование,<br>$v_{\text{деф}} < 9 \text{ м/с}$ | ВСМ,<br>$v_{\text{деф}} = 20...30 \text{ м/с}$ | КГШП, ФП,<br>ВПМ |
|--------------------|-------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------|
|                    | Осадка                                                            |                                                | Выдавливание     |
| Жаропрочные стали  | 60                                                                | 80...85                                        | 90               |
| Жаропрочные сплавы | 40...50                                                           |                                                | 80...90          |

горячей штамповке на высокоскоростном оборудовании происходит путем повышения температуры заготовки в процессе деформирования.

Чтобы улучшить производительность и качество штамповок посредством увеличения допустимых степеней деформации за один ход машины, горячую штамповку труднодеформируемых жаропрочных сталей и сплавов рекомендуется проводить методом горячего выдавливания или в закрытых штампах с противодавлением. В этом случае благодаря обеспечению мягкой схемы напряженно-деформированного состояния жаропрочные стали и сплавы можно деформировать при температуре начала горячей деформации без разрушения со степенями деформации за один ход машины до 90 % и тем самым сократить число предварительных переходов штамповки.

**11.6. Допустимые степени деформации жаропрочных сплавов  
за один ход машины в зависимости от направления деформирования**

| Марка сплава                                                         | Допустимая степень деформации (%) за один ход<br>машины при направлении деформирования |                                    |
|----------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|
|                                                                      | вдоль оси заготовки                                                                    | перпендикулярно<br>к оси заготовки |
| ХН77ТЮР (ЭИ 437Б),<br>ХН70МВТЮБ (ЭИ 598),<br>ХН70ВМТЮ (ЭИ 617)       | 65,5                                                                                   | 40...50                            |
| ХН70ВМТЮФ (ЭИ 826),<br>ХН51ВМТЮКФР (ЭП 220),<br>ХН55ВМТФКЮР (ЭИ 929) | 55,0                                                                                   | 35...45                            |
| ХН56ВМКЮ (ЭП109),<br>ХН62ВМКЮ (ЭИ 867)                               | 50,0                                                                                   | 30...40                            |
| ЖС6-КП                                                               | 40,0                                                                                   | 20...30                            |

При разработке технологических процессов изготовления штамповок из жаропрочных сталей и сплавов необходимо учитывать анизотропию свойств, проявляемую данными материалами в различных направлениях. Так, например, допустимая деформация при осадке вдоль оси заготовки будет больше, чем при штамповке перпендикулярно к оси заготовки. Допустимые степени деформации жаропрочных сплавов в зависимости от направления деформирования приведены в табл. 11.6.

Число переходов при горячей штамповке определяется допустимой степенью деформации за один ход машины и должно быть минимальным. Критические степени деформации при горячей обработке давлением жаропрочных сталей и сплавов находятся в пределах 1...12 %. Пределы прочности жаропрочных сталей и сплавов для различных температур приведены в табл. 11.7. Так как пределы прочности у жаропрочных сталей и сплавов при температуре конца горячей штамповки значительно выше, чем у конструкционных углеродистых и легированных коррозионно-стойких

**11.7. Пределы прочности при растяжении  $\sigma_b$  (МПа) жаропрочных сталей и сплавов при различных температурах**

| Материал           | Марка материала        | Температура, °C |         |         |       |
|--------------------|------------------------|-----------------|---------|---------|-------|
|                    |                        | 20              | 900     | 1000    | 1100  |
| Жаропрочные стали  | 2X18H12C4ТЮ (ЭИ 654)   | 80              | —       |         |       |
|                    | 37X12H8Г8МФБ (ЭИ 481)  | 95              |         |         |       |
|                    | 10X11H20ТЗР (ЭИ 696)   | 95...110        |         |         |       |
|                    | 10X11H23ТЗМР (ЭП 33)   | 90...100        |         |         |       |
|                    | 40X15H7Г7Ф2МС (ЭИ 388) | 100             | 25      | 16      | 10    |
|                    | ХН35ВТЮ (ЭИ 787)       | 105...125       | 20...25 | 14...16 | —     |
|                    | ХН35МТЮ (ЭП 105)       | 95...120        | 24      | 7,3     | 4,5   |
|                    | ЭП395                  | 98              | 18      | 12      | —     |
|                    | X15H30ВМТ (ЭП 437)     | 95...107        | 18...20 | —       |       |
| Жаропрочные сплавы | ХН78Т (ЭИ 435)         | 73...78         | 10...12 | 6...7   | 4...5 |
|                    | ХН77ТЮР (ЭИ 437Б)      | 95...110        | 30      | 8,5     | 6,5   |
|                    | ХН60ВТ (ЭИ 868)        | 75...90         | 21...25 | 13...16 | 8...9 |
|                    | ХН70МВТЮБ (ЭИ 598)     | 100...110       | 25...40 | —       |       |
|                    | ХН77ТЮ (ЭИ 437А)       | 100             | 37...38 | 9       | 7     |
|                    | ХН77ТЮРУ (ЭИ 437БУ)    | 100...115       | 38      | 9,1     | 7,2   |

Окончание табл. 11.7

| Материал           | Марка материала      | Температура, °С |         |         |      |
|--------------------|----------------------|-----------------|---------|---------|------|
|                    |                      | 20              | 900     | 1000    | 1100 |
| Жаропрочные сплавы | ХН70ВМТЮ (ЭИ 617)    | 114             | 49      | 14...18 | —    |
|                    | ХН70ВМТЮФ (ЭИ 826)   | 110...115       | 50...60 | 15...20 |      |
|                    | ХН55ВМТКФЮР (ЭИ 929) | 100...120       | 60...70 | 25...32 |      |
|                    | ХН62МВКЮ (ЭИ 867)    | 110...125       | 55...70 | 25...35 |      |
|                    | ХН56ВМКЮ (ЭП 109)    | 110...130       | 65...80 | 35...45 |      |
|                    | ХН56ВМТЮ (ЭП 199)    | 100...115       | 52...65 | 12...16 |      |

сталей, то для изготовления штамповок из них требуется оборудование большой мощности. Таким образом, для изготовления высококачественных поковок из жаропрочных сталей и сплавов необходимо строго соблюдать термомеханические режимы горячей штамповки, установленные для каждого сплава и стали, и предельные степени деформации, допустимые за один ход машины.

### 11.3. ОБРАБОТКА ДАВЛЕНИЕМ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

Титан является полиморфным металлом с фазовым превращением при температуре 882 °С. Ниже температуры фазового превращения титан имеет устойчивую гексагональную плотноупакованную кристаллическую решетку  $\alpha$ -титана. При температуре выше температуры фазового превращения для титана устойчива объемноцентрированная кубическая решетка  $\beta$ -титана.

Титановые сплавы обладают важными преимуществами перед другими конструкционными материалами: высокой удельной прочностью и жаропрочностью в сочетании с хорошей коррозионной стойкостью в большинстве агрессивных сред. Поэтому титановые сплавы находят широкое применение в авиационном моторостроении, их применение позволяет уменьшить силу тяжести двигателя при сохранении запасов прочности.

Титановые сплавы превосходят по удельной прочности большинство коррозионно- и теплостойких сталей, работающих в диапазоне до 500 °С. Недостатками титановых сплавов являются низкие антифрикционные свойства и высокая химическая активность при определенных условиях. При трении титановые сплавы склонны к схватыванию, что необходимо учитывать при изготовлении деталей, длительно работающих при больших удельных давлениях.

В настоящее время разработаны научные основы ионного азотирования, альфирования, борирования титановых сплавов, что позволяет значительно расширить область их применения в авиационном двигателестроении. Основная область использования титановых сплавов — это диски, лопатки, кольца, опоры и другие детали компрессоров газотурбинных двигателей.



Горячая обработка давлением титановых сплавов имеет больше общего с горячей деформацией сталей, чем цветных сплавов. Однако есть и существенные особенности, которые необходимо учитывать при их горячей обработке давлением. Нарушение режимов нагрева и горячего деформирования титановых сплавов может привести к ухудшению макро- и микроструктуры, а также к снижению механических свойств. Причем для большинства титановых сплавов улучшить макро- и микроструктуру и поднять механические свойства последующей термической обработкой невозможно. Рекомендуемые температурные интервалы горячей штамповки титановых сплавов приведены в табл. 11.8.

**11.8. Температурные интервалы горячей штамповки титановых сплавов**

| Марка сплава | Структура сплава | Температурный интервал штамповки, °С |            |
|--------------|------------------|--------------------------------------|------------|
|              |                  | на прессах ВПМ, ГKM                  | на молотах |
| BT1-0        | $\alpha$         | 890...650                            | 920...700  |
| BT-18        |                  | 1020...900                           | 1080...950 |
| BT5          |                  | 1020...850                           | 1100...900 |
| BT5-1        |                  |                                      |            |
| OT4-0        | Псевдо- $\alpha$ | 890...650                            | 950...700  |
| OT4-1        |                  | 910...700                            |            |
| OT4          |                  | 930...750                            | 950...800  |
| OT4-2        |                  | 950...800                            | 1020...900 |
| BT4          |                  | 970...800                            | 980...850  |
| BT20         |                  | 1000...850                           | 1020...900 |
| BT3-1        | $\alpha + \beta$ | 950...800                            | 980...850  |
| BT6          |                  | 950...750                            | 970...800  |
| BT6C         |                  | 940...750                            | 960...800  |
| BT8          |                  | 980...800                            | 1000...850 |
| BT9          |                  |                                      |            |
| BT14         |                  | 940...750                            | 960...800  |
| BT16         |                  | 840...700                            | 860...750  |
| BT22         |                  | 840...750                            | 900...800  |
| BT23         |                  | 870...750                            | 880...750  |
| BT25         |                  | 990...850                            | 1020...850 |
| BT15         | $\beta$          | 920...700                            | 930...800  |
| BT30         |                  | 930...700                            | 950...800  |

При нагреве титановых сплавов выше температуры 400...500 °С на поверхности заготовок появляется оксидная пленка и происходит насыщение газами (кислородом, азотом, водородом) поверхности титана с образованием альфированного слоя, который значительно снижает пластичность титановых сплавов. Для уменьшения газонасыщения и улучшения структуры металла время нагрева заготовок из титановых сплавов должно быть по возможности минимальным, но достаточным для выравнивания температуры по сечению заготовки. Для выравнивания температуры заготовки из титановых сплавов по всему сечению требуется ~ 40 с на 1 мм диаметра (толщины) при температуре выдержки  $\geq 1000$  °С и 60 с на 1 мм диаметра (толщины) при более низких температурах. Из-за узкого температурного интервала горячей штамповки (100...200 °С) горячую деформацию титановых сплавов необходимо выполнять в подогретых штампах.

Титановые сплавы деформируются крайне неравномерно, поэтому для получения однородной структуры и механических свойств их следует подвергать большой суммарной пластической деформации при горячей штамповке. Допустимые и критические степени деформации при горячей обработке давлением титановых сплавов приведены в табл. 11.9.

Как видно из табл. 11.9, для титановых сплавов имеются две области критических деформаций. Поэтому при разработке технологического процесса горячей деформирования титановых сплавов необходимо, чтобы назначаемые деформации заготовки на технологических переходах за один ход машины находились в области выше минимальных критических и ниже максимальных критических, т.е.  $>15$  % и  $<85$  %. Пластичность ( $\alpha + \beta$ )-титановых сплавов снижается тем больше, чем заметнее разница в прочностных свойствах  $\alpha$ - и  $\beta$ -фаз. При значительной разнице в прочностных свойствах фаз возрастает неоднородность пластической деформации.

Оптимальной деформацией за один нагрев или подогрев для горячей объемной штамповки является деформация, равная 40...50 % при штамповке ниже температуры  $\alpha + \beta \rightarrow \beta$  и 70 % — при штамповке в  $\beta$ -области. Допускается горячая деформация за один ход машины при штамповке из  $\beta$ -области до 40 % при температуре, не более чем на 30...40 °С, превышающей температуру фазового превращения  $\alpha + \beta \rightarrow \beta$ . Температуры фазовых превращений в титановых сплавах приведены в табл. 11.10.

Сила деформирования титана и его низко- и среднелегированных сплавов при высоких температурах ( $\beta$ -область) ниже силы деформирования жаропрочных сплавов в 1,5—2 раза. При горячей деформации в двухфазной ( $\alpha + \beta$ )-области сила деформирования титановых сплавов близка к силе деформирования жаропрочных сплавов. Сила деформирования высоколегированных титановых сплавов (BT15, BT18, BT20, BT22) при деформации в области температур, близких к температуре конца штамповки, на 30...50 % выше силы деформирования жаропрочных сплавов. Пределы прочности при растяжении титановых сплавов при различных температурах приведены в табл. 11.11.

Горячую деформацию титановых сплавов проводят на паровоздушных и высокоскоростных молотах, кривошипных, гидравлических, фрикционных и электровинтовых прессах. Наиболее перспективным методом горячей штамповки титановых сплавов является изотермическая штамповка.

11.9. Допустимые и критические степени деформации при горячей деформации титановых сплавов

| Степень деформации, %                                           |                         |            |                          |        |                                      |                           |                        |
|-----------------------------------------------------------------|-------------------------|------------|--------------------------|--------|--------------------------------------|---------------------------|------------------------|
| Марка сплава                                                    | оптимальная при посадке |            | допустимая при штамповке |        |                                      | критическая при штамповке |                        |
|                                                                 | на прессе<br>ГКМ        | на молотах | на молоте,<br>прессе     | на ВСМ | выдавливанием<br>на КГШП, ФП,<br>ВПМ | на молоте,<br>прессе      | ВСМ                    |
|                                                                 |                         |            |                          |        |                                      |                           |                        |
| ОТ4, ОТ4-0,<br>ОТ4-1, ВТ4,<br>ВТ5, ВТ5-1,<br>ВТ6, ВТ6С,<br>ВТ14 | 40...70                 | 40...70    | 80...85                  | 90     | 90...95                              | 2...12 и не<br>выше 85    | 1...15 и не<br>выше 90 |
| ВТ15, ВТ22                                                      |                         | 30...50    |                          |        |                                      |                           |                        |
| ВТ3-1, ВТ8,<br>ВТ9, ВТ18,<br>ВТ16, ВТ25                         | 40...60                 |            |                          |        |                                      |                           |                        |
| ВТ1-0, ВТ20,<br>ВТ23                                            | 40...50                 |            |                          |        |                                      |                           |                        |

**11.10. Температуры фазового превращения, начала и конца рекристаллизации титановых сплавов**

| Марка сплава | Температура фазового превращения<br>$\alpha + \beta \rightarrow \beta$ , °C | Температура рекристаллизации, °C |       |
|--------------|-----------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|-------|
|              |                                                                             | Начало                           | Конец |
| BT1-0        | 885...900                                                                   | 600                              | 700   |
| BT5          | 980...1030                                                                  | 750                              | 850   |
| BT5-1        | 950...990                                                                   | 880                              | 950   |
| OT4-0        | 860...930                                                                   | 680                              | 800   |
| OT4-1        | 910...950                                                                   | 720                              | 840   |
| OT4          | 920...960                                                                   | 760                              | 860   |
| BT4          | 960...1000                                                                  | 780                              | 900   |
| BT3-1        |                                                                             | 850                              | 960   |
| BT-15        | 750...800                                                                   | 500                              | 770   |
| BT6          | 980...1010                                                                  | 850                              | 950   |
| BT6C         | 950...990                                                                   |                                  |       |
| BT8          | 980...1020                                                                  | 900                              | 980   |
| BT9          |                                                                             |                                  |       |
| BT14         | 920...960                                                                   |                                  | 930   |
| BT16         | 840...880                                                                   | 820                              | 840   |
| BT18         | 990...1030                                                                  | 900                              | 980   |
| BT20         | 980...1020                                                                  | 800                              | 950   |
| BT22         | 840...880                                                                   |                                  | 825   |
| BT23         | 880...930                                                                   | —                                | —     |
| BT25         | 990...1030                                                                  | 900                              | 990   |

11.11. Пределы прочности при растяжении  $\sigma_s$  (МПа) титановых сплавов при различных температурах

| Группа сплава           | Марка сплава | Температура, °C |             |           |          |      |
|-------------------------|--------------|-----------------|-------------|-----------|----------|------|
|                         |              | 20              | 700         | 800       | 900      | 1000 |
| Повышенной пластичности | BT1-0        | 400...550       | 70          | 35        | 18       | 16   |
|                         | OT4-1        | 600...750       | 120         | 60        | 20       | 15   |
| Средней прочности       | BT5          | 750...950       | 250         | 110       | 70       | 40   |
|                         | BT5-1        | 800...1000      | 210...230   | 90...100  |          | 25   |
|                         | OT4          | 700...900       | 100         | 75        | 25       | 15   |
|                         | BT16         | 800...1000      | 200         | 80        | 20       |      |
|                         | BT20         | 950...1100      | 400         | 250       | 125      | 60   |
| Высокопрочные           | BT6          | 950...1120      | 250         | 130       | 80       | 30   |
|                         | BT14         |                 | 280         | 120       | 60       | 20   |
|                         | BT15         | 900...1100      | 250         | 160       | 70       | 55   |
|                         | BT22         | 1100...1250     | 180         | 60        | 40       | 30   |
|                         | BT23         |                 | 250         | 150       | 50       | 50   |
| BT3-1                   | 250          |                 |             | 120       | 80       | 25   |
| BT8                     |              | 1000...1200     | 600         | 250       | 100      | 50   |
| BT9                     | 1050...1250  | 400...500       |             | 150...200 | 90...100 |      |
| BT25                    |              |                 | 1000...1200 |           |          | 650  |
| BT18                    |              |                 |             |           |          |      |

**11.4. ОБРАБОТКА ДАВЛЕНИЕМ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ**

Деформируемые алюминиевые сплавы по механическим свойствам подразделяются на сплавы пониженной, средней и высокой прочности и материалы из спеченных алюминиевых порошков. К сплавам с пониженной прочностью относят сплавы марок АВ, АМц, АМг, АД, к сплавам средней прочности – сплавы марок АК, Д, ВАД, ВД, к высокопрочным сплавам – сплавы марок В, ВАД, к материалам из спеченных порошков – сплавы марок САП. Температурные интервалы горячей штамповки алюминиевых сплавов приведены в табл. 11.12.

Соблюдение термомеханических режимов горячего деформирования алюминиевых сплавов позволяет обеспечить достаточную пластичность в процессе горячей штамповки, однородную структуру и высокие механические свойства получаемых штамповок. При нагреве алюминиевых заготовок под горячую штамповку время выдержки устанавливают в зависимости от диаметра (толщины) нагреваемой заго-

**11.12. Температурные интервалы горячей штамповки алюминиевых сплавов**

| Марка сплава                                        | Температурный интервал штамповки, °С |       | Применяемое оборудование                   |
|-----------------------------------------------------|--------------------------------------|-------|--------------------------------------------|
|                                                     | Начало                               | Конец |                                            |
| АМц, АМг2, АВ, АК6, АД31, АД35, АК4, АК1, Д20, АМг3 | 470...420                            | 350   | Молот, гидравлический и кривошипный прессы |
| Д1, АК8, ВД17, Д19, ВАД1, Д21, ВАД23                | 470...440                            | 400   | Гидравлический пресс                       |
|                                                     | 450...420                            | 380   | Молот                                      |
| АМг6, АМг5                                          | 430...400                            | 320   | Молот, гидравлический и кривошипный прессы |
| В92, В95, В96, В93                                  |                                      | 350   | Гидравлический пресс                       |
|                                                     | 400...370                            | 320   | Молот, кривошипный пресс                   |
| САП-1, САП-2, САП-3                                 | 520...480                            | 400   | Гидравлический пресс                       |
|                                                     | 600...570                            | 500   | Молот, кривошипный пресс                   |

товки. Заготовки диаметром (толщиной) до 100 мм следует выдерживать в печи при температуре горячей штамповки из расчета 1...1,2 мин на 1 мм диаметра (толщины), при диаметре (толщине) >100 мм — из расчета 0,8...1,0 мин на 1 мм диаметра (толщины). Общее максимально допустимое время нагрева алюминиевых сплавов до температуры начала горячей штамповки на должно превышать 10 ч.

Алюминиевые сплавы пониженной прочности, а также сплав средней прочности марки АК6 обладают высокой технологической пластичностью при горячей штамповке, которая практически не зависит от скорости деформирования, за исключением сплава марки АМг5. Этот сплав при горячей штамповке на высокоскоростном оборудовании имеет пониженную технологическую пластичность. Алюминиевые сплавы средней и высокой прочности отличаются пониженными пластическими характеристиками, но в интервале температур горячей штамповки обладают хорошей технологической пластичностью, однако с увеличением скорости деформирования от статической (~0,3 м/с) до динамической (~9 м/с) технологическая пластичность этих сплавов снижается на 15...20 %, что необходимо учитывать при разработке технологии горячей штамповки с использованием молотового и кривошипно-прессового оборудования.

Для спеченных алюминиевых сплавов марки САП наблюдается обратная зависимость. С повышением скорости деформирования в диапазоне > 9 м/с и до 20...30 м/с пластичность алюминиевых сплавов средней и высокой прочности увеличивается вместе со скоростью деформирования, за исключением сплавов марок САП, АМг6 и АМг7. С повышением температуры горячего деформирования пластичность алюминиевых сплавов возрастает при любых скоростях деформирования. Допустимые степени деформации алюминиевых сплавов приведены в табл. 11.13.

**11.13. Допустимые степени деформации алюминиевых сплавов, %**

| Группа сплава                          | Гидравлический<br>пресс | Молот,<br>КГШП | ВСМ                                                     | Выдавливание |
|----------------------------------------|-------------------------|----------------|---------------------------------------------------------|--------------|
|                                        | Осадка                  |                |                                                         |              |
| Пониженной<br>прочности и<br>сплав АК6 | 80...85                 | 80...85        | 85...90, для мар-<br>ки сплава АМг5<br>40...50          | ≥ 90         |
| Средней<br>прочности                   | 70                      | 50...60        | 85...90 для ма-<br>рок сплава<br>АМг6 и АМг7<br>40...50 |              |
| Высокопрочные                          |                         |                | 85...90                                                 |              |
| САП-1                                  | 50                      |                | —                                                       | ≥ 80         |
| САП-2                                  | 40                      |                |                                                         |              |
| САП-3                                  | 30                      |                |                                                         |              |

**11.14. Допустимые степени деформации алюминиевых сплавов  
в зависимости от направления деформирования  
при штамповке на молотах и КГШП**

| Группа сплава                    | Допустимая степень деформации за один ход машины, % |                                         |
|----------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------|
|                                  | вдоль оси заготовки                                 | перпендикулярно к оси заготовки         |
| Пониженной прочности и сплав АК6 | 80...85                                             | 60...65                                 |
| Средней и высокой прочности      | 50...60                                             | 40...45, для сплава АМг6 и АМг7 15...20 |

Допустимые степени деформации алюминиевых сплавов в зависимости от направления деформирования представлены в табл. 11.14.

Для предотвращения образования в штамповках крупнозернистой структуры горячую штамповку алюминиевых сплавов необходимо проводить с деформацией  $\geq 15...20$  % за один ход прессы или удар молота. Для обеспечения равномерных деформаций по всему объему сложной штамповки ее горячую штамповку следует выполнять за несколько переходов с применением заготовительных ручьев.

При штамповке алюминиевых сплавов в открытых штампах обрезку облоя и проколку перемычек толщиной до 6 мм проводят в холодном состоянии (кроме сплавов марок АМг6, АМг7, В95 и САП), а при толщине облоя  $> 6$  мм у сплавов марок АМг6, АМг7, В95 рекомендуется обрезку облоя осуществлять при температуре 250...300 °С, а у сплавов САП — при температуре 400...500 °С. Штамповку поковок из алюминиевых сплавов ведут в подогретых штампах.

Малопластичные и хрупкие алюминиевые сплавы необходимо деформировать методами прямого и обратного выдавливания, закрытой безоблойной штамповкой с применением противодавления и пластичных оболочек. При расчете силы деформирования алюминиевых сплавов в первом приближении можно использовать предел прочности  $\sigma_b$  при температуре деформирования вместо предела текучести  $\sigma_T$ . Пределы прочности  $\sigma_b$  при растяжении алюминиевых сплавов при различных температурах приведены в табл. 11.15.

**11.15. Пределы прочности  $\sigma_b$  (МПа) при растяжении алюминиевых сплавов  
в зависимости от температуры**

| Группа сплавов           | Марка сплава | Температура, °С |     |     |
|--------------------------|--------------|-----------------|-----|-----|
|                          |              | 20              | 300 | 350 |
| Сплавы средней прочности | АК4          | $\geq 360$      | 165 | 75  |
|                          | АК4-1        | $\geq 400$      | 160 | 70  |



Окончание табл. 11.15

| Группа сплавов              | Марка сплава      | Температура, °С |           |           |         |
|-----------------------------|-------------------|-----------------|-----------|-----------|---------|
|                             |                   | 20              | 300       | 350       |         |
| Сплавы средней прочности    | ВД17              | 440             | 170       | 110       |         |
|                             | АК6               | 265             | 53...60   | 42        |         |
|                             | АК8               | ≤ 240           | 80        | 60        |         |
|                             | Д1                | ≤ 250           | 90        | 63...73   |         |
|                             | Д16               |                 | 170       | 70        |         |
|                             | Д19               |                 | 180       | —         |         |
|                             | Д20               | ≤ 240           |           | 120       |         |
|                             | Д21               | 450...470       | 190       | —         |         |
|                             | АМг6              | 320             | 120       | 70...100  |         |
|                             | В92               | ≥ 400           |           | —         |         |
|                             | ВАД1              | 250             | 170       | 110       |         |
|                             | Пластичные сплавы | АВ              | ≤ 150     | 75        | 45...48 |
| АМц                         |                   | ≤ 170           | 45        | —         |         |
| АМг2                        |                   | 160...230       | 75        | 50        |         |
| АМг3                        |                   | 180             | 65        | 40        |         |
| АМг4                        |                   | 250...380       | 100...120 | 50        |         |
| АМг5                        |                   | 270...400       | 120       | 60        |         |
| АД33                        |                   | ≥ 270           | 90        | —         |         |
| АД35                        |                   | 270             |           |           |         |
| Высокопрочные сплавы        | В93               | ≥ 480           | 100       |           | —       |
|                             | В95               | ≥ 520           |           |           |         |
|                             | В96               | 720             |           |           |         |
|                             | ВАД23             | ≥ 560           |           |           |         |
| Спеченные порошковые сплавы | САП-1             | ≥ 280           | 170       | 140...150 |         |
|                             | САП-2             | ≥ 320           | 180       | 150       |         |
|                             | САП-3             | 400             | 210       | 190       |         |

При определенных термомеханических режимах горячей штамповки у алюминий-магние-вых сплавов марок СМг6, АМг61, АМг5 и др. может развиваться эффект сверхпластичности. Его использование при горячей штамповке поковок сложной формы позволяет значительно упростить технологию горячей штамповки и проводить формообразование заготовки за один переход. При горячей штамповке алюминиевых сплавов на высокоскоростных молотах нагрев заготовок перед горячим деформированием следует проводить до температур конца штамповки вместо рекомендуемой температуры начала штамповки при изготовлении поковок на молотах, прессах и горизонтально-ковочных машинах.

Нагрев заготовок под горячую штамповку на высокоскоростных молотах до нижнего значения температуры интервала штамповки связан с повышением температуры заготовки в процессе высокоскоростной штамповки. Алюминиевые сплавы чувствительны к повышению температур и склонны к перегреву. Пренебрежение этим фактором приводит к перегреву штамповок и, следовательно, к окончательному браку по микроструктуре и механическим свойствам. Это необходимо учитывать при назначении температуры штамповки в технологическом процессе высокоскоростной штамповки алюминиевых сплавов.

### 11.5. ОБРАБОТКА ДАВЛЕНИЕМ МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Магний и его сплавы относятся к числу перспективных металлических материалов, поскольку ресурсы магния в земной коре практически не ограничены. Фактором, сдерживающим его широкое применение, является высокая энергоемкость производства первичного магния.

Несовершенство процесса получения первичного магния таково, что на его получение тратится энергии в  $\sim 100$  раз больше, чем этого требуется, если исходить из теплоты образования наиболее распространенных его соединений.

К числу достоинств магниевых сплавов следует отнести: малую плотность ( $1740 \text{ кг/м}^3$ ), высокое сопротивление ударным нагрузкам, повышенное демпфирование (магниевые сплавы не звучат), высокие удельные механические свойства, отличное сопротивление коррозии в ряде органических (бензине, масле) и неорганических (щелочах) сред, хорошую обрабатываемость резанием, свариваемость сплавов на основе магния, прекрасные литейные свойства.

К недостаткам магниевых сплавов можно отнести недостаточную жесткость конструкций из-за низкого модуля упругости ( $0,457 \cdot 10^5 \text{ МПа}$ ), высокий коэффициент теплового расширения ( $28 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ ) и относительно низкую рабочую температуру (до  $\sim 300 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

Особенностью горячей обработки давлением и термообработки магниевых сплавов является регламентированная скорость нагрева. Регламентированный нагрев магниевых сплавов имеет большое значение не только для формирования необходимых свойств сплава, но и для технологических переделов. Для нагрева сплавов из магния под горячую обработку давлением не рекомендуется применять быстрый нагрев (индукционный, электроконтактный) во избежание локального оплавления, лучше использовать выдержки при промежуточных температурах, лежащих вблизи  $330...370 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Магний имеет гексагональную решетку, и при температуре до  $225 \text{ }^\circ\text{C}$  деформация магния и его сплавов возможна только в одной кристаллографической плоско-

сти. Это обстоятельство ограничивает технологическую пластичность магниевых сплавов. При температуре  $>225^{\circ}\text{C}$  скольжение идет по двум кристаллографическим плоскостям, а в третьей плоскости развивается двойникование. С ростом температуры увеличивается число возможных вариантов скольжения и повышается технологическая пластичность магниевых сплавов.

Для получения однородной структуры и одинаковых механических свойств магниевые сплавы необходимо подвергать высокой суммарной степени деформации ( $\sim 90\%$ ). Механические свойства магниевых сплавов при различных температурах приведены в табл. 11.16.

### 11.16. Механические свойства магниевых сплавов в зависимости от температуры

| Марка сплава | Температура, $^{\circ}\text{C}$ | Механические свойства     |                      |              |
|--------------|---------------------------------|---------------------------|----------------------|--------------|
|              |                                 | $\sigma_{\text{в}}$ , МПа | $\sigma_{0,2}$ , МПа | $\delta$ , % |
| МА1          | 100                             | 160                       | 90                   | 25           |
|              | 150                             | 140                       | 80                   | 30           |
|              | 200                             | 110                       | 60                   | 35           |
|              | 250                             | 70                        | 40                   | 85           |
|              | 300                             | 40                        | 25                   | 140          |
| МА2          | 100                             | 210                       | 150                  | 30           |
|              | 150                             | 155                       | 90                   | 45           |
|              | 200                             | 105                       | 60                   | 55           |
|              | 250                             | 80                        | 35                   | 75           |
|              | 300                             | 45                        | 25                   | 125          |
| МА3          | 100                             | 265                       | 160                  | 21           |
|              | 150                             | 190                       | 105                  | 28           |
|              | 200                             | 150                       | 80                   |              |
|              | 250                             | 115                       | 45                   | 22,5         |
| МА4          | 100                             | 280                       | 200                  | 21           |
|              | 150                             | 200                       | 140                  | 40           |
|              | 200                             | 140                       | 90                   | 50           |

Окончание табл. 11.16

| Марка сплава | Температура, °C | Механические свойства |                        |      |
|--------------|-----------------|-----------------------|------------------------|------|
|              |                 | σ <sub>B</sub> , МПа  | σ <sub>0,2</sub> , МПа | δ, % |
| МА4          | 250             | 95                    | 55                     | 80   |
|              | 300             | 70                    | 50                     | 120  |
| МА5          | 100             | 220                   | 130                    | 22   |
|              | 150             | 170                   | 100                    | 30   |
|              | 200             | 125                   | 70                     | 38   |
|              | 250             | 85                    | 55                     | 45   |
|              | 300             | 70                    | 35                     | 85   |
|              |                 |                       |                        |      |
| МА8          | 100             | 225                   | —                      | 13   |
|              | 125             | 205                   |                        | 17,5 |
|              | 150             | 175                   |                        | 20,5 |
| МА11         | 200             | 210                   | 110                    | 13   |
|              | 250             | 180                   | 90                     | 15   |
| МА12         | 200             |                       | 160                    | 10   |
|              | 250             | 150                   | 95                     | 12   |
| МА15         | 200             | 120                   | 50                     | 35   |
| МА18         | 20              | 180                   | 140                    | 30   |
| МА19         |                 | 390                   | 340                    | 8    |
|              | 200             | 2230                  | 150                    | 35   |
|              | 250             | 130                   | 90                     | 50   |
| МА20         | 20              | 230                   | 120                    | 25   |
|              | 200             | 90                    | 70                     | 51   |
|              | 250             | 70                    | 50                     | 65   |
| МА21         | 20              | 260                   | 210                    | 19   |

Температурные интервалы горячей штамповки магниевых сплавов представлены в табл. 11.17.

**11.17. Температурный интервал горячей штамповки магниевых сплавов**

| Марка сплава | Температурный интервал штамповки, °С |           | Применяемое оборудование, технологические рекомендации |
|--------------|--------------------------------------|-----------|--------------------------------------------------------|
|              | Начало                               | Конец     |                                                        |
| МА1          | 450                                  | 260       | Молот, КГШП                                            |
| МА2          | 420                                  | 230       |                                                        |
| МА3          | 400                                  |           |                                                        |
| МА4          | 350                                  |           |                                                        |
| МА5          | 385                                  | 280       |                                                        |
| МА8          | 450                                  | 350       | Молот                                                  |
|              |                                      | 300       | КГШП                                                   |
| МА11         | 480                                  | 380       | Ковка, штамповка на гидравлическом прессе              |
| МА12         |                                      | 350       |                                                        |
| МА15         | 380                                  |           | Молот                                                  |
|              | 360                                  | 250       | КГШП                                                   |
| МА18         | 250                                  | 200       | Пресс                                                  |
|              | 280...200                            | 250...150 | При горячей прокатке (обжатие за проход 10...15 %)     |
|              | 250...200                            | 200...150 | При ковке, штамповке (степень деформации 80...90 %)    |
| МА19         | 360                                  | 320       | Пресс                                                  |
|              | 400                                  | 340       | КГШП                                                   |
|              | 380                                  | 320       | Молот                                                  |
| МА20         | 390                                  | 340       | Пресс                                                  |
|              |                                      | 350       | При прокатке                                           |
|              | 250                                  | 150       | При листовой штамповке                                 |
| МА21         | 290                                  | 260       | Пресс                                                  |
|              | 300...260                            | 250...220 | При горячей прокатке (обжатие за проход 10...30 %)     |
|              | 290...260                            | 250...150 | При тепловой прокатке (обжатие за проход ~ 20 %)       |
|              | 300...250                            | 280...200 | При ковке, штамповке (обжатие за проход 40...60 %)     |

## Глава 12

# КОНТРОЛЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА И КАЧЕСТВА ПОКОВОК И ШТАМПОВОК

---

---

*Качество* — это философское понятие, отражающее важные стороны предметов и процессов. С точки зрения философии качество — это существенная определенность предмета, в силу которой он является данным, а не другим. С позиции маркетинга качество — это способность товара удовлетворять реальные запросы потребителей. Международными стандартами серии ИСО 9000 качество определено как совокупность свойств и характеристик продукции.

Для обеспечения контроля качества выпускаемой продукции на предприятиях авиационной промышленности существует ряд служб, отвечающих за этот вид деятельности. Возглавляет эти службы, как правило, директор по качеству, ему подчиняются начальник управления технологического контроля и начальник службы внутреннего аудита. На каждом предприятии авиационного производства имеется документально оформленная политика качества, которая определяет стратегические цели предприятия в области обеспечения качества.

Для решения этих стратегических задач на каждом предприятии существует система качества, документально изложенная в Руководстве по качеству. Система качества включает в себя все этапы изготовления и послепродажного обслуживания продукции. Ее действие распространяется на все этапы: от начального определения до конечного удовлетворения требований и запросов. Перечислим этапы и виды деятельности этой системы:

- маркетинг, поиск, изучение рынка;
- проектирование и разработка технических требований к продукции;
- материально-техническое снабжение;
- подготовка и разработка технологических процессов;
- производство продукции;
- контроль, проведение испытаний и исследований;
- упаковка и хранение;
- реализация и распределение продукции;
- монтаж и эксплуатация;
- техническая помощь и обслуживание;
- утилизация после использования.

В данной главе мы будем рассматривать не все перечисленные виды деятельности предприятия в области обеспечения качества выпускаемой продукции (для этого есть специальная литература), а остановимся лишь на производстве продукции, а именно: на обеспечении качества штамповок и поковок.

### 12.1. ПОНЯТИЕ "СПЕЦИАЛЬНЫЙ ПРОЦЕСС"

Согласно международным стандартам серии ИСО 9000–9400, к специальным процессам относят процессы, результаты которых нельзя в полной мере проверить в ходе последующего контроля, испытаний продукции или когда, например, дефекты

могут быть выявлены только во время использования продукции. В этих случаях соответствие продукции установленным требованиям достигается непрерывным управлением процессами или обеспечением их соответствия документированным процедурам. В этих стандартах и определениях процессы горячей пластической деформации относят к специальным процессам, а следовательно, они должны удовлетворять предъявляемым к ним требованиям, перечисляемым ниже:

- аттестация технологического процессаковки, штамповки как специального;
- указание в технологическом процессе особо ответственных операций с особо ответственными параметрами и диапазоном их изменения;
- требования к аттестации технологического оборудования;
- то же, производственного персонала;
- то же, контрольно-измерительной аппаратуры;
- требования о наличии паспорта специального технологического процесса;
- требования к аттестации оснастки.

В соответствии с данными требованиями изготовление поковок и штамповок должно осуществляться по аттестованной технологии на аттестованном оборудовании с применением аттестованной штамповой оснастки, аттестованным кузнечо-штамповщиком. Аттестация специального процесса проводится специально созданной комиссией.

К особо ответственным операциям в процессах горячей пластической деформации относят: операцию нагрева под ковку, штамповку; операцию калибровки; процесс охлаждения штамповки или поковки.

Особо ответственными параметрами процессов горячего пластического деформирования считают: температуру нагрева заготовки перед ковкой, штамповкой; время выдержки заготовки в печи; температуры начала и конца штамповки; степень деформации на переходах; скорость деформирования; температуру нагрева штампов; скорость охлаждения заготовки после горячего деформирования и температуру регламентированного охлаждения.

Особо ответственные параметры специальных процессов должны удовлетворять следующим требованиям: они должны быть измеряемыми, регулируемыми либо обеспечиваться применяемым технологическим оборудованием. Все ранее перечисленные особо ответственные параметры технологических процессовковки, штамповки отвечают данным требованиям.

## **12.2. ТРЕБОВАНИЯ К ПЕРСОНАЛУ И ОБОРУДОВАНИЮ, АТТЕСТАЦИЯ ПЕРСОНАЛА И ОБОРУДОВАНИЯ**

Система международных стандартов серии ИСО 9000 предъявляет ряд определенных требований к производственному персоналу и оборудованию, используемому в специальных процессах.

Все производственные рабочие должны знать: технологическую документацию, имеющуюся на рабочем месте; применяемое кузнечно-штамповочное и печное оборудование; особо ответственные операции и параметры при выполнении данного процесса; область горячей пластической деформации; требования техники безопасности, свои права и обязанности, соответствующие технологические инструкции; иметь квалификацию не ниже той, что указана в технологическом процессе. Также

кузнец-штамповщик должен обладать навыками в настройке кузнечно-штамповочного оборудования и выполнения кузнечно-штамповочных операций.

Кузнец-штамповщик должен быть аттестован на право выполнения специальных процессов и особо ответственных операций.

Аттестация проводится аттестационной комиссией под представительством начальника кузнечно-штамповочного цеха. В состав комиссии обязательно входят: начальник технологического отдела кузнечно-штамповочного цеха, ведущий инженер-технолог, начальник бюро технического контроля, представитель цеховой службы труда и заработной платы и представитель вышестоящей технологической службы (для кузнечно-штамповочных цехов — это представитель управления главного металлурга).

Результаты аттестации оформляются протоколом аттестации, который хранится в кузнечно-штамповочном цехе, а в аттестационной книжке делается отметка о допуске к выполнению специальных процессов и особо ответственных операций, указываются срок следующей аттестации и номер действующего протокола.

Оборудование кузнечно-штамповочного цеха, используемое в специальных процессах, должно быть аттестовано на соответствие заявленным параметрам и технологическую точность. В каждом кузнечно-штамповочном цехе имеется паспорт оборудования, в который заносятся фактические данные результатов аттестации оборудования. На каждую единицу кузнечно-штамповочного оборудования разрабатываются схемы проверки на технологическую точность и соответствие заявленным параметрам.

Проверку кузнечно-штамповочного оборудования осуществляет комиссия во главе с заместителем начальника цеха по технологической части. В состав комиссии входят: механик цеха, аттестованные слесари-ремонтники кузнечно-штамповочного оборудования, начальник технологического отдела и представитель службы главного механика предприятия. Результаты аттестации оборудования (фактические значения проверяемых параметров) фиксируются в паспорте оборудования, а также на ярлыке, который крепится на оборудование и содержит отметку о годности и сроке его следующей аттестации.

Используемые при этом контрольно-измерительная оснастка и инструмент должны быть аттестованы, иметь паспорт с отметкой о годности и дате следующей аттестации.

На каждую печь, используемую в кузнечно-штамповочном производстве, существует паспорт со схемой и особенностями измерения температуры при аттестации печи. Аттестацию печей проводят специалисты службы главного метролога совместно с пирометристами цеха. При аттестации печи оформляется протокол ее проверки с фактическими значениями температуры по контролируемым зонам ее нагрева. Протокол аттестации печи утверждается главным металлургом предприятия и хранится в службе главного метролога, например в пирометрической лаборатории. Специалистами пирометрической лаборатории систематически выполняется также проверка термпар и контрольных приборов с соответствующей отметкой о годности на бирке и датой очередной аттестации.

Штамповая оснастка проходит аттестацию в контрольно-поверочном пункте цеха с отметкой о годности в паспорте на оснастку.



### 12.3. ВХОДНОЙ КОНТРОЛЬ ИСХОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В соответствии с требованиями международных стандартов серии ИСО 9000 и системы качества предприятия все поступающие на авиационное предприятие материалы и заготовки должны проходить входной контроль. Объем входного контроля поступающих на завод заготовок и материалов определяет главный металлург предприятия исходя из технических условий (ТУ) на поставку. Все материалы и заготовки на предприятие должны поступать с сертификатами заводов-поставщиков. При поступлении материалов на склад предприятия служба входного контроля осуществляет его приемку сообразно с условиями на поставку, а также проверяет маркировку материалов и заготовок на соответствие сертификатам (например, выполняет внешний осмотр, проверку соответствия марки материала, номера плавки, номера партии, объема поставки и т.д.). Затем проводится проверка сертификата на соответствие ТУ на поставку (например, проверяются отметки о прохождении у поставщика специальных видов контроля, наличие отметки о прохождении термообработки и т.д.). После этого по картам входного контроля служба входного контроля подготавливает образцы поступившего материала и направляет их в центральную заводскую лабораторию на предмет входного металлургического контроля. При этом объем исследований и испытаний, проводимых при входном металлургическом контроле, определяется техническими и иными требованиями, которым должна отвечать деталь, изготавливаемая из исследуемого материала.

В центральной заводской лаборатории выполняют проверку химического состава материала, например с помощью спектрального анализа на приборах типа "Spektrolab" фирмы "Spectro" (Германия), а также с привлечением методов аналитической химии либо с использованием стилоскопа. В объем механических испытаний материала обычно входят: определение пределов прочности, текучести, относительного удлинения, относительного сужения, ударной вязкости; высокотемпературные кратковременные испытания; испытания на длительную прочность и усталость.

В соответствии с требованиями ТУ на поставку выполняется анализ макро- и микроструктуры материала, проводится проверка на отсутствие металлургических дефектов (наличие или отсутствие неметаллических включений и текстуры; наличие и направление волокна). После металлургических исследований и определения механических свойств материала выдается заключение о возможности его использования в производстве, которое направляется в службу входного контроля, где, исходя из данного заключения, служба входного контроля разрешает запуск исходного материала или полученных от поставщика заготовок в производство либо в противном случае подготавливает рекламацию заводу-поставщику.

В свою очередь, в соответствии с требованиями международных стандартов серии ИСО 9000 и требованиями системы качества предприятия, разработанной на их основе, оборудование и персонал центральной заводской лаборатории должны быть аттестованы на проведение механических испытаний и металлургических исследований.

### 12.4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ВЫПОЛНЕНИЯ ПРОЦЕССА КОВКИ И ШТАМПОВКИ

Технологический контроль качества выполнения технологического процессаковки и штамповки выполняется на соответствие выполняемых отдельных опера-

ций технологической документации. Согласно требованиям международных стандартов по качеству серии ИСО 9000 и системы качества, разработанной на их основе, технологический контроль должен осуществляться в определенных точках производственного процесса. Области проверки и частота проведения проверок зависят от значений характеристик и удобства выполнения проверки на данной стадии производства.

Проверка должна проводиться в тех точках, где возникает контролируемая характеристика производимой продукции. Для кузнечно-штамповочного производства частота и определенные точки проверки в ходе выполнения технологического процесса назначаются, например, ведущим технологом, являющимся разработчиком технологического процесса, и отражаются в картах контроля технологического процесса.

Это, как правило, следующие точки.

1. Входной контроль заготовок, поступающих в кузнечно-штамповочный цех из заготовительных подразделений. При этом проверяются правильность оформления сопроводительной документации; соответствие качества поступивших заготовок указанному в сопроводительной документации. Выполняются выборочный или 100 %-ный контроль марки материала заготовок, например на стилоскопе; контроль внешнего вида и 100 %-ный контроль (или 10 % от партии) геометрических размеров заготовок.

2. Следующей точкой технологического контроля являются настройка оборудования и предъявление первой годной отштампованной или откованной заготовки. На этой стадии проверяются термограмма ее нагрева, геометрические параметры и внешний вид заготовки на соответствие требованиям, отраженным в карте контроля первой годной заготовки. Параметры первой годной заготовки фиксируются в специальном журнале с указанием числа, номера детали, номера плавки, числа деталей в партии, номера партии, фамилии кузнеца-штамповщика и фамилии контролера, разрешившего запуск штампуемых заготовок в производство.

3. При многопереходном технологическом процессе дополнительной точкой контроля является контроль после выполнения конкретной операции (например, высадки). Данный контроль осуществляют контролеры на площадях, специально отведенных для контроля. На операционный контроль заготовки подаются партиями с сопроводительными документами.

При операционном контроле проверяются термограмма нагрева заготовок под штамповку, правильность оформления сопроводительной документации, визуальный контроль качества заготовок, а также выборочный контроль (например, 10 % от партии) геометрических размеров.

При выполнении штамповочной операции кузнец обязан в соответствии с технологическим процессом периодически предъявлять на контроль, например, каждую сотую или двухсотую заготовку для внешнего осмотра и контроля геометрических размеров. Это делается с целью оперативного контроля и принятия корректирующих действий при обнаружении отклонений.

Оперативный контроль в процессе изготовления штамповок (поковок) также осуществляется ведущим технологом кузнечно-штамповочного цеха. Цель такого контроля — выявление отклонений в технологическом процессе от технологической документации. При оперативном контроле на рабочем месте проверяется соблюдение технологии и обеспечения особо ответственных параметров процесса

(температуры начала и конца штамповки, время выдержки в печи, степень деформации и т.д.). В случае обнаружения отклонений в выполнении технологического процесса принимаются оперативные корректирующие действия.

Предъявление первой годной отштампованной заготовки и операционный контроль при многопереходных технологических процессах обработки давлением выполняют после каждой настройки на новый штамповочный переход и послеоперационный контроль после каждого перехода штамповки. В процессе штамповки на каждом переходе также осуществляется периодический контроль.

После проведения всех технологических операций (включая обдувку, травление и т.д.) штамповки (поковки) поступают на окончательный контроль вместе с сопроводительной документацией.

Качество поковок (штамповок) определяется правильностью их геометрических форм и размеров, механическими свойствами, макро- и микроструктурой, отсутствием поверхностных и внутренних дефектов. Получение высококачественных поковок (штамповок) зависит от качества разработки, проектирования и выполнения технологического процессаковки (штамповки), а также от организации работы технического контроля, в задачу которого входит не только выявление, но и предупреждение брака.

### **12.5. КОНТРОЛЬ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ И РАЗМЕРОВ ПОКОВОК И ШТАМПОВОК**

Контроль геометрической формы и размеров поковок (штамповок) осуществляется контрольной службой кузнечно-штамповочного цеха. Качество геометрических форм и размеров поковок (штамповок) контролируется на всех стадиях технологического процессаковки и штамповки и является одним из критериев качества выполнения технологического процесса. Геометрическая форма и размеры поковок (штамповок) должны соответствовать параметрам, указанным в карте операционного контроля.

Контроль формы и геометрических размеров штамповок (поковок) осуществляется выборочно при операционном оперативном контроле на рабочем месте, периодически, например через 100, 200 штамповок (поковок), в процессе выполнения технологической операции и 100 %-ный или выборочный (~10 %) при межоперационном контроле, а также 100 %-ный или выборочный (~10 %) при окончательном контроле. По изменению геометрической формы и размеров штамповки (поковки) можно судить о качестве и работоспособности штамповой оснастки, настройке оборудования и других сбоях технологического процесса. По этим результатам можно принимать решение как о необходимости корректировки технологического процесса, так и о выполнении конкретных корректирующих действий.

### **12.6. ИНСТРУМЕНТЫ И ПРИБОРЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ И РАЗМЕРОВ ПОКОВОК И ШТАМПОВОК**

Размеры и геометрическую форму поковок (штамповок) в процессековки (штамповки) по переходам и окончательно готовых поковок (деталей, полученных

штамповкой) контролируют с помощью универсальных и специальных контрольно-измерительных инструментов и приборов.

К универсальным измерительным инструментам относят линейки, рулетки, кронциркули, нутромеры, штангенциркули, штангенрейсмасы, координатно-измерительные машины и т.д. Специальными измерительными инструментами считают базирующие устройства, шаблоны, скобы, приборы типа ПОМКЛ (приборы оптико-механические контроля лопаток) и т.д. Для контроля геометрической формы и размеров поковок (штамповок) применяют следующие шаблоны: прутковые — для измерения общей длины штамповки или поковки; профильные — для контроля геометрической формы поковки (штамповки) в продольном и поперечном направлениях; контурные — для проверки габаритных размеров и внешнего контура поковок (штамповок) сложной формы.

Кроме того, геометрические размеры поковок в процессековки измеряют предельными и регулируемыми скобами, закрепленными на специальных державках, стойках и т.п.

На рис. 12.1–12.4 приведены некоторые схемы применения универсального и специального мерительного инструмента при контроле поковок (штамповок). На рис. 12.1 дана схема измерения высоты поковки 3 универсальным штангенрейсмасом 2 на контрольной плите 1. На рис. 12.2 показана схема измерения глубины полости 1 штамповки 2 универсальным глубиномером 3. В отдельных случаях отклонение геометрической формы поковки (штамповки) от заданной оценивают инструментальным щупом по наличию или отсутствию зазоров  $\Delta$  между шаблоном и контуром поковки. На рис. 12.3 представлена схема оценки геометрической формы поковки 1 профильным шаблоном 2 по величине зазора  $\Delta$ .

Для авиационных моторостроительных предприятий определенный интерес вызывают вопросы контроля точности изготовления различных лопаток авиационного двигателя.

Например, точность изготовления лопаток компрессора может быть установлена с помощью специ-

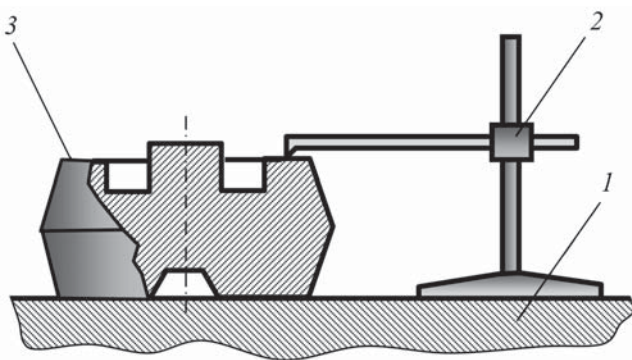


**Рис. 12.1.** Схема измерения высоты поковки с помощью универсального штангенрейсмаса:  
1 — контрольная плита; 2 — штангенрейсмас; 3 — поковка

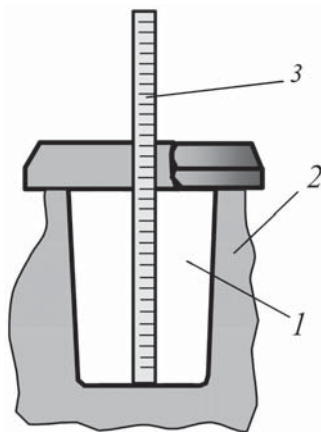


**Рис. 12.2.** Схема измерения глубины полости 1 штамповки 2 с помощью универсального глубиномера 3

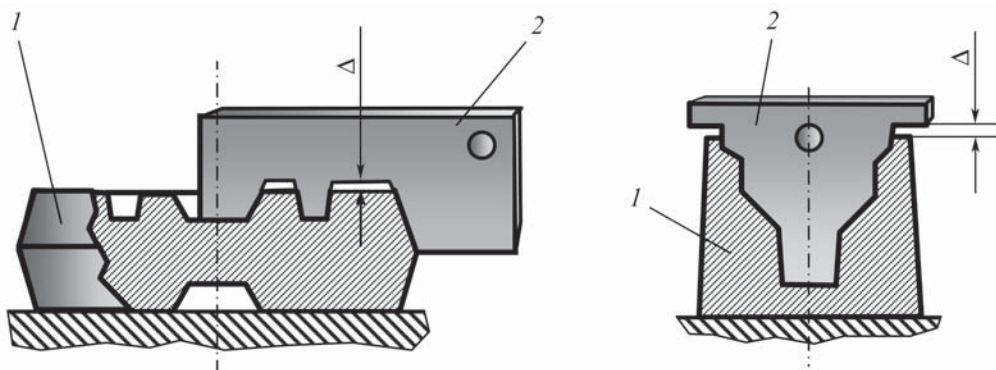


**Рис. 12.3. Схемы применения профильных шаблонов для оценки геометрической формы поковки по величине зазора  $\Delta$ :**  
 1 — поковка; 2 — шаблон

альных жестких измерительных приспособлений, оптико-механических приборов типа ПОМКЛ, контрольно-измерительных машин (КИМ) контактного и бесконтактного типов. Требования к точности изготовления штамповки лопатки определяют как целесообразность применения того или иного метода контроля, так и рациональность привлечения конкретных средств измерения. Например, точность изготовления заготовок-штамповок лопаток часто контролируют посредством жестких шаблонов. При этом контроль геометрии профиля пера штамповки лопатки осуществляют в контрольных сечениях пера заготовки лопатки, заданных в конструкторском чертеже лопатки или штамповки лопатки. На рис. 12.4 приведена типовая схема расположения контрольных сечений на штамповке лопатки.

Исходными данными для проектирования жестких контрольных приспособлений являются координаты расположения базовых точек на профиле пера и размещение базовых сечений. Жесткие измерительные приспособления включают в себя базирующее устройство 1 (рис. 12.5) и контрольные шаблоны 2. Процесс контроля осуществляют следующим образом: лопатку 3 устанавливают и фиксируют в базирующее устройство 1 на базы, указанные в чертеже штамповки. Затем на базы устройства помещают шаблоны, повторя-

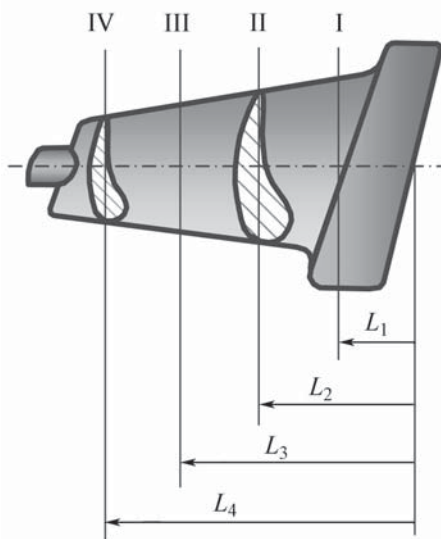


**Рис. 12.4. Схема расположения контрольных сечений I, II, III, IV на штамповке лопатки:**  
 $L_1 - L_4$  — расстояния от подошвы замка до контрольных сечений

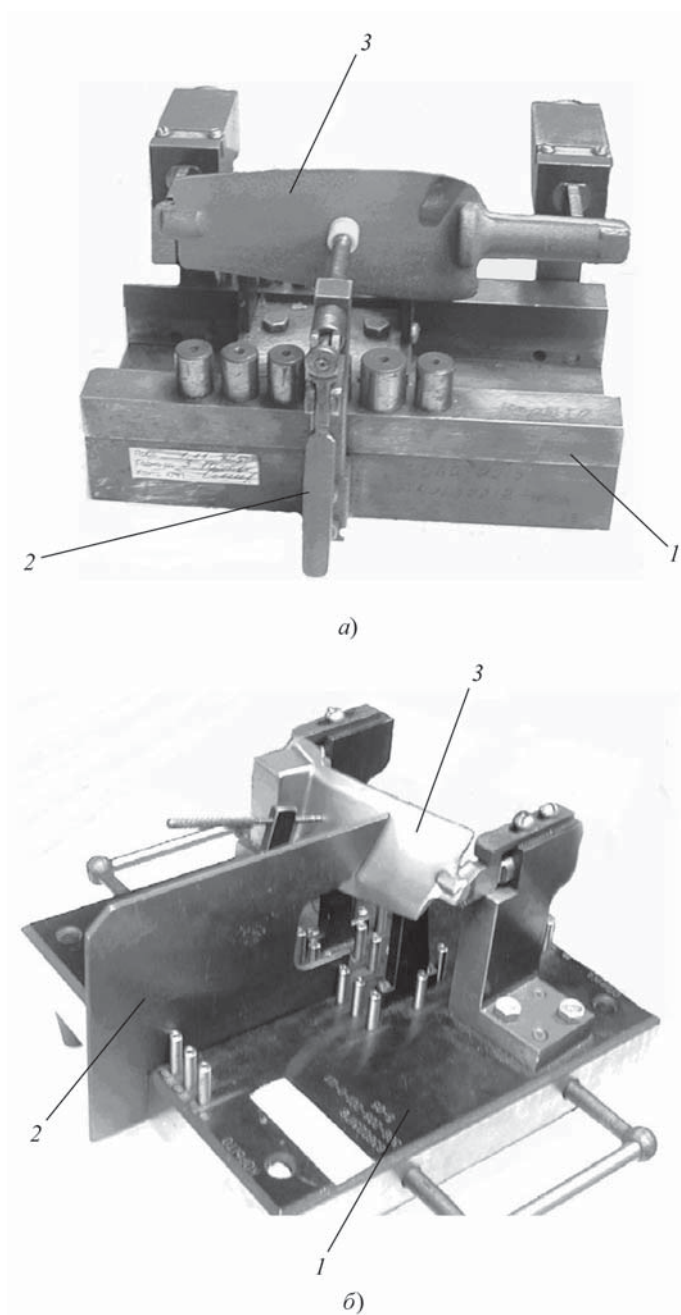


**Рис. 12.5. Приспособление для контроля профиля и взаимного положения сечений пера на штамповке компрессорной лопатки газотурбинного двигателя жесткими шаблонами:**  
*а* – базирование лопатки; *б* – контроль профиля пера жестким шаблоном; *1* – базировующее устройство; *2* – шаблон; *3* – штамповка лопатки



ющие профиль спинки или корыта пера штамповки лопатки в соответствующих ее сечениях. При этом по наличию и величине зазора по профилю или под полкой шаблона с помощью щупа оценивают максимальную величину и направление отклонения профиля штамповки в контролируемом сечении от номинала и сравнивают ее с допустимым значением, заданным в чертеже штамповки или карте контроля на штамповку заготовки лопатки.

ПОМКЛ — это оптико-механический прибор для контроля профиля пера лопаток газотурбинных двигателей с одновременной проверкой смещения профиля относительно оси замка лопатки, угла закрутки сечений пера, распределения припуска по профилю пера и положения одной из кромок пера относительно измерительных баз.

На серийных авиадвигателестроительных предприятиях основным оптико-механическим прибором является ПОМКЛ-4 (рис. 12.6).

#### Основные технические характеристики ПОМКЛ-4

Размеры контролируемых лопаток и штамповок лопаток, мм:

длина ..... До 250

ширина ..... До 100

Увеличение прибора ..... 50

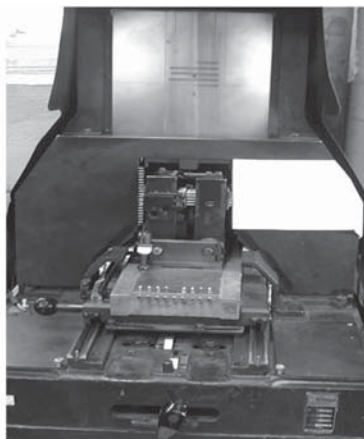
Погрешность измерения, мм,

не более ..... 0,02

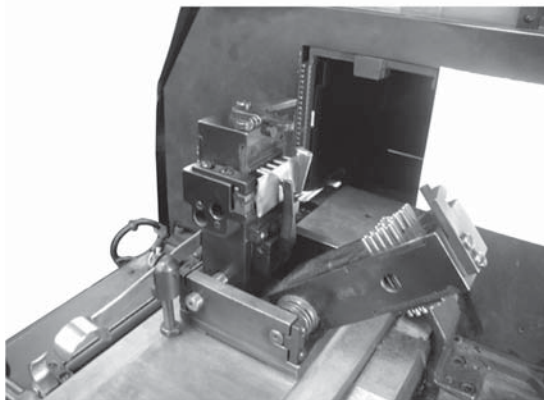
Габаритные размеры, мм ... 900×480×620

Масса, кг ..... 115

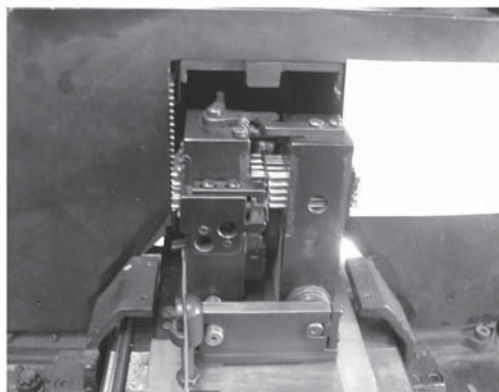
Напряжение питания, В .... 220



а)



б)



в)

**Рис. 12.6. Прибор ПОМКЛ-4:**

а — внешний вид прибора; б — измерительный блок прибора в разомкнутом состоянии с установленной лопаткой; в — то же, в сомкнутом рабочем состоянии с установленной лопаткой

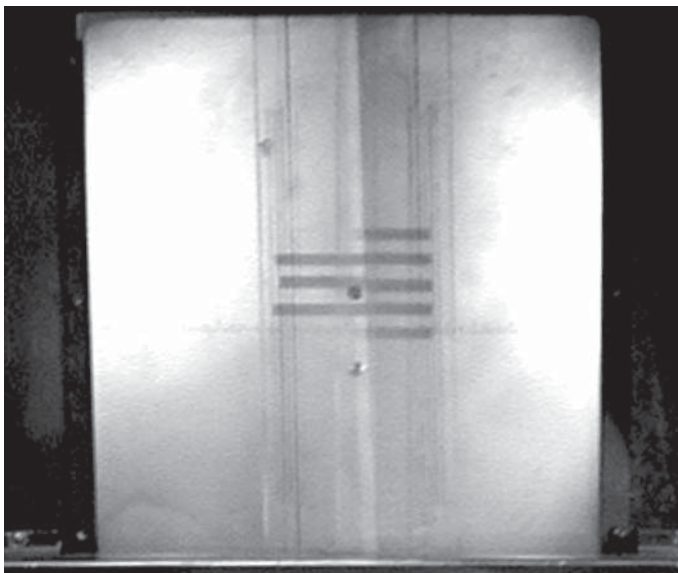


**Рис. 12.7. На экране показано смещение отдельных точек профиля пера заготовки лопатки относительно базового сечения**

Принцип его работы заключается в следующем. Лопатка устанавливается на базовые поверхности. Отклонение размеров формы профилей сечений пера от номинального вызывает смещение контактных стержней. Далее это смещение передается на измерительные стержни, затем на рычаги с соотношением плеч 5:1. Концы рычагов проектируются на экран с увеличением 10:1. Таким образом, достигается увеличение 50:1.

В зависимости от характера погрешности профиля в контролируемом сечении на экране будут видны или отдельные отклонения стержней от базовых прямых (при местных погрешностях профиля; рис. 12.7), или параллельное смещение концов стержней (при смещении профиля относительно баз; рис. 12.8), или что концы стержней размещаются на одной прямой, расположенной под углом к базовым прямым (при погрешности угла закрутки; рис. 12.9).

Таким образом, на приборе по отклонениям концов измерительных стержней можно оценить точность изготовления профиля, смещение сечений профиля относительно баз и отклонение по углу закрутки. Следует отметить, что применяемые в настоящее время оптико-механические приборы типа ПОМКЛ не позволяют контролировать лопатки компрессора, изготовленные по первому классу точности, вследствие значительной для данного случая погрешности измерения.

Перспективным направлением развития измерительной техники для контроля трастовых поверхностей лопаток является создание бесконтактных систем. Они позволяют обеспечить высокую точность измерения и сравнительно высокую производительность. К ним относятся лазерные компьютерные системы ОПТЭЛ, разработанные научно-внедренческим предприятием "ОПТЭЛ" Уфимского государственного авиационного технологического университета (УГАТУ).



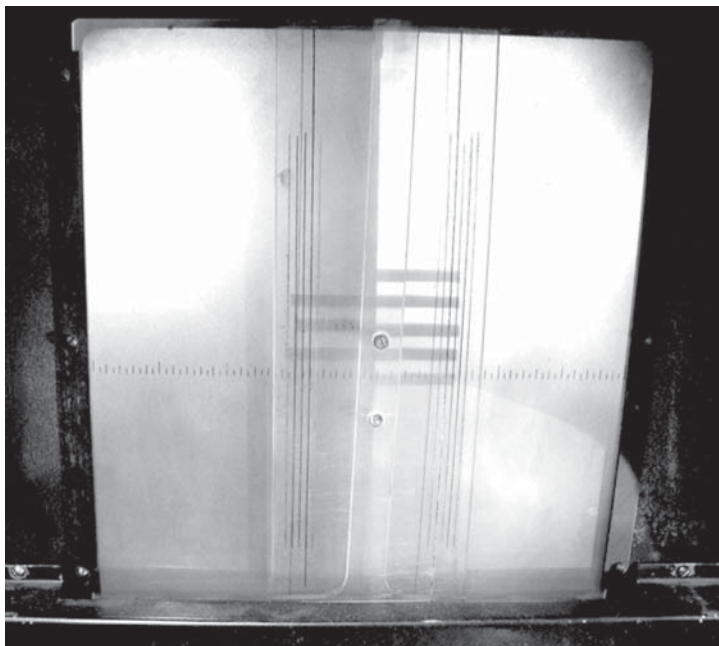


**Рис. 12.8.** На экране прибора показано смещение профиля сечения пера заготовки лопатки относительно баз

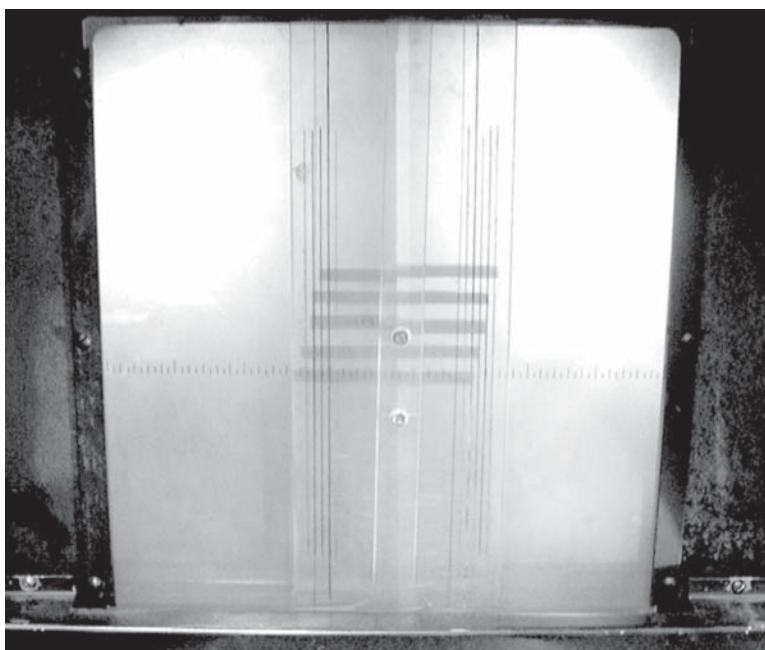


**Рис. 12.9.** На экране показан разворот контролируемого сечения относительно баз

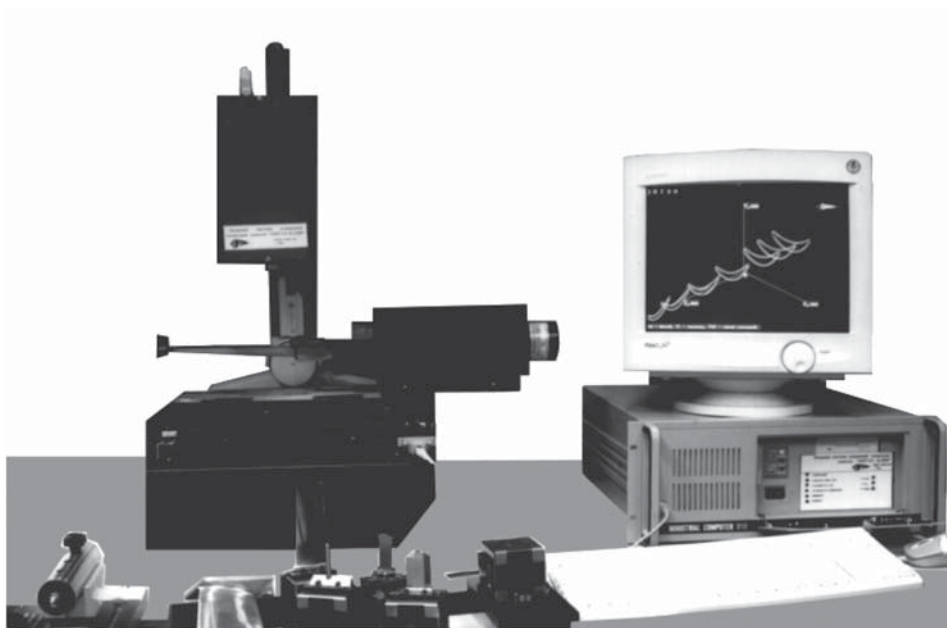


**Рис. 12.10.** Измерительная лазерная компьютерная система ОПТЭЛ-КЛ

Принцип работы лазерных бесконтактных систем следующий. Сфокусированный лазерный луч направляется на контролируемую поверхность. Часть отраженного света собирается высокочастотной оптической системой и фокусируется на аналоговом чувствительном детекторе, улавливающем изменение положения. Движения измеряемой поверхности относительно оси измерения вызывают перемещение фокусного пятна по чувствительной части детектора. В детекторе наводятся небольшие фототоки, которые после соответствующей обработки дают информацию о позиционном смещении поверхности относительно оси измерения. Общий вид измерительной лазерной компьютерной системы ОПТЭЛ-КЛ приведен на рис. 12.10. Бесконтактные измерительные системы ОПТЭЛ предназначены для измерения изделий сложной формы из различных материалов, в том числе из хрупких и мягких.

Оптические методы контроля профиля пера лопаток применяются и за рубежом. Одной из ведущих фирм, занимающейся разработкой бесконтактных измерительных приборов, является фирма Teilor Gobson (Великобритания). В качестве источника излучения в этих приборах используется лазер, а приемником служит телевизионное устройство.

Кроме бесконтактных измерительных систем типа ОПТЭЛ за рубежом, а в последнее время и у нас в стране большое распространение получили контактные КИМ (рис. 12.11). Наиболее совершенные КИМ выпускают фирмы Opton (ФРГ) и Sperioli (Италия). Они оснащены специальными программами для измерения криволинейных поверхностей, причем наличие ЭВМ и математического обеспечения позволяет измерять все параметры профиля пера лопаток от заданных баз с высокой



Рис. 12.11. Контактная контрольно-измерительная машина (КИМ)

точностью. КИМ могут работать как в ручном, так и в автоматическом режиме. Процессом измерения в автоматическом режиме управляет ЭВМ по специальным программам. Программы содержат всю информацию об измеряемой детали, пути перемещения измерительной заготовки, координаты измеряемых точек, номинальные размеры детали в точках измерения и допуски на контролируемые размеры.

## 12.7. ОКОНЧАТЕЛЬНЫЙ КОНТРОЛЬ

На окончательный контроль штамповки, поковки поступают партиями с сопроводительной документацией, а крупногабаритные штамповки группы контроля I — поштучно с сопроводительным документом на каждую штамповку.

На окончательном контроле все заготовки проходят 100 %-ный визуальный контроль на наличие дефектов и 100 %-ный контроль геометрической формы и размеров в соответствии с картами окончательного контроля. Особо ответственные детали подвергаются контролю на соответствие марки материала. Далее по картам контроля отбираются несколько штамповок и направляются в службу главного металлурга на металлургическое заключение и определение механических свойств. От индивидуальных штамповок направляется часть, например, концевой припуска с индивидуальным номером, номерами плавки и партии.

Параллельно с металлургическим контролем и определением механических свойств оставшаяся часть штамповок, в соответствии с требованиями ТУ, проходит специальные виды контроля, к которым относят магнитную дефектоско-

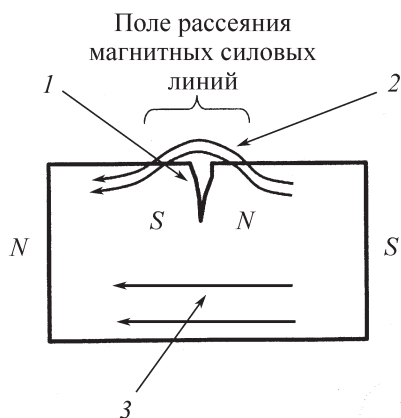


**Рис. 12.12. Изменение потока магнитных силовых линий в изделии с трещиной:**

1 — трещина; 2, 3 — магнитный поток в дефектной и бездефектной зонах изделия

пию, люминесцентный, рентгеновский, ультразвуковой контроль и контроль методом вихревых токов.

*Метод магнитной дефектоскопии* основан на свойстве потока магнитных силовых линий, проходящих через намагниченное изделие, менять свое направление или рассеиваться около трещин (а также неметаллических включений) (рис. 12.12). В месте расположения трещины, выходящей на поверхность или залегающей на глубине до 0,6 мм от поверхности рассеявшийся по очертаниям дефекта поток магнитных силовых линий образует дополнительные полюсы *N* и *S*. Если теперь на изделие нанести (окунанием или распылением) растворитель (минеральное масло, керосин или бензин), в котором во взвешенном состоянии находится порошок оксида железа, то последний соберется у дополнительных магнитных полюсов и, таким образом, выявит границы дефекта.

*Люминесцентный метод* контроля, используемый для контроля штамповок и поковок, относится к капиллярным методам контроля.

Последние основаны на капиллярном проникновении индикаторных жидкостей в полости поверхностных несплошностей материала штамповки или поковки и регистрации образующихся индикаторных следов визуальным способом или с помощью преобразователя.

Обнаружение поверхностных дефектов на штамповках и поковках этим методом базируется на физическом явлении — флуоресценции, сущность которого заключается в том, что некоторые вещества под действием на них света начинают светиться сами.

Широко распространен капиллярный метод контроля ЛЮМ1-ОВ, основные этапы выполнения которого состоят в следующем:

- подготовке поковки к контролю, т.е. в ее обезжиривании и промывке;
- обработке поковки дефектоскопическим материалом — проникающей жидкостью, заполняющей полости дефектов, например трещины, поры; удалении жидкости с наружной поверхности поковки; нанесении проявителя и регистрации дефекта.

В качестве проникающих жидкостей при люминесцентном контроле поковок и штамповок используется смесь автола с керосином (10 % автола и 90 % керосина) или смесь из 15 % авиационного масла (МК или МС) с 85 % керосина.

При этом контроль осуществляют в определенной последовательности. Сначала поковки (штамповки) погружают в проникающую жидкость, которая заполняет трещины. (Продолжительность заполнения полостей дефектов составляет ~10...15 мин.) Затем заготовки на 5...10 с окунают в бензин, например марки Б-70, и промывают в горячей воде. При этом проникающая жидкость смывается с поверхности, оставаясь в трещинах. Промытые и высушенные заготовки опыляют порошком оксида магния (магнезией) очень тонкого помола, который впитывает в

себя жидкость из трещин. Обработанную таким образом поковку (штамповку) затем облучают в темном помещении светом ртутно-кварцевой лампы, видимая область спектра которой отфильтровывается (поглощается стеклом с оксидом никеля). Контроль проводят с помощью специального прибора — люминескопа (рис. 12.13).

Ультрафиолетовый свет вызывает явление флуоресценции в местах дефектов, т.е. там, где прилип проявляющий порошок, впитавший в себя жидкость. При этом трещины четко выделяются ярко-белым цветом на темно-фиолетовом фоне поверхности поковок (штамповок), не имеющей наружных дефектов.

Для обнаружения следа дефекта и расшифровки результатов контроля применяют различные средства осмотра (лупы, бинокулярные стереоскопические микроскопы, зеркала) в условиях, обеспечивающих освещенность объекта контроля.

Этот метод позволяет обнаружить глубокие тонкие трещины с шириной раскрытия  $\geq 0,005$  мм, а царапины и шероховатость поверхностей не дают ложного свечения.

Магнитный и люминесцентный контроль дают возможность выявить наружные трещины. Внутренние дефекты поковок определяют ультразвуковым методом и рентгеноскопией.

*Ультразвуковой метод* основан на отражении ультразвуковых колебаний от поверхностей внутренних дефектов металла.

*Рентгеноскопия* состоит в том, что при просвечивании сплошного металла рентгеновским излучением мощность и интенсивность последнего уменьшается равномерно по сравнению с мощностью и интенсивностью этого излучения, проходящего через внутренние дефекты. В зависимости от того, какую плотность имеет внутренний дефект, он будет выглядеть на рентгеновском снимке в виде темного или светлого пятна.

Удовлетворительные результаты обеспечивает также *метод токовых хвостового контроля*, позволяя контролировать наличие внутренних дефектов, структурное состояние, внутренние напряжения.

После выполнения специальных видов контроля и получения положительного заключения службы главного металлурга на контролируемую партию заготовок оформляется соответствующая техническая документация. В сопроводительных документах делаются отметки о прохождении специального контроля, в соответствующие графы записываются данные механических испытаний материала заготовок, оформляется накладная на передачу заготовок на последующую обработку. Номер накладной и сопроводительной документации заносится в специальный журнал

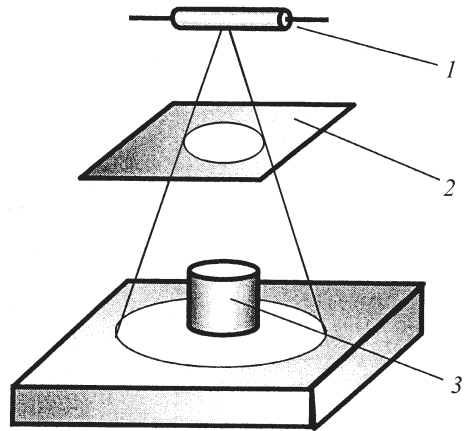


**Рис. 12.13. Схема контроля детали посредством люминескопа:**

1 — ртутно-кварцевая лампа; 2 — стекло с оксидом никеля ("никелевое стекло");  
3 — контролируемая деталь

(или компьютер), по которому можно идентифицировать все партии поковок (штамповок), выпущенные кузнечно-штамповочным цехом.

На детали группы контроля I, проходящие по индивидуальным сопроводительным документам, выдается паспорт качества штамповки, в который заносятся результаты измерения геометрических размеров, результаты металлургического контроля и механические свойства материала заготовки, отметки о выполненных методах специального контроля, номер плавки материала и все идентификационные номера. Оформляется накладная на передачу штамповок на дальнейшую обработку. Номера накладной и паспорта качества со всеми сведениями заносятся в специальный регистрационный журнал или персональный компьютер.



## Глава 13

### ДЕФЕКТЫ ПРИ КОВКЕ И ШТАМПОВКЕ

#### 13.1. ДЕФЕКТЫ ИСХОДНОГО МАТЕРИАЛА

Наиболее распространенными дефектами, приводящими к браку поковок и штамповок, являются: дефекты исходного материала; дефекты, возникающие при резке исходного материала на заготовки; дефекты от нагрева и пластической деформации.

К основным дефектам исходного материала относят: закаты, плены, поверхностные риски, расслоения, флокены, альфированный слой, неметаллические включения (рис. 13.1).

Риски, волосовины, закаты и плены возникают при прокатке металла вследствие задиров и заусенцев на прокатных валках, из-за раскатки в длину подкорковых газовых пузырей стального слитка, от неправильной калибровки или износа ручьев валков прокатных станов, раскатки слитков с застывшими на их поверхности брызгами жидкого металла, прокатки имеющих в слитке раковин или рыхлот.

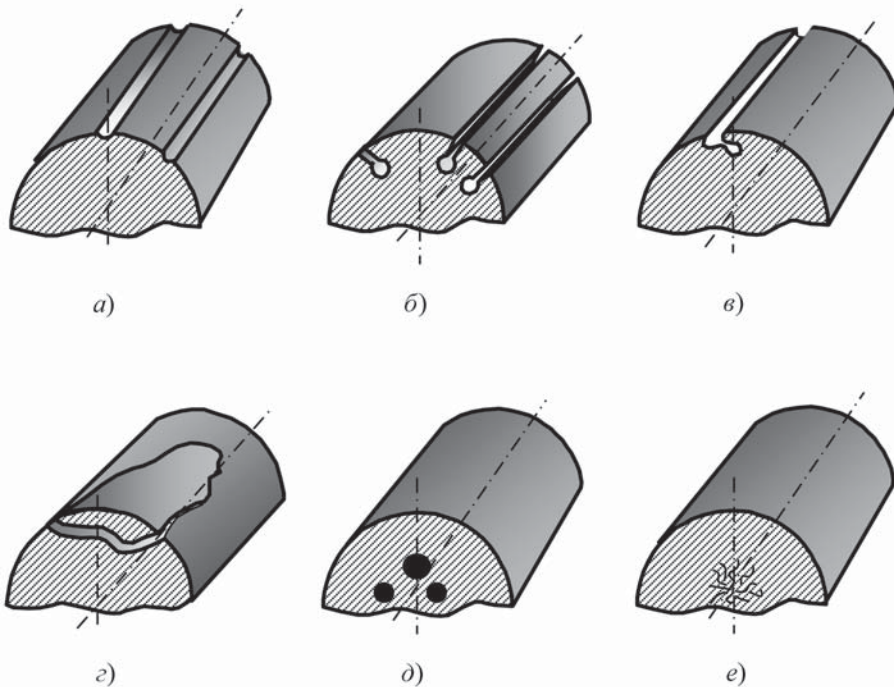


Рис. 13.1. Основные виды дефектов исходного пруткового материала:

а — риски, надирь; б — волосовины; в — закаты; г — плены; д — инородные (неметаллические) включения; е — флокены

Флокены представляют собой скопление в металле мельчайших трещин извилистой формы. Причиной образования флокенов является насыщенность слитков из высоколегированных сталей водородом, который при ускоренном охлаждении послековки или прокатки слитков развивает в микрообъемах металла давление до 1800 МПа, что превышает предел прочности стали и вызывает многочисленные мельчайшие трещины.

Поковки и штамповки, полученные из металла с флокенами, склонны к растрескиванию при закалке. Заготовки, изготовленные из проката с расслоениями, часто имеют трещины на участке перехода поковки в облой, в который перетекают объемы металла с раковинами и рыхлотами, что выявляется при его обрезке. Поковки и штамповки с флокенами и расслоениями — неисправимый брак.

Наличие альфированного (газонасыщенного) слоя на поверхности заготовки приводит к образованию сетки мелких трещин на поверхностях штамповок или поковок, изготавливаемых из титановых сплавов.

Неметаллические включения выявляются при испытании готовых изделий на герметичность (на обнаружение течи по основному металлу), а также при исследовании макроструктуры поковок и штамповок.

Основными дефектами при разделении прутков на мерные заготовки (рис. 13.2) являются: косой срез, торцевые трещины, грубый срез или скол с вырывом металла, заусенец с искривлением конца заготовки, утяжка, неплоскостность (волнистость или ступенчатость) торца, несоответствие размеров или массы заготовки (короткая или длинная заготовка).

Правильный выбор зазоров между ножами, своевременная их заточка и замена, обеспечение надежного упора и прижима заготовки при резке, подогрев металла до требуемых температур позволяют избежать указанных дефектов при резке прутка на мерные заготовки.

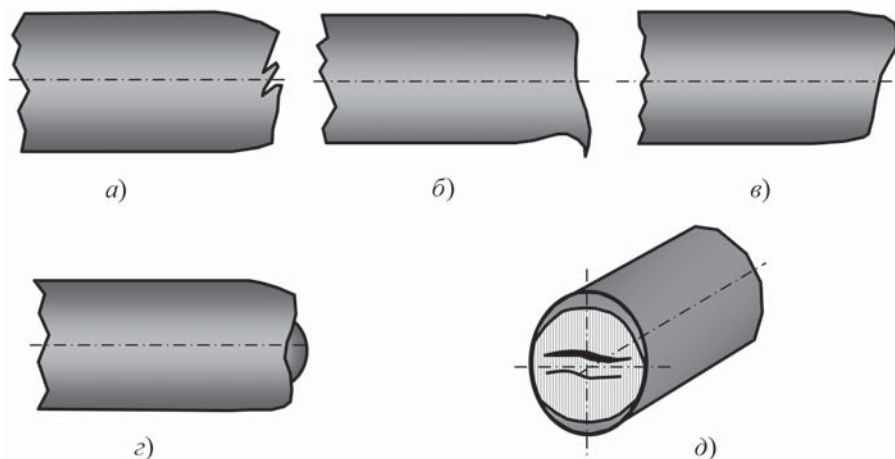


**Рис. 13.2. Дефекты при резке пруткового металла:**

*a* — "козырьки"; *б* — заусенец с утяжкой; *в* — увеличенный скол торца; *г* — вырывы, грубый срез; *д* — торцевые трещины, параллельные рабочим кромкам ножей



## 13.2. ДЕФЕКТЫ, ВОЗНИКАЮЩИЕ В ПРОЦЕССЕ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОКОВОК И ШТАМПОВОК

### 13.2.1. Общие вопросы

Основные дефекты, возникающие при ковке и штамповке заготовок условно можно подразделить на три группы: технологические, конструктивные и производственные.

К *технологическим дефектам* относят:

- дефекты, вызванные неправильно назначенными или выполненными термическими режимами нагрева и охлаждения заготовок, а также термомеханическими режимами штамповки (температурой начала и конца штамповки, степенью деформации по переходам штамповки, скоростью деформирования и т.п.). Следствием этого являются разнородность материала поковок и штамповок, образование трещин в процессе штамповки или охлаждения заготовок, чрезмерная окалина, обезуглероженная поверхность заготовок, а также явления, связанные с перегревом и пережогом металла;

- дефекты, связанные с неправильным назначением припусков на обработку резанием (чернота, следы заштампованной, а затем удаленной с поковки окалины абразивной зачисткой, глубина которой превышает величину припуска на обработку резанием, и т.п.) и остающиеся на поверхности окончательно обработанных деталей;

- дефекты, возникающие вследствие неправильного выбора технологического оборудования, например возникновение альфированного слоя на заготовках из титановых сплавов и их растрескивание при штамповке, вызванное нагревом заготовок в газовой печи вместо электрической с защитной атмосферой, или образование трещин при штамповке из-за неверно назначенного деформирующего оборудования (молот вместо кривошипного прессы) и т.п.;

- дефекты, вызванные ошибочным выбором схемы штамповки, например образование трещин, вызванных применением схемы открытой штамповки вместо закрытой при штамповке малопластичных труднодеформируемых сплавов.

К *конструктивным дефектам* относят:

- дефекты от несовпадения объемов предварительных и окончательных ручьев штампов, неправильно выбранных радиусов и уклонов, перемычек, формы и размеров облойной канавки, несоответствия контура окончательного штамповочного ручья и контура обрезного штампа, неверной конструкции обрезного штампа. Конструктивные дефекты проявляются в виде образования на поковках заковов, зажимов, обрезки тела поковки, большого заусенца, искривления поковки и т.д.

*Производственные дефекты* — это дефекты, возникающие в процессе изготовления штамповок (поковок). К ним относят:

- дефекты, связанные с некачественной настройкой оборудования и штамповой оснастки: например, смещение одной части поковки (штамповки) относительно другой по плоскости разъема штампов, недоштамповка, перештамповка (тонкая штамповка), неравномерная толщина штамповки (для равнотолщинных участков штамповки), обрезка части тела поковки при удалении облоя;

- дефекты, вносимые вследствие нарушения технологических режимов ковки (штамповки): недогрев металла, приводящий при штамповке к образованию "холодных" трещин; заков, связанные с неправильным размещением заготовки в ручье

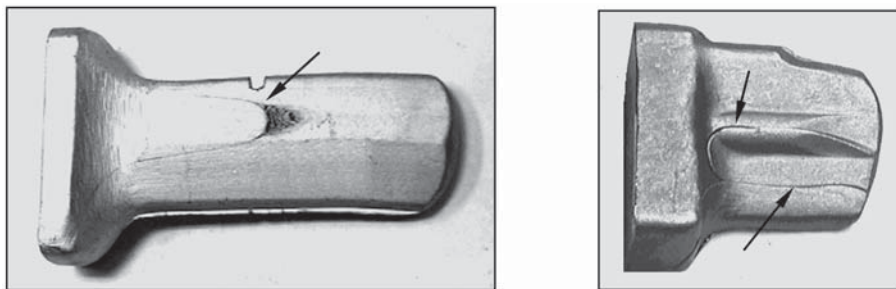


**Рис. 13.3.** Производственный дефект в виде расслоений металла при выдавливании промежуточной заготовки лопатки газотурбинного двигателя

штампа; незаполнение ручьев штампа; намины, вмятины и смятие участков штамповки или поковки; заштампованная окалина и т.д. На рис. 13.3–13.7 приведены некоторые виды производственных дефектов.

На рис. 13.3 показан дефект, наиболее часто встречающийся при выдавливании заготовок, в виде расслоения металла в поверхностном слое выдавленной заготовки. Причиной дефекта может быть неоднородное трение материала по матрице, подхаживание заготовки и, как следствие, значительная разность скоростей течения внутренних и наружных слоев выдавливаемого металла.

На рис. 13.4 приведены производственные дефекты, вызванные неправильной укладкой заготовки в штамповочный ручей и, следовательно, приводящие к смятию тела штамповки или незаполнению гравюры штампа.

На рис. 13.5 видны типичные производственные дефекты, связанные с неправильной настройкой оборудования при прямом выдавливании заготовок: короткая выдавленная часть (рис. 13.5, а) и недостаточная высота утолщенной части штамповки (рис. 13.5, б).

На рис. 13.6 приведен производственный дефект в виде надира и глубоких рисок на поверхности выдавленной заготовки. Причинами возникновения надиров являют-

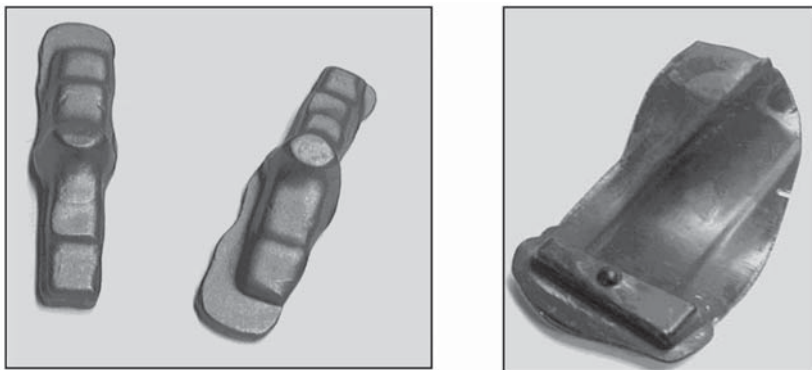
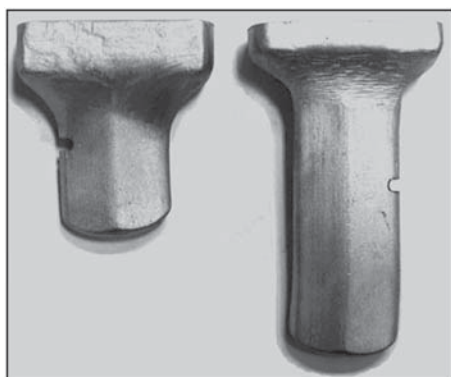


**Рис. 13.4.** Производственные дефекты, связанные с неправильной укладкой заготовки в ручей штампа



а) б)

**Рис. 13.5. Дефекты выдавленных заготовок, вызванные неправильной настройкой величины хода пуансона**

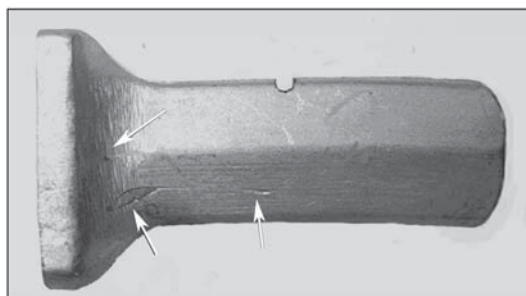


**Рис. 13.6. Дефекты в виде надиров и рисок на поверхности выдавленной заготовки**

ся налипание выдавливаемого металла на рабочие поверхности матрицы, неудовлетворительная смазка заготовок с включением посторонних твердых частиц, высокая шероховатость радиусной рабочей зоны матрицы.

На рис. 13.7 показаны дефекты в виде заковов (прострелов). Наиболее частая причина их образования — встречное течение выдавливаемого металла в очаге пластической деформации заготовки.

### 13.2.2. Основные дефекты поковок, изготавливаемых на молотах

*Дефекты, возникающие при свободной ковке:*

- глубокие вмятины на поверхности поковки от заштампованной окалины;
- трещины на последних проходах ковки из-за охлаждения заготовки и, как следствие, недостаточной пластичности металла;
- образование глубокой обезуглероженной зоны вследствие нарушения технологии нагрева исходных заготовок под ковку;
- вогнутость торцев на поковках, изготавливаемых путем интенсивной протяжки заготовки круглого сечения при недостаточном ее нагреве или малой силе тяжести падающих частей молота;
- наружные трещины на поверхности поковки при несоблюдении температурного интервала ковки;
- образование в поковках зон с крупнозернистой структурой вследствие недостаточного прокова исходной заготовки.



**Рис. 13.7. Заготовка лопатки авиационного двигателя с дефектом в виде закова (прострела)**

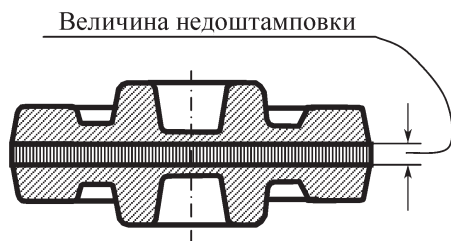


Рис. 13.8. Недоштамповка поковки

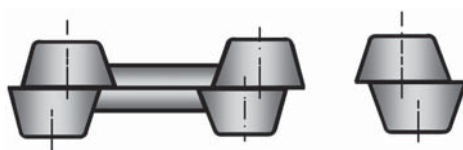


Рис. 13.9. Смещение (перекос) частей поковки относительно плоскости разъема штампов

### *Дефекты, возникающие при штамповке на молотах*

**Вмятины** от заштампованной окалины. Для предотвращения дефекта необходимо тщательно удалять окалину, для этого в штампах должны быть предусмотрены специальные переходы. Небольшие вмятины можно исправить перештамповкой в новом штампе.

**Забоины** — механические повреждения поковок при извлечении их из штампа в случае застревания, при переброске горячих поковок или попадании посторонних предметов в штампы.

**Лом-бой** — неисправимый брак поковки, получившей удар при смещении ее с нижней гравюры штампа при штамповке или обрезке заусенца.

**Незаполнение фигуры** — отклонение от заданных геометрических размеров поковки вследствие незаполнения чистового ручья штампа у выступов, углов, закруглений и ребер. Причиной может быть недостаточный нагрев заготовки или малое число ударов при штамповке, изношенный или неправильно сконструированный штамп, а также небольшая сила тяжести или несоответствующий профиль заготовки.

**Недоштамповка** — увеличение всех размеров заготовки в направлении, перпендикулярном к плоскости разъема (рис. 13.8). Это происходит в результате недостаточных температуры нагрева заготовки, числа ударов бабы молота в окончательном ручье или силы тяжести падающих частей молота, в штампе с недостаточной выемкой под заусенец (облой), а также при чрезмерной силе тяжести или увеличенном профиле заготовки.

**Перекас (смещение)** — сдвиг одной половины поковки относительно другой по плоскости разъема (рис. 13.9). Причиной этого могут быть неисправности оборудования (увеличенный зазор в направляющих, выработка плоскостей штамподержателя, неправильная настройка и т.д.) или штампов (сбитые замки, выработка крепежных плоскостей, неуравновешенный разъем штампов и т.д.), а также ненадежная установка и плохое крепление штампов.

**Зажим** — заштампованная складка в результате неправильного течения металла в чистовом ручье или закатывания заусенцев, полученных при некачественном выполнении первых переходов штамповки. Зажимы происходят при эксцентричной укладке заготовок в ручей штампа, при чрезмерно резких ударах в протяжном или подкатном ручье, при несогласованных размерах чернового и окончательного ручья, неисправных штампах и оборудовании. Незначительные зажимы удаляют зачисткой на абразивном круге.

*Заусенец* (рис. 13.10) — несрезанный остаток облоя при небрежной установке поковки в обрезной штамп, несоответствии размеров матрицы обрезного штампа либо при смещении поковки в обрезном штампе. Может быть удален путем зачистки на наждачном круге.

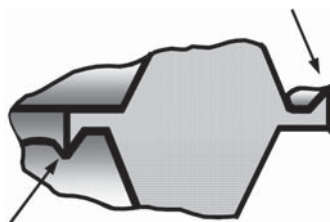


Рис. 13.10. Заусенцы

*Кривизна* (рис. 13.11) — отклонение осей и плоскостей поковки от их правильного геометрического положения. Наиболее часто она возникает при обрезке облоя у поковок сложной формы, с тонкими сечениями при большой длине. Дефекты возникают из-за неисправности или плохой подгонки контура вырубного пуансона или неправильной конструкции обрезного штампа. Устраняются холодной правкой в штампе.

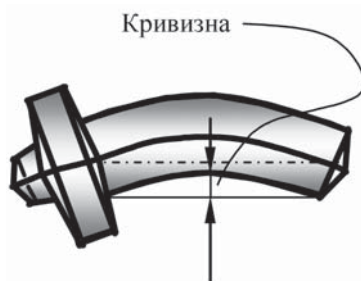


Рис. 13.11. Кривизна цилиндрической части поковки

### 13.2.3. Основные дефекты при горячей объемной штамповке на кривошипных горячештамповочных прессах

#### 13.2.3.1. Общие вопросы

Ниже рассматриваются основные виды дефектов, встречающиеся в производстве при объемной штамповке на кривошипных горячештамповочных прессах (КГШП).

*Незаполнение гравюры штампа материалом штамповки* — дефект, возникающий преимущественно в нижних полостях чистового ручья штампа (рис. 13.12) при накоплении в них продуктов сгорания смазки, окалины; при глубоких выступях и ребрах — из-за отсутствия или неправильного расположения газоотводящих каналов в штампе; в углах на тонких сечениях поковки (рис. 13.13), примыкающих к облойно-му мостику вследствие недостаточного сопротивления вытеканию металла в облой.

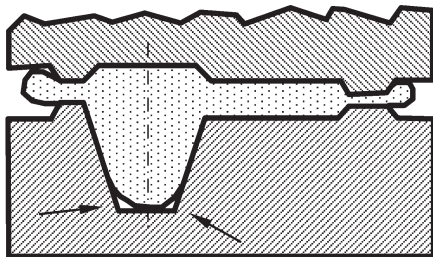


Рис. 13.12. Незаполнение глубокой полости штампа (вследствие отсутствия газоотводящих каналов)

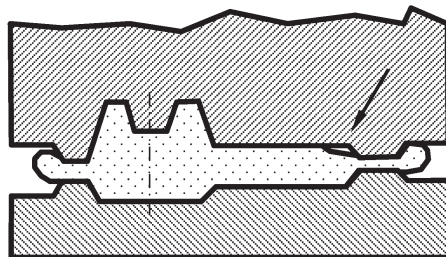


Рис. 13.13. Незаполнение гравюры (ручья) штампа

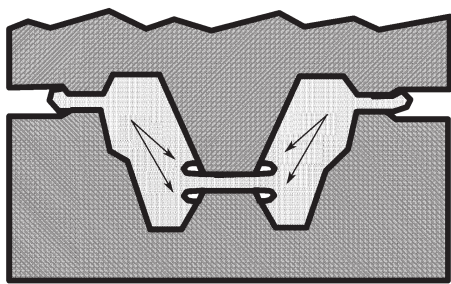


Рис. 13.14. Зажимы в виде "прострелов"

*Коробление поковки* — дефект, появляющийся при застревании штампов (особенно с развитой площадью поверхности и тонкими сечениями) и последующем извлечении из ручья штампа, имеющего малые уклоны ( $\sim 0^{\circ}30' \dots 2^{\circ}$ ).

*След от толкателя штампа или прессы* — грубая вмятина или высокий выступ при удлиненном или укороченном толкателе соответственно.

*Увеличенный размер* на участке перехода от большего сечения ручья штампа к меньшему из-за интенсивного локального изнашивания штампа, вызванного интенсивным течением металла в данной зоне.

Затруднения при штамповке возникают из-за интенсивного течения металла в данной зоне.

*Заусенец* — остаток облоя, следствие затрудненных условий обрезки, так как при штамповке на прессах толщина облоя под обрезку в 1,5 раза больше, чем на молотах, а кромка мостика изнашивается быстрее в результате более интенсивного течения металла в облой.

*Зажимы* (рис. 13.14) — дефект, который вызван неправильной конструкцией ручьев штампа; при штамповке заготовки возникает "прострел" от истечения металла из перемычки в тело поковки, а также при попарной штамповке поковок. В местах возможных зажимов в штампах необходимо предусматривать специальные выемки (карманы) для затекания избытка металла. Этот дефект предотвращается иногда снижением скорости деформирования.

### 13.2.3.2. Основные дефекты, возникающие при штамповке выдавливанием

Основные виды дефектов, возникающие при штамповке выдавливанием следующие (рис. 13.15).

*Пресс-утяжина* (рис. 13.15, а) — результат изменения направления течения слоев металла под пуансоном с горизонтального на вертикальное. Предотвращают этот дефект снижением скорости деформирования.

*Прострел* (рис. 13.15, б) — вид зажима при интенсивном течении металла в тело поковки под торцем пуансона при малом радиусе его кромки.

*Скол наружный* (рис. 13.15, в) образуется вследствие различных скоростей и перемещений металла на границах мертвых зон при больших заходных углах матриц. Предотвращают его снижением скорости деформирования и корректировкой рабочего угла матрицы.

*Надиры и подрывы* (типа ерша) на поверхности поковки появляются при значительном трении выдавливаемого металла о стенки матрицы. Предотвращают их полированием стенок матрицы, подбором смазки и скорости деформирования.

*Скол внутренний* (рис. 13.15, г) образуется при выдавливании очень пластичного металла, когда коэффициент трения мал, а угол матрицы велик, что приводит к значительному превышению скорости течения периферийных слоев выдавливаемой заготовки над скоростью течения срединных слоев металла заготовки.

*Трещины на продеформированной части заготовки* (рис. 13.15, д) возникают при переходе материала из состояния неравномерного всестороннего сжатия в приемнике в иное напряженное состояние на выходе из очага матрицы, обусловливающему



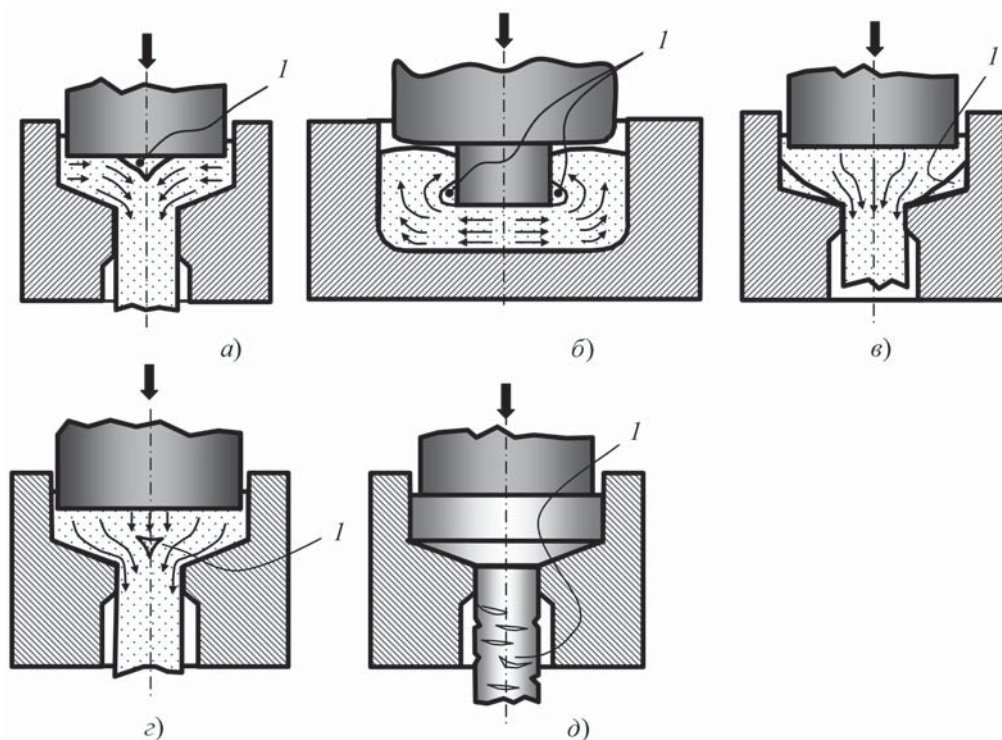


Рис. 13.15. Дефекты 1 при выдавливании:

*a* — пресс-утяжина; *б* — прострел; *в* — скол наружный; *г* — скол внутренний; *д* — трещины

появление в поверхностных слоях растягивающих напряжений в результате тормозящего действия сил трения.

#### 13.2.4. Некоторые виды дефектов при штамповке поковок на горизонтально-ковочных машинах

Основные дефекты при штамповке на горизонтально-ковочных машинах (ГКМ) приведены на рис. 13.16.

Среди них:

— *образование кольцевого заусенца при формовке в окончательном ручье* (рис. 13.16, *a*) как следствие избытка объема металла в высаживаемой части исходной (прутковой) заготовки, а также неправильная настройка машины. Устраняется уменьшением длины высаживаемой части заготовки;

— *смещение высаживаемой части заготовки относительно оси штамповки* (рис. 13.16, *б*), получаемое вследствие неудовлетворительной настройки ГКМ; избавляются от него путем поднастройки ГКМ посредством смещения формовочного ручья.

— *образование продольного заусенца на зажимаемой части заготовки* (рис. 13.16, *в*) из-за неправильной настройки ГКМ или неверно спроектированного зажимного

ручья, устраняемое корректировкой настройки ГKM или корректировкой конструкции зажимного ручья;

– *заковы* в зоне перехода от высаживаемой части заготовки к стержневой (рис. 13.16, *г*), появляющиеся в результате неверного оформления переходной зоны на предварительном переходе. Удаляются они доработкой оснастки ГKM, формирующей переходную зону заготовки на предварительном переходе;

– *трещины на поковке* (рис. 13.16, *д*), образующиеся на формовочном переходе вследствие значительной степени деформации материала поковки. Для их устранения вводят дополнительный наборный переход;

– *потеря устойчивости высаживаемой части заготовки* (рис. 13.16, *е*), возникающая при критическом отношении длины высаживаемой части заготовки к ее диаметру. Ликвидируется этот дефект введением штамповки заготовки в дополнительном наборном ручье или уменьшением длины высаживаемой части исходной заготовки;

– *незаполнение формовочного ручья* вследствие недостаточного объема металла высаживаемой части заготовки или сбоя настройки ГKM. Устраняется увеличением длины высаживаемой части исходной заготовки или проверкой настройки ГKM.

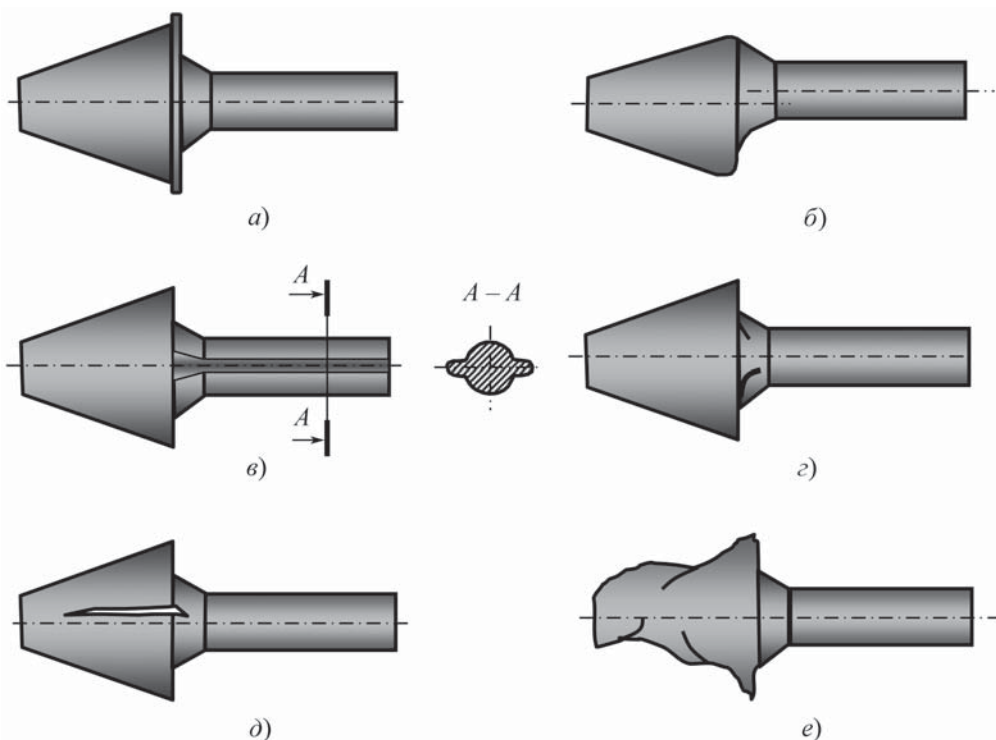


**Рис. 13.16. Некоторые виды дефектов при штамповке прутка в наборном ручье ГKM:**

*а* – образование торцевого заусенца; *б* – смещение осей наборного ручья и оси прутковой заготовки; *в* – образование заусенца по разьему зажимных матриц; *г* – заковы в переходной зоне заготовки; *д* – трещина в зоне посадки заготовки; *е* – потеря устойчивости высаживаемой части заготовки



### 13.2.5. Основные виды дефектов при вальцовке

При вальцовке длинномерных штучных заготовок в ковочных вальцах наиболее часто встречаются следующие дефекты: трещины в начале вальцевания, образование заусенца вдоль оси заготовки по ширине вальцуемой части, искривление последней относительно оси заготовки, отклонения длины вальцуемой части заготовки.

*Трещины в начале вальцевания* (рис. 13.17, а) образуются при внедрении ковочных секторов — штампов в вальцуемую заготовку вследствие чрезмерно большой степени деформации заготовки (т.е. обжатия), а также при малых заходных радиусах секторов — штампов. Дефект устраняют доработкой заходных радиусов секторов — штампов в сторону их увеличения либо уменьшением степени обжатия заготовки.

*Заусенец*, расположенный по кромкам вальцуемой части заготовки вдоль ее оси (рис. 13.17, б), появляется при неправильной настройке ковочных вальцев либо ошибке при расчете заготовки. Ликвидируют этот дефект разведением валков ковочных вальцев или пересчетом заготовки.

*Искривление вальцуемой части заготовки*, например вальцуемой заготовки лопатки авиационного двигателя (рис. 13.17, в), часто связано с неравномерным распределением степеней деформации в околосромочных зонах вальцуемой заготовки,

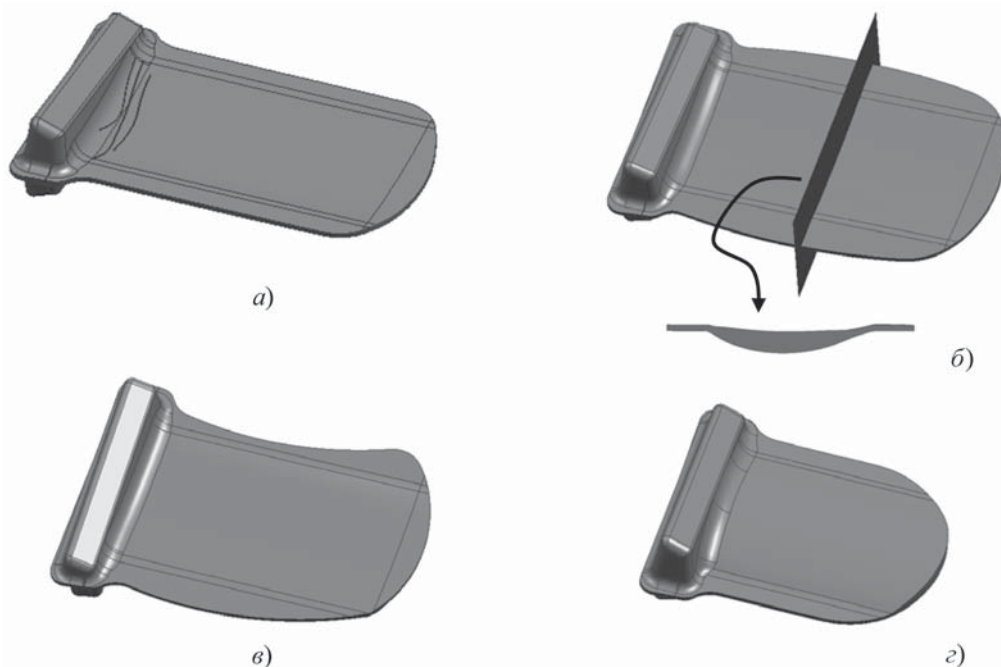


**Рис. 13.17. Основные виды дефектов при вальцовке заготовок лопаток газотурбинных двигателей из штучной заготовки:**

а — трещины в радиусе перехода замка в перо заготовки лопатки; б — заусенец по кромкам пера вальцуемой заготовки; в — "саблеобразность" вальцуемого пера заготовки лопатки; г — короткая окальцованная часть пера заготовки

приводящих к разным скоростям истечения металла по ее кромкам. Дефект характерен при вальцовке длинномерных заготовок переменного поперечного сечения с эквидистантным распределением припуска на исходной заготовке. Устраняют его, обеспечивая на заготовке пропорциональное распределение припуска перед вальцовкой, а также регулируя коэффициент трения (введением смазки или ее исключением) по зонам вальцуемой заготовки.

*Отклонения длины вальцуемой части заготовки* (короткая или чрезмерно удлиненная вальцуемая часть). Дефект связан с недостаточной (короткая вальцуемая часть заготовки) или чрезмерной (удлиненная) степенью деформации (обжатием) поперечных сечений заготовки по толщине. Ликвидируется этот дефект путем регулирования расстояния между ковочными вальцами.

## Глава 14

# КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОБЪЕМНОЙ ШТАМПОВКИ

---

---

### 14.1. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

В настоящее время как в объемной, так и в листовой обработке металлов давлением (ОМД) находит широкое применение виртуальное компьютерное моделирование процессов ОМД, в основе которого лежит комплексное использование современного программного обеспечения. Для конструкторской разработки ассоциативных моделей и формирования чертежей используются следующие системы объемного проектирования: Unigraphics NX (UG), CATIA, Pro/Engineer, Solid Edge, Solid Works, Tflex CAD, "Компас 3D", AutoCAD и др.

При этом для моделирования процессов ОМД и прогнозирования поведения металла под воздействием деформирующих нагрузок и условий деформирования все шире распространяются специализированные программные комплексы, например QForm 3D, Forge 3, Deform, PAM–STAMP, AutoForm и др.

Основными причинами создания и активного использования в ОМД этих компьютерных программ являются:

- необходимость сокращения сроков разработки технологических процессов, времени проектирования штамповок, ковочной и штамповой оснастки и проведения опытных работ при внедрении процессов в производство;

- обязательное снижение цены ошибочных технологических и проектных решений до начала промышленных экспериментов, повышение надежности разрабатываемых технических мероприятий, в том числе технологических процессов ОМД, так как в современном машиностроении находят широкое применение детали сложных форм, изготавливаемые из труднодеформируемых материалов (например, из высоколегированных жаропрочных сталей, титановых сплавов и т.п.), для которых предсказать характер течения металла и эффективность процесса при штамповке заготовки или детали зачастую достаточно проблематично даже для опытного специалиста;

- активное развитие компьютерной техники и технологии с одновременным курсом системы образования на подготовку пользователей персональными компьютерами делает доступным привлечение программного моделирования процессов ОМД для предприятий и организаций различного уровня.

Компьютерное моделирование процессов ОМД включает в себя несколько этапов.

Разрабатывая технологию штамповки заготовки, на первом этапе выполняют анализ чертежа детали на технологичность. Затем проектируют чертеж штамповки, назначая напуски, припуски, допуски; создают при необходимости технологические и контрольные базы; выбирают плоскость или поверхность разреза штампов (если требуется); назначают радиусы сопряжения поверхностей, штамповочные уклоны; составляют маршрутную карту технологического процесса изготовления штамповки, в которой указывают вид или тип штамповки, предварительные операции фасонирования исходной заготовки, намечают необходимое оборудование и т.п.

Далее, например, в системе Unigraphics NX проектируют математическую модель штампуемой заготовки, разрабатывают (к примеру, в системе AutoCAD) чертеж штамповки, который согласовывают с техническими службами цехов — изготовителями детали.

На основе анализа математической модели штамповки, опираясь на накопленный опыт изготовления подобного класса деталей или технологические рекомендации, изложенные в научно-технической литературе, определяют вид и число предварительных (например, фасонирующих) переходов или операций штамповки. На каждый переход или операцию разрабатывают математическую модель изготавливаемого полуфабриката. Рассчитывают геометрию исходной заготовки, на которую также разрабатывают математическую модель. Полученные модели служат базой для компьютерного моделирования переходов или операций технологического процесса изготовления штамповки и проектирования формоизменяющей оснастки.

В зависимости от целей компьютерного моделирования или разрабатывают упрощенные математические модели (содержащие, например, только гравюру матрицы и пуансон) штамповой оснастки для моделирования переходов либо операций технологического процесса, или проектируют подробные математические модели инструмента для анализа его работоспособности при формоизменении заготовки. Дополнительно назначают технологические параметры анализируемого процесса (например, температуру нагрева заготовки перед деформированием, температуру подогрева штампа, скорость перемещения рабочих элементов пресса, силу, которую может развить пресс, тип используемой смазки и т.п.), а также свойства материала штампуемой заготовки, характерные точки, линии и поверхности в теле формоизменяемой заготовки для последующего анализа и определения параметров течения материала в процессе штамповки заготовки.

Выполненный затем компьютерный анализ переходов или операций штамповки позволяет, в частности, выявить такие дефекты анализируемого процесса, как заковы на поверхности заготовки, прострелы внутри штамповки (при помощи лагранжевых линий), проверить степень заполнения гравюры штампа, оценить температурные и скоростные поля на любой стадии формоизменения заготовки, определить степени и скорости деформации, напряжения в характерных зонах заготовки, потребные силы деформирования, нагрузку на инструмент и многое другое.

По результатам компьютерного анализа принимают решение об успешности разработанного технологического процесса. При положительном результате технологический процесс изготовления штамповки оформляют документально, проектируют и изготавливают штамповую оснастку. При отрицательных результатах вносят коррективы в анализируемый технологический процесс с последующим повторным его моделированием.

На основе разработанных математических моделей штамповой оснастки (например, в системе Unigraphics NX) изготовители оснастки разрабатывают управляющие программы для станков с числовым программным управлением, изготавливают оснастку, точность изготовления которой при необходимости сравнивают с математической моделью при ее контроле, например, на компьютеризированных контрольно-измерительных машинах (например, измерительном комплексе ОПТЕЛ-КЛ и др.). Аналогичному контролю подвергают и штамповки, изготавливаемые в кузнечном цехе.

## 14.2. ПРИМЕР ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОГРАММЫ QForm 3D В ПРОИЗВОДСТВЕ КОМПРЕССОРНЫХ ЛОПАТОК ГТД

Компрессорные лопатки газотурбинных двигателей (ГТД) относятся к наиболее нагруженным и массовым деталям, которые должны обладать помимо повышенных требований к точности формы поверхностей и их взаимного положения, высокими механическими и антикоррозионными свойствами, а также хорошей циклической прочностью.

Условия работы компрессорных лопаток, особенно лопаток роторов компрессора ГТД, заставляют предъявлять к материалам, из которых они изготавливаются, требования сохранения прочности при температуре до 600 °С, высокой усталостной прочности и повышенной коррозионной стойкости. Для их изготовления широкое применение находят титановые сплавы (например, ВТ3-1, ВТ8, ВТ9), коррозионно-стойкие стали (например, 13Х14НВФРА, 1Х12Н2ВРФ и ХН35ВТЮ-ВД), а также различные алюминиевые сплавы.

При этом вышеперечисленные серьезные требования к изготовлению и надежности в эксплуатации компрессорных лопаток ГТД в значительной мере удовлетворяются методом их изготовления — горячей штамповкой (изотермической, высокоскоростной и т.д.), позволяющей получить высокие механические характеристики деформированного материала. В свою очередь, эти характеристики могут быть обеспечены только путем разработки оптимального технологического процесса формоизменения исходной заготовки (традиционно прутковой заготовки) в готовое изделие — штамповку лопатки.

Рассмотрим частичное решение этой задачи с привлечением компьютерной программы QForm 3D, разработанной в России, для оптимизации условий формоизменения исходной заготовки в части исключения заковов и незаполнения гравюры штампа в процессе изготовления заготовки лопатки ротора компрессора ГТД.

В качестве исходной информации перед проектированием штамповки лопатки использована непосредственно математическая модель лопатки (рис. 14.1), разработанная конструктором, например, в системе Unigraphics NX.

На ее основе спроектирована математическая модель штамповки лопатки с припусками, допусками и технологическими бобышками (рис. 14.2), геометрия которой

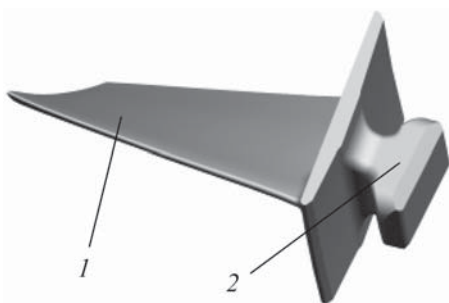


**Рис. 14.1. Математическая модель готовой лопатки:**

1 — перо; 2 — замок лопатки  
(материал — титановый сплав ВТ8,  
длина лопатки 25 мм)

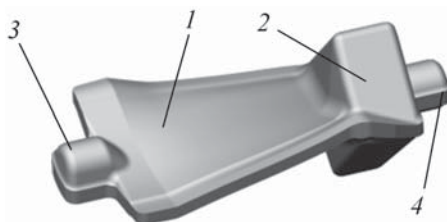


**Рис. 14.2. Математическая модель штамповки лопатки:**

1 — перо; 2 — замок; 3, 4 —  
технологические бобышки

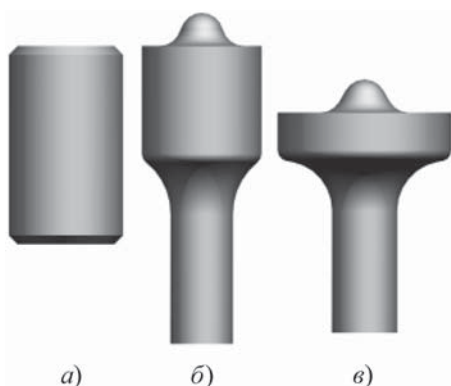


**Рис. 14.3. Математические модели исходной прутковой заготовки (а) и полуфабрикатов после выполнения переходов прямого (б) и комбинированного (в) выдавливания**

предварительно согласовывается с цехом, завершающим изготовление лопатки, например путем обработки технологических баз, электрохимической обработки перьевой части, обработкой резанием замка лопатки с последующей полировкой пера абразивной лентой.

На следующем этапе разрабатывается схема технологического процесса штамповки заготовки лопатки (так называемая маршрутная карта технологического процесса), предусматривающая в качестве исходной заготовки пруток круглого поперечного сечения (рис. 14.3), объем которого равен объему изготавливаемой штамповки с учетом дополнительного объема металла, расходуемого на облой при окончательной штамповке заготовки. При этом имеется в виду прямое выдавливание определенного

объема цилиндрической заготовки (расходуемого на оформление перьевой части заготовки и технологической бобышки с облоем), комбинированное выдавливание с преобладанием осадки оставшейся цилиндрической части заготовки (для набора металла, расходуемого на оформление замка штамповки лопатки и технологической бобышки на замке) и окончательная штамповка фасонной заготовки в молотовом штампе.

Для моделирования первого перехода прямого выдавливания исходной заготовки и моделирования второго перехода комбинированного выдавливания в системе QForm 3D проектируются пуансоны и матрицы (рис. 14.4 и 14.5); задают геометрические параметры заготовок, свойства материала, условия деформирования и выполняют непосредственно моделирование процессов выдавливания.

Затем моделируют операцию формоизменения полуфабриката в молотовом штампе (рис. 14.6).

Из результатов моделирования в QForm 3D видно (рис. 14.6, б), что на заготовке лопатки в процессе штамповки образуются заковы и наблюдается незаполнение гравюры штампа в областях замка и технологической бобышки на конце пера заготовки. При этом формируется чрезмерно большой по площади и объему облой в зоне замка штампуемой заготовки лопатки.

На основании полученных результатов моделирования корректируют первый переход прямого выдавливания: несколько увеличивают длину выдавленной части заготовки (для повышения надежности заполнения технологической бобышки на конце пера заготовки) и уменьшают длину исходной прутковой заготовки (для сокращения объема металла, расходуемого на образование облоя).

Кроме того, изменяют геометрию инструмента на втором переходе выдавливания заготовки: цилиндрическую форму осаженной части заготовки заменяют на форму параллелепипеда (рис. 14.7). Ожидается, что этот прием будет способствовать более надежному заполнению гравюры штампа в угловых зонах замка при одновременном уменьшении объема металла, расходуемого на образование облоя.

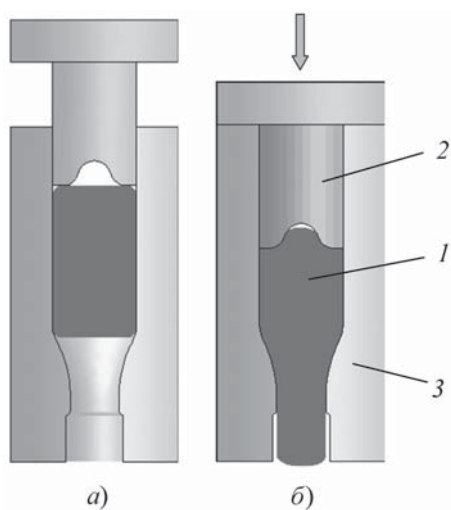


Рис. 14.4. Начальный (а) и завершающий (б) этапы моделирования процесса прямого выдавливания:

1 – заготовка; 2 – пуансон; 3 – матрица

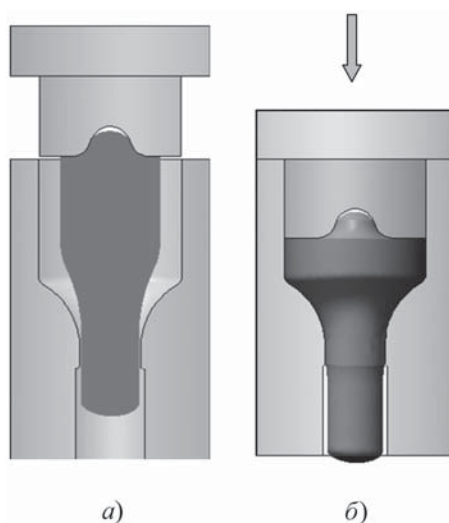


Рис. 14.5. Начальный (а) и завершающий (б) этапы моделирования процесса комбинированного выдавливания

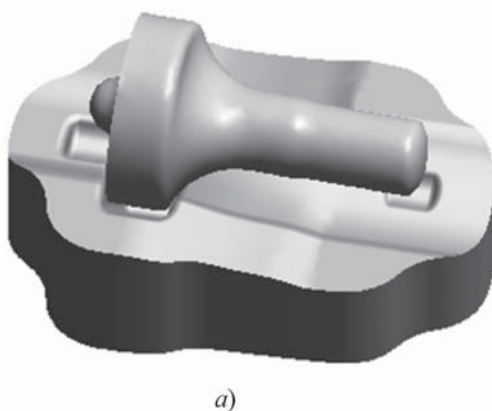
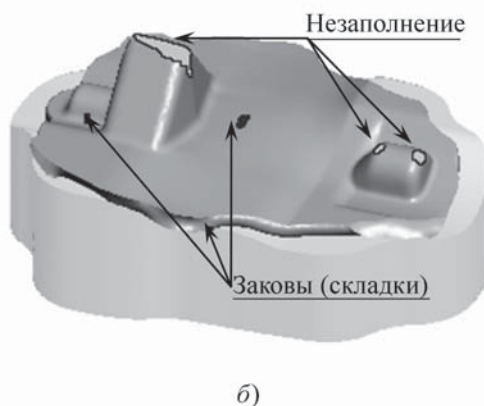


Рис. 14.6. Начальный (а) и завершающий (б) этапы деформирования полуфабриката в молотовом штампе



По откорректированным переходам проектируют инструмент для расчета в QForm 3D и выполняют повторное моделирование технологического процесса штамповки заготовки лопатки (рис. 14.8 и 14.9).

После повторного моделирования процесса штамповки заготовки лопатки (рис. 14.9, б) видно, что гравюра штампа целиком заполнена металлом заготовки, а заковы (складки) отсутствуют.

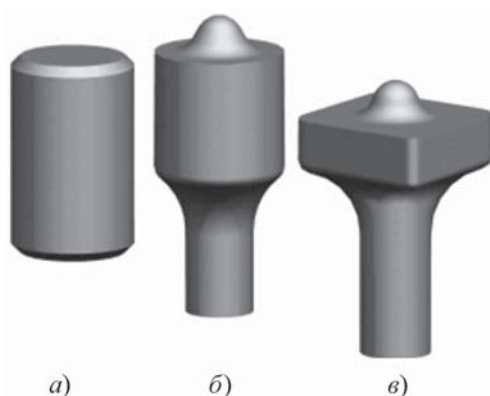


Рис. 14.7. Корректировка математических моделей исходной заготовки (а), полуфабриката после прямого (б) и комбинированного (в) выдавливания

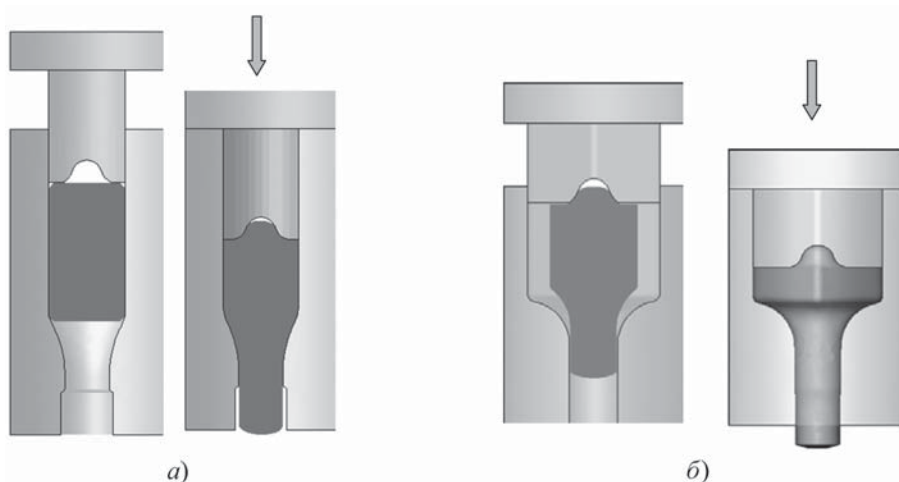


Рис. 14.8. Повторное моделирование переходов прямого (а) и комбинированного (б) выдавливания

Важным фактором при штамповке титановых сплавов является соблюдение температурного интервала штамповки, верхняя граница которого не должна перекрывать температуру полиморфного превращения сплава для предотвращения его перегрева. Программа QForm 3D позволяет оценить температурные поля на поверхности и в объеме штампуемой заготовки на любой стадии формоизменения заготовки. На рис. 14.10 приведены температурные поля штампуемой заготовки на заключительной стадии ее формоизменения. Ясно, что различные зоны штамповки имеют различную температуру, но максимальное по величине температурное поле не превышает температурного диапазона деформирования титанового сплава ВТ8.

Дополнительно программа QForm 3D дает возможность определить требуемую силу деформирования заготовки, например в зависимости от изменяющегося в процессе штамповки расстояния между штампами (рис. 14.11). Это позволяет рацио-



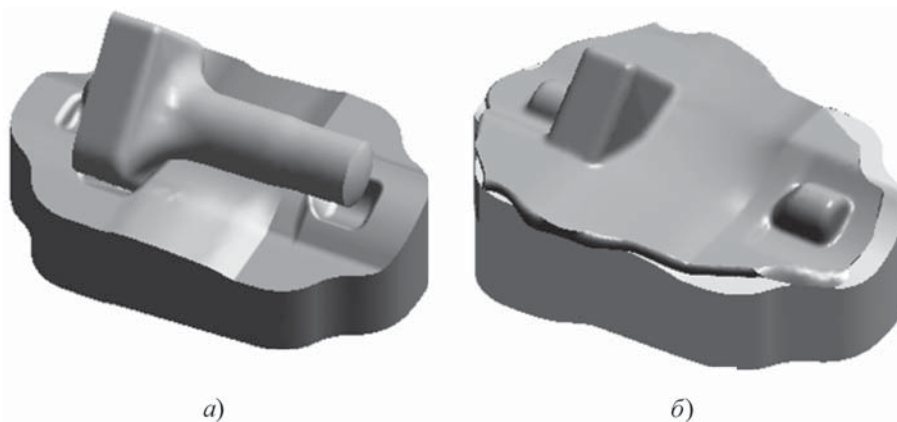


Рис. 14.9. Начальный (а) и завершающий (б) этапы повторного компьютерного моделирования процесса штамповки откорректированной промежуточной заготовки в молотовом штампе

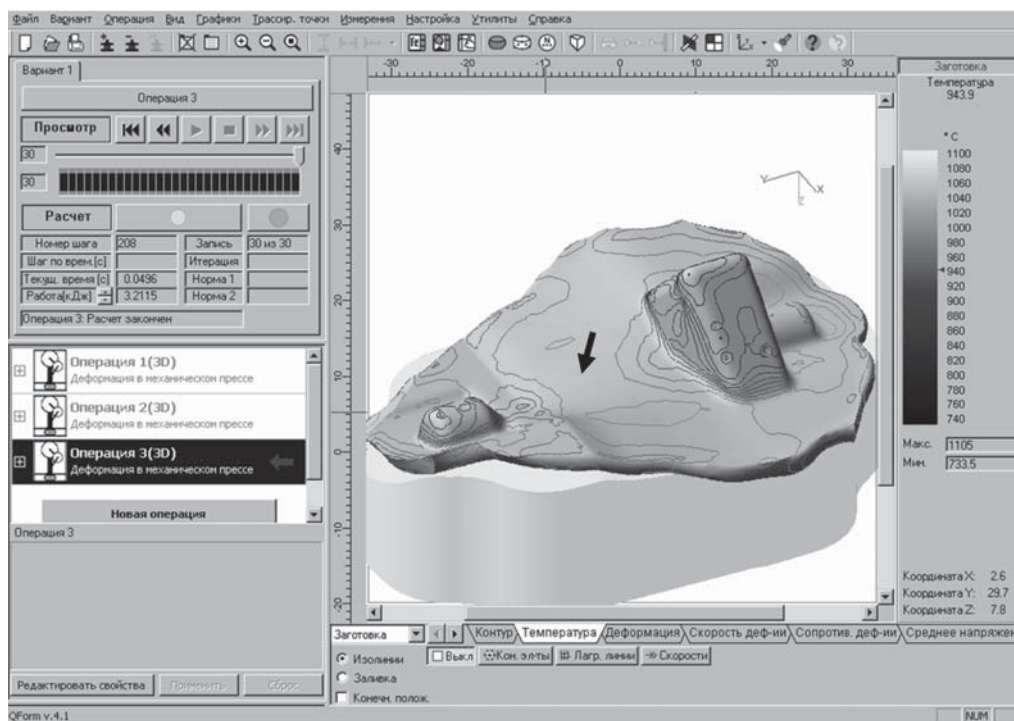


Рис. 14.10. Температурные поля в конце штамповки заготовки. Интерфейс программы QForm3D

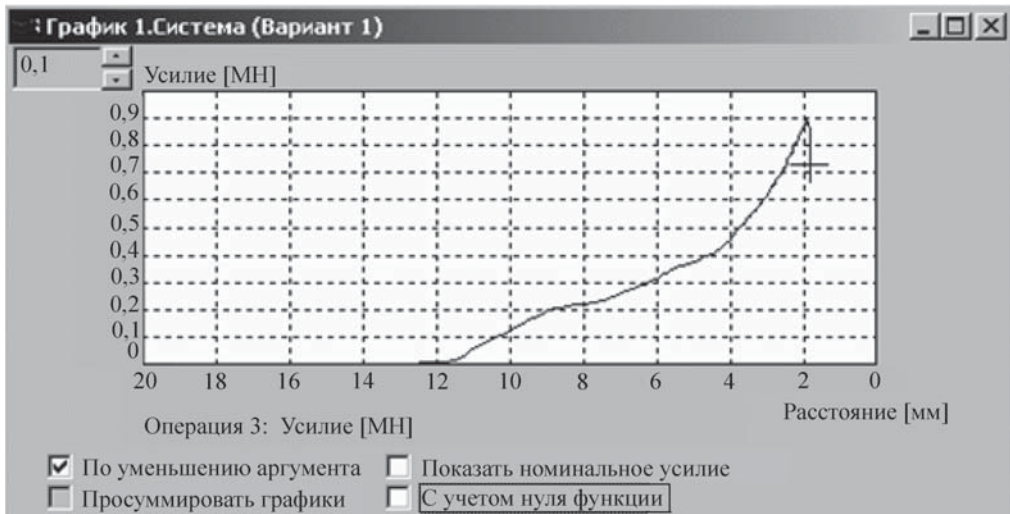


**Рис. 14.11.** График изменения силы деформирования при штамповке заготовки лопатки в зависимости от расстояния между верхним и нижним молотовыми штампами

нально выбрать (или проверить) штамповочное оборудование для реализации процесса штамповки заготовки.

После того как моделирование технологического процесса штамповки заготовки лопатки в программе QForm 3D успешно завершено, приступают к разработке математических моделей формоизменяющей оснастки (штампов) разрабатывают при необходимости конструкторскую документацию на оснастку и оформляют комплект технологической документации на изготовление штамповки лопатки.

## Глава 15

# ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ПОКОВОК И ШТАМПОВОК

---

---

### 15.1. НАЗНАЧЕНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

#### 15.1.1. Общие вопросы

*Термической обработкой* называют технологический процесс теплового воздействия, состоящий из нагрева, выдержки и охлаждения изделий из металлов и сплавов по определенным режимам с целью обеспечения заданного изменения свойств и структуры сплавов, сохраняющихся после прекращения теплового воздействия. Термическая обработка — самый распространенный в современной технике способ изменения свойств металлов и сплавов. По глубине и разнообразию структурных изменений, возникающих в результате термообработки, с ней не могут сравниться ни механические, ни какие-либо иные воздействия на металлы.

**Экскурс в историю.** Термообработку применяли с древнейших времен как технологическую операцию, но развитие ее как науки относится к середине XIX столетия. До этого знания человека о термообработке представляли совокупность рецептов, выработанных на основе многовекового опыта. Эти рецепты, часто весьма ценные, передавали из поколения в поколение; секреты выполнения отдельных операций иногда терялись в веках и вновь познавались, но истинная природа процессов, происходящих в металле при термообработке, оставалась загадкой.

Бурное развитие техники в XIX в. стимулировало переход термообработки из искусства в науку.

В середине XIX столетия армия и флот стремились заменить бронзовые и чугуновые пушки более прочными, а следовательно, и более мощными стальными орудиями. Начало широкого производства артиллерийских орудий из стали относится к 50-м гг. XIX в. В этот период проблема изготовления стальных орудийных стволов высоких надежности и прочности была чрезвычайно острой. Выдающиеся металлурги того времени знали рецепты плавки и литья стали, но, несмотря на это, при учебной стрельбе разрывы стволов стальных орудий случались довольно часто.

Множество стальных крупновских орудий без видимых причин разорвалось в войну Пруссии с Австрией (1866 г). Наступил кризис доверия к стали как к материалу для орудийных стволов, и начался возврат к бронзовым пушкам.

В 1866 г. на Обуховский сталелитейный завод в Петербурге был приглашен на должность техника молотового цеха Дмитрий Константинович Чернов (1839—1921 гг.). В 1868 г. в Русском техническом обществе Д.К. Чернов сделал знаменитый доклад, в котором сообщил о результатах работы по выяснению причин брака стальных поковок. Наблюдая под микроскопом шлифы, приготовленные из дул орудий, и изучая под лупой строение изломов в месте разрыва, Чернов пришел к выводу, что сталь тем прочнее, чем мельче ее структура. Тогда он начал искать причину приобретения сталью мелкой структуры.

Сравнительные исследования стали послековки при разных температурах показали, что изменения в структуре стали нужно отнести к влиянию температуры.

После этого необходимо было для каждого сорта стали с определенным содержанием углерода найти температуры, при которых изменяется структура. Д.К. Чернов высказал гениальное предположение, что еле заметные поверхностные изменения цвета, обнаруживаемые в темноте на охлаждающейся раскаленной поковке при двух разных температурах, связаны с глубокими внутренними изменениями структуры.

Эти температуры Чернов определил на глаз и обозначил точками *a* и *b*. "Сталь, какой бы твердой она ни была, будучи нагрета ниже точки *a*, не принимает закалки, как бы быстро ее ни охлаждали". Чтобы получить мелкозернистый излом, необходимо нагреть сталь немного выше точки *b*. [Обычно точку *b* отождествляют или с критической точкой  $A_{c3}$  на диаграмме железо—углерод (см. рис. 5.1) или несколько выше, иногда на 200...300 °C].

Таким образом, Д.К. Чернов в 1868 г. открыл внутренние структурные превращения в стали и связал с ними тепловой режимковки и технологию термообработки. Тем самым великий русский металлург заложил научные основы термической обработки.

Основополагающий доклад Д.К. Чернова был переведен на иностранные языки, и предложенные им правила обработки стали вошли в практику заводов многих стран. Работы Д.К. Чернова в области металловедения и термической обработки получили мировое признание.

Выдающийся последователь Д.К. Чернова французский инженер Флорис Осмонд (1849—1912 гг.) применил в 1886 г. термопару Ле Шателье для определения критических точек стали при термическом анализе. Работы Осмонда, подтвердившего и развившего выводы Чернова, привлекли внимание многих металлургов и химиков к проблеме структурных превращений в металлах и послужили дополнительным толчком для широких экспериментальных исследований в этой области.

Первые крупные исследования в области термообработки цветных сплавов были выполнены в начале XX века. В 1900 г. А.А. Байков (1870—1946 гг.) на сплавах меди с сурьмой доказал, что способность к закалке присуща не только сталям, как это ранее считали, но и цветным сплавам. В 1903 г. в Германии был получен патент на способ облагораживания алюминиевых сплавов нагреванием и закалкой; было показано, что предел прочности литых сплавов алюминия с медью в результате закалки возрастает в 1,5 раза.

В 1906 г. немецкий инженер А. Вильм (1869—1937 гг.) на изобретенном им дуралюмине открыл явление старения сплава после закалки — один из основных способов упрочнения сплавов.

В 1919 г. американский металловед П. Мери́ка (1889—1957 гг.) вскрыл природу старения дуралюминов, связав упрочнение при старении с образованием дисперсных выделений в пересыщенном твердом растворе. Это было одним из наиболее выдающихся достижений в теории термической обработки: по диаграммам состояния с переменной растворимостью компонентов в твердом состоянии стало возможно предсказывать области составов сплавов, способных к дисперсионному твердению.

Начиная с 20-х годов XX столетия развитие теории термообработки характеризуется детальным изучением природы, механизмов и кинетики структурных превращений в твердом состоянии с помощью разнообразных физических методов исследований и прежде всего рентгеновского анализа. В течение двух-трех десятилетий

были накоплены обширные сведения о закономерностях изменений структуры и свойств металлов и сплавов при воздействии температуры.

Одновременно с развитием теоретических представлений совершенствовались известные и разрабатывались новые способы термообработки, например термомеханическая обработка, и создавались новые термически упрочняемые сплавы.

В итоге многочисленных исследований была создана стройная теория термической обработки металлов и сплавов, которая позволяет на научной основе как разрабатывать и совершенствовать технологические процессы, так и получать сплавы с заданными свойствами.

### 15.1.2. Классификация основных видов термической обработки

В общем случае любой процесс термической обработки может быть описан графиком в координатах температура–время. При этом основными параметрами термической обработки являются: максимальная температура нагрева  $T_{\max}$  сплава, время выдержки  $\tau_v$  сплава при температуре нагрева; скорости нагрева  $v_n$  и охлаждения  $v_o$ . На практике обычно пользуются средней скоростью нагрева и охлаждения ( $v_{n, \text{ср}} = T_{\max} / \tau_n$  и  $v_{o, \text{ср}} = T_{\max} / \tau_o$ ). На рис. 15.1 приведен график простейшей термообработки, включающей в себя нагрев до заданной температуры, выдержку при этой температуре и охлаждение.

По форме этого графика ничего нельзя сказать о том, с каким видом термообработки мы имеем дело. Вид термообработки определяется не только характером изменения температуры во времени, но и типом фазовых и структурных изменений, происходящих в процессе нагрева и охлаждения в металле. На основе этого разработана схема классификации основных видов термической обработки металлов и сплавов, приведенная на рис. 15.2.

Термическая обработка подразделяется на собственно термическую, термомеханическую и химико-термическую. Собственно термическая обработка заключается только в термическом воздействии на металл или сплав, термомеханическая – в сочетании термического воздействия и пластической деформации, химико-термическая – в сочетании термического и химического воздействия.

Все виды собственно термообработки, приведенные на рис. 15.2, относятся как к сталям, так и к цветным металлам и сплавам. Каждый из видов термообработки подразделяется на разновидности, специфические для сплавов, имеющих разные основы.

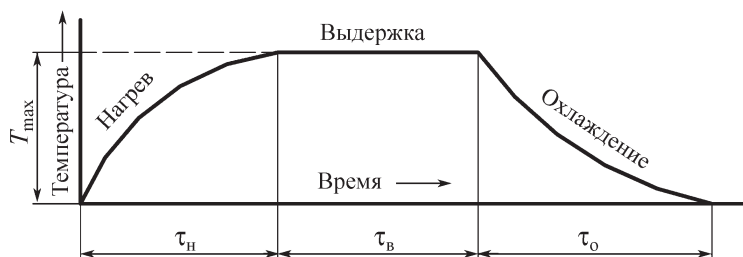


Рис. 15.1. График простейшей термообработки

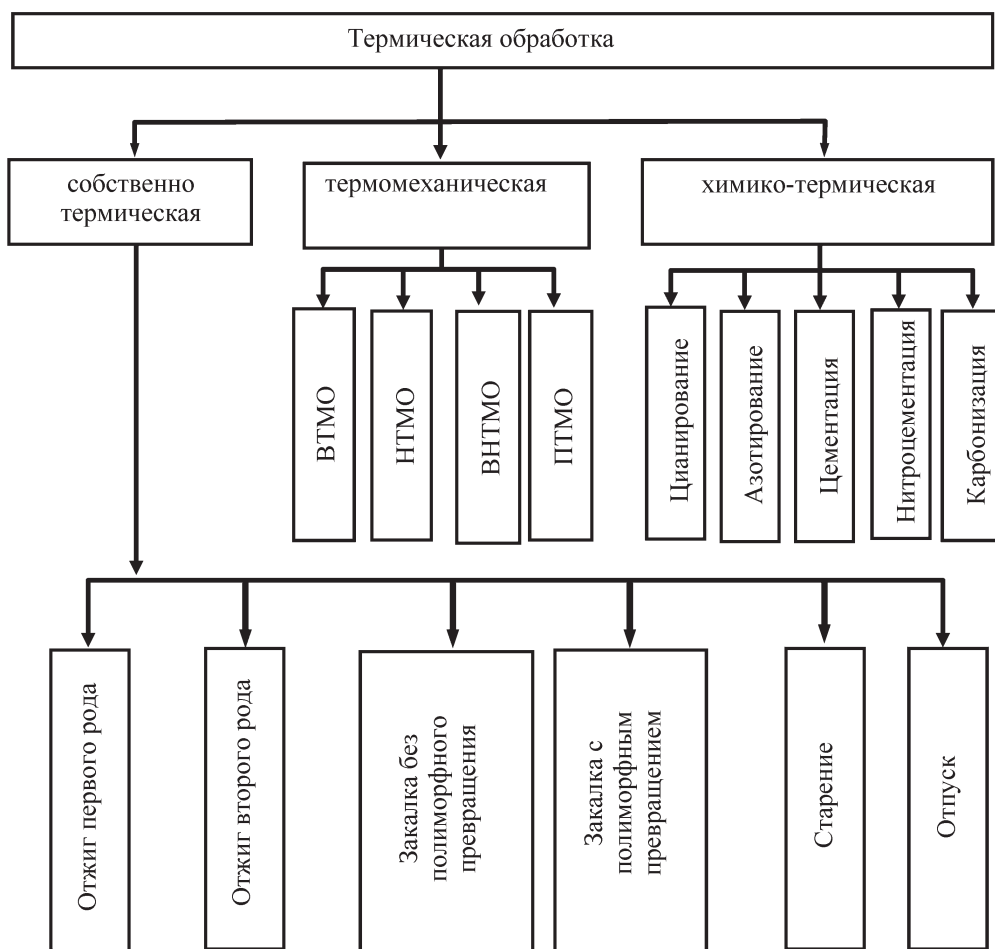


Рис. 15.2. Схема классификации основных видов термической обработки металлов и сплавов:

ВТМО – высокотемпературная термомеханическая обработка; НТМО – низкотемпературная термомеханическая обработка; ВНТМО – высоконизкотемпературная термомеханическая обработка; ПТМО – предварительная термомеханическая обработка

## 15.2. ОТЖИГ ПЕРВОГО РОДА

*Отжиг первого рода* применяют для частичного или полного устранения отклонений от равновесного состояния металла или сплава, возникших при предыдущей обработке (литье, обработке давлением, сварке, термообработке и других процессах), причем его проведение не обусловлено фазовыми превращениями.

Разновидности отжига первого рода: гомогенизационный (диффузионный), до-рекристаллизационный, рекристаллизационный и отжиг, уменьшающий напряжения. Названия этих разновидностей продиктованы видами отклонений от равновесного состояния металла или сплава, устраняемых тем или иным видом отжига. Про-

цессы, устраняющие отклонения от равновесного состояния, проходят самопроизвольно, и нагрев при отжиге первого рода проводят лишь для ускорения этих процессов. Основные параметры отжига первого рода: температура нагрева и время выдержки. Скорости нагрева и охлаждения имеют подчиненное значение.

*Гомогенизационный отжиг (диффузионный)* — термообработка, при которой главным процессом является устранение последствий дендритной ликвации, образующейся в процессе литья слитка или отливки.

Основное изменение свойств, достигаемое гомогенизационным отжигом при термообработке литого сплава, — повышение пластичности; при обработке деформируемых сплавов — снижение (устранение) влияния "наследственности" литой структуры на технологичность сплава при его последующей холодной обработке давлением (улучшаются штампуемость листов при глубокой вытяжке, степень обжатия при холодной прокатке и т.п.).

Диффузионный отжиг (гомогенизационный) позволяет уменьшить химическую неоднородность стальных слитков и фасонных отливок. Для этого слиток или отливку нагревают до температуры, при которой атомы элементов приобретают большую подвижность, благодаря этому атомы перемещаются из мест с большей концентрацией химических элементов в места с их меньшей концентрацией. В результате такой диффузии происходит выравнивание химического состава по объему отливки. Для обеспечения необходимой скорости диффузии отжиг отливок проводят при высокой температуре (1100...1200 °С) с выдержкой 10...20 ч.

*Рекристаллизационный отжиг* — это термическая обработка деформированного металла или сплава, при которой главным процессом является рекристаллизация. Рекристаллизационный отжиг применяется для снятия наклепа, вызванного холодной пластической деформацией. Наклепом называют упрочнение металла вследствие холодной пластической деформации. При ней зерна металла деформируются, дробятся. Это повышает твердость металла, снижает его пластичность и иногда вызывает хрупкость.

Рекристаллизационный отжиг выполняют путем нагрева металла до температуры ниже точки  $A_1$  (см. рис. 5.1) (~ 650...700 °С); выдержки и последующего замедленного охлаждения. При нагреве металла до 650...700 °С возрастает диффузионная подвижность атомов, и в твердом состоянии происходят вторичные кристаллизационные процессы (рекристаллизация). На границах деформированных зерен зарождаются новые центры кристаллизации, вокруг которых заново строится кристаллическая решетка. Вместо старых деформированных зерен вырастают новые равноосные зерна, и деформированная структура полностью исчезает. При этом восстанавливаются исходная структура и свойства металла.

*Дорекристаллизационный отжиг* — это термическая обработка деформированного металла или сплава, при которой главным процессом, происходящим в материале, является возврат. Этот отжиг бывает смягчающим и упрочняющим. Дорекристаллизационный смягчающий отжиг применяют для повышения пластичности при частичном сохранении деформационного упрочнения. Его используют, когда необязательно или нежелательно полное смягчение, достигаемое рекристаллизационным отжигом.

Алюминиевые листы марок АД, АД1 и др. обычно поставляют после дорекристаллизационного смягчающего отжига при 150...300 °С. Применяя этот вид отжига, наряду с повышением пластичности преследуют также цели уменьшения остаточ-



ных напряжений, стабилизации свойств и увеличения антикоррозионной стойкости материала.

Дорекристаллизационный упрочняющий отжиг способствует улучшению упругих свойств пружин и мембран.

*Отжиг, уменьшающий напряжения*, — это термическая обработка, при которой главным процессом является полная или частичная релаксация внутренних остаточных напряжений.

Причины образования внутренних остаточных напряжений (напряжений первого рода) кроются в разных степенях пластической деформации или разном изменении удельного объема в различных точках деформируемого тела. Удельный объем изменяется при термическом сжатии и расширении, фазовых (структурных) превращениях в твердом состоянии сплава и изменении химического состава его поверхностных слоев. (Если бы термическое расширение или сжатие, фазовые превращения в твердом состоянии проходили бы одновременно и в одинаковой степени по всему объему тела, то внутренние напряжения не возникали бы.)

Практически внутренние напряжения могут появиться при любой обработке материала, например горячей и холодной обработке металла давлением, сварке, закалке, обработке материала резанием и т.д. Эти напряжения, складываясь с рабочими, извне приложенными, могут их увеличивать или уменьшать. Как правило, наиболее опасны растягивающие остаточные напряжения, которые, суммируясь с растягивающими напряжениями от внешних нагрузок, приводят к разрушению деталей. (Иногда даже при малых рабочих внешних нагрузках.)

Отжиг, уменьшающий напряжения, широко применяется в технике для снижения вредных остаточных растягивающих напряжений, позволяет повысить допустимые внешние нагрузки, а также сопротивляемость усталости и ударным нагрузкам; снижает склонность к хрупкому разрушению и межкристаллитной коррозии; стабилизирует размеры и предотвращает коробление и поводку изделий.

Если рабочие напряжения при эксплуатации изделий сравнительно небольшие (далеки от предела текучести) и основное требование к деталям — высокая стабильность размеров и формы, то для предотвращения коробления не обязательно добиваться значительного уменьшения остаточных напряжений. Примером могут служить малонагруженные базовые детали точных станков и приборов, отливаемые из дешевого серого чугуна.

Старинная практика предотвращения коробления таких отливок — вылеживание их на складе при температуре окружающей среды в течение нескольких месяцев и даже нескольких лет. Этот способ стабилизации размеров чугунных отливок называют естественным старением (к естественному старению после закалки этот процесс никакого отношения не имеет). Многомесячное вылеживание отливок из серого чугуна в условиях современного производства трудно использовать как основной способ предотвращения коробления. Для ускорения стабилизации размеров применяют отжиг чугунных отливок при 500...600 °С в течение 2...4 ч.

Стали отжигают для уменьшения напряжений при температурах обычно несколько ниже критической точки  $A_{c1}$  (см. рис. 5.1).

Разрядка остаточных напряжений при отжиге происходит только в результате развития пластической деформации во всем объеме изделия или в отдельных его участках. Если остаточные напряжения значительно меньше предела текучести, то релаксируют они очень медленно из-за развития процесса ползучести. Для более



полного и быстрого уменьшения уровня остаточных напряжений применяют различные кратковременные нагрузки, налагаемые на изделие. Эти нагрузки, суммируясь с остаточными напряжениями, вызывают пластическую деформацию в макрообъемах изделия, ускоряя релаксацию остаточных напряжений.

Один из самых старых способов создания кратковременных нагрузок — принудительная вибрация или обстукивание со всех сторон чугунных отливок. Эти приемы достаточно эффективно предотвращают коробление. Для удаления остаточных напряжений с одновременной правкой прутков, труб и т.п. из алюминиевых сплавов их растягивают на 1...3 % с помощью специальных растяжных машин.

Временную нагрузку можно создать и чисто термообработкой. Для этого используют два способа: термоциклирование и термоудары.

*Термоциклирование* применяют к сплавам, у которых фазы резко отличаются термическими коэффициентами линейного расширения, например у силуминов — сплавов алюминия с кремнием. (Термические коэффициенты линейного расширения алюминиевых и кремниевых фаз различаются в ~ 6,5 раза.)

Детали из силуминов АК12 (АЛ2) и АК7ч (АЛ9) охлаждают до температур –40... –196 °С, затем нагревают до комнатной температуры и помещают в печь, нагретую до 150 °С (или же сразу переносят в печь). Затем детали охлаждают до комнатной температуры и вновь обрабатывают холодом. В течение трех циклов такой обработки (последней всегда должна быть операция нагрева) остаточные напряжения уменьшаются на 30...70 %. Обычный длительный отжиг при верхней температуре термического цикла (150 °С) несравненно слабее уменьшает остаточные напряжения.

Естественному термоциклированию (с незакономерными циклами изменения температуры под действием солнца, ветра и дождя) подвергают чугунные отливки во время вылеживания под открытым небом. Возникающие при этом временные перегрузки способствуют большей стабилизации размеров, чем вылеживание тех же отливок в закрытом помещении.

*Метод термоударов* заключается в создании при быстром нагреве изделия термических напряжений, которые, вызывая временную перегрузку, способствуют релаксации остаточных напряжений. [Например, детали из алюминиевых сплавов, которые нельзя отжигать из-за недопустимости разупрочнения, предлагается подвергать обработке холодом с последующим термоударом. При этом закаленное изделие помещают в жидкий азот (–196 °С), а затем быстро нагревают до невысоких температур в кипящей воде или струе пара. Предварительное захлаживание в жидком азоте позволяет увеличить термические напряжения во время термоудара при невысокой температуре нагрева.]

### 15.3. ОТЖИГ ВТОРОГО РОДА

В основе отжига второго рода лежат диффузионные фазовые превращения при охлаждении металлов и сплавов.

Основные параметры отжига второго рода — температура нагрева, время выдержки при этой температуре и скорость охлаждения. Температура нагрева и время выдержки должны обеспечить необходимые структурные изменения в материале. Скорость охлаждения должна быть достаточно малой, чтобы при понижении температуры успели пройти обратные фазовые превращения, в основе которых лежит диффу-

зия (или самодиффузия). Обычно при отжиге изделия охлаждают вместе с печью или на воздухе вне печи.

*Полный отжиг* применяют для доэвтектоидных сталей, нагревая их на 20...50 °С выше верхней критической точки  $A_{c3}$  (см. рис. 5.1) с последующим медленным охлаждением.

Основные цели полного отжига следующие: устранение пороков структуры, образующихся при предыдущей обработке металла (литье, горячей деформации, сварке и термообработке); снижение твердости стали перед обработкой резанием и уменьшение внутренних напряжений.

*Неполный отжиг* обеспечивается при нагреве изделий из заэвтектоидных сталей выше температуры  $A_{c1}$  на 30...50 °С, выдержке и последующем медленном охлаждении. При неполном отжиге происходят снятие внутренних напряжений, снижение твердости, повышение пластичности, улучшение обрабатываемости резанием. Неполному отжигу подвергаются высокоуглеродистые, заэвтектоидные, инструментальные, шарикоподшипниковые и другие стали.

*Изотермический отжиг* заключается в том, что сталь нагревают до температуры на 30...50 °С выше точки  $A_{c3}$  (конструкционные стали) и выше  $A_{c1}$  на 50...100 °С (инструментальные). После выдержки сталь медленно охлаждают в расплавленной соли до температуры несколько ниже точки  $A_{r1}$  (680...700 °С). При этой температуре сталь подвергают изотермической выдержке до полного превращения аустенита в перлит, а затем охлаждают на спокойном воздухе. Одним из преимуществ изотермического отжига является возможность получения более однородной структуры, чем при обычном отжиге, так как при изотермической выдержке температура по сечению изделия выравнивается и превращение во всем объеме стали происходит при одинаковой степени переохлаждения. Изотермический отжиг — эффективный способ снижения твердости и улучшения обрабатываемости резанием сложнолегированных сталей.

Разновидностью изотермического отжига является *патентирование*, которое известно с 70-х гг. XIX в. Оно применяется для получения канатной, пружинной и рояльной проволоки.

Проволоку из углеродистых сталей, содержащих 0,45...0,85 % С, нагревают в проходной печи до температуры на 150...200 °С выше  $A_{c3}$ , пропускают через свинцовую или соляную ванну с температурой 450...550 °С и наматывают на приводной барабан.

После патентирования проволоку подвергают многократному холодному волочению с большим суммарным обжатием. Обычно получают проволоку с пределом прочности, равным 1500...2000 МПа (150...200 кгс/мм<sup>2</sup>). На стали У9А, полученной вакуумно-дуговым переплавом для устранения вредного влияния неметаллических включений и примесей, после патентирования и холодной протяжки с суммарным обжатием 99 % был достигнут рекордный уровень предела прочности: 5000 МПа (500 кгс/мм<sup>2</sup>).

*Сфероидизирующий отжиг* обеспечивает превращение пластинчатого перлита в зернистый, сфероидизированный. Это улучшает обрабатываемость сталей резанием. Данный отжиг проводят по режиму: нагрев стали немного выше точки  $A_{c1}$  с последующим охлаждением сначала до 700 °С, затем до 550...600 °С и далее на воздухе. Сфероидизирующий отжиг применяют для сталей, содержащих > 0,65 % С, например подшипниковых.

*Нормализация* — термическая операция, при которой сталь нагревают до температуры на 30...50 °С выше верхних критических точек  $A_{c3}$  и  $A_{cm}$ , затем выдерживают при этой температуре и охлаждают на спокойном воздухе. При нормализации уменьшаются внутренние напряжения, происходит перекристаллизация стали, измельчающая крупнозернистую структуру сварных швов, отливок и поковок.

Нормализация сталей является наиболее производительным и экономически выгодным процессом термической обработки в сравнении с отжигом. Однако с возрастанием содержания углерода в стали увеличивается разница в свойствах между отожженной и нормализованной сталью. Поэтому для сталей, содержащих до 0,2 % С, предпочтительнее нормализация, а для сталей с 0,3...0,4 % С целесообразно проводить отжиг, так как после нормализации по сравнению с отжигом твердость данных сталей значительно выше. Стали после нормализации приобретают мелкозернистую структуру и несколько большую прочность и твердость, чем после отжига. Нормализацию применяют для исправления крупнозернистой структуры, улучшения обрабатываемости резанием, улучшения структуры перед закалкой. В заэвтектоидных сталях нормализация устраняет сетку вторичного цементита.

#### 15.4. ЗАКАЛКА

*Закалка* — это процесс термической обработки, при котором сталь нагревают до определенной температуры, выдерживают при этой температуре и затем быстро охлаждают с целью получения неравновесной структуры. В результате закалки повышаются прочность и твердость, а пластичность у конструкционных и инструментальных сталей снижается. Качество закалки зависит от температуры, скорости нагрева, времени выдержки и скорости охлаждения. Температуру нагрева под закалку определяют по положению критических точек  $A_{c1}$  и  $A_{c3}$ . Доэвтектоидные углеродистые стали при закалке нагревают на 30...50 °С выше верхней критической точки  $A_{c3}$ , а заэвтектоидные — на 30...50 °С выше точки  $A_{c1}$ . Скорость нагрева и время выдержки зависят от химического состава стали, массы и конфигурации детали, типа применяемой нагревательной печи. Скорость нагрева и время выдержки деталей сложной формы определяют опытным путем. Ориентировочно время нагрева в электрических печах принимают равным 1,5...2 мин на 1 мм сечения изделия.

В качестве закалочных сред используют воду, масло, водные растворы солей, щелочей, расплавы солей. Скорость охлаждения в воде в 5–6 раз выше, чем в масле. Воду применяют в основном для охлаждения углеродистых сталей, а масло — для легированных.

Закалка в одной среде — это наиболее простой и широко применяемый способ закалки.

*Закалка в двух средах, или прерывистая закалка.* Деталь, нагретую до температуры закалки, сначала погружают в быстро охлаждаемую среду — воду, а затем в медленно охлаждаемую среду — масло. Такую закалку применяют для обработки инструмента, изготавливаемого из высокоуглеродистых сталей.

*Ступенчатая закалка* заключается в том, что нагретые детали сначала охлаждают до температуры несколько выше мартенситной точки  $M_n$  в горячем масле или расплаве соли, а затем после короткой изотермической выдержки охлаждают на воздухе. При таком виде закалки уменьшаются термические напряжения, коробления и предотвращается образование трещин.

*Изотермическая закалка* выполняется так же, как и ступенчатая, но выдержка в закалочной среде при этом более продолжительная. Изотермической закалке подвергают детали и инструмент из легированных сталей марок 6ХС, 9ХС, ХВГ и др.

*Закалка с подстуживанием* применяется для уменьшения разницы в температурах детали и закалочной среды, если деталь нагрета выше температуры закалки для данной стали. Нагретую деталь перед погружением в закалочную среду выдерживают (подстуживают) на спокойном воздухе. Этот способ закалки обеспечивает уменьшение внутренних напряжений и коробления деталей, особенно подвергнутых цементации.

*Закалка с самоотпуском* состоит в том, что нагретую деталь рабочей частью погружают в закалочную среду и выдерживают в ней не до полного охлаждения, самоотпуск происходит за счет передачи теплоты от нерабочей части детали. Закалку с самоотпуском применяют для обработки зубил, кернов, бородков и другого инструмента, у которого твердость должна плавно понижаться от рабочей части к нерабочей.

*Закалка с обработкой холодом* заключается в продолжении охлаждения закаленной стали до температур ниже комнатной, но в интервале начала и окончания мартенситного превращения, для более полного превращения остаточного аустенита в мартенсит и повышения твердости.

*Закаливаемость* — это способность стали приобретать максимально высокую твердость после закалки. Закаливаемость зависит от содержания углерода в стали: чем оно больше, тем выше твердость.

*Прокаливаемость* называется глубина проникновения закаленной зоны, т.е. способность стали закаливаться на определенную глубину.

## 15.5. ОТПУСК

*Отпуск* — это процесс термической обработки, состоящий из нагрева закаленной стали до температуры ниже критической точки  $A_{c1}$ ; выдержки при этой температуре и последующего охлаждения (обычно на воздухе). Цель отпуска — получение более устойчивого структурного состояния, уменьшение напряжений, повышение вязкости, пластичности, а также снижение твердости и хрупкости закаленной стали. Температура отпуска варьируется в широких пределах (150...700 °С) в зависимости от его цели. Различают низкий, средний и высокий отпуск.

*Низкий отпуск* характеризуется нагревом в интервале температур 150...250 °С, выдержкой при данной температуре и последующим охлаждением на воздухе. Он выполняется с целью получения структуры мартенсита отпуска, частичного снятия внутренних напряжений в закаленной стали, а значит, для повышения вязкости без заметного снижения твердости. Низкий отпуск применяют для инструментальных сталей после цементации.

*Средний отпуск* проводят при температурах 300...500 °С для получения структуры троостита отпуска. Твердость сталей при этом заметно понижается, вязкость увеличивается. Этот отпуск используют для пружин, рессор, а также для инструмента, который должен иметь значительную прочность и упругость при достаточной вязкости.

*Высокий отпуск* выполняют при температурах 500...650 °С. В процессе высокого отпуска мартенсит распадается с образованием структуры сорбита отпуска. Эта структура обеспечивает лучшее сочетание прочности и пластичности в стали. Применяется высокий отпуск для деталей, работающих при ударных нагрузках.

Закалку стали с последующим высоким отпуском называют *улучшением*. Отпуск закаленной стали проводят непосредственно после закалки, так как возникшие в стали внутренние напряжения могут вызвать образование трещин.

*Старение стали* заключается в изменении растворимости углерода и азота в  $\alpha$ -железе, оно может быть связано также с выделением из твердого раствора частиц нитридов. Различают искусственное и естественное старение.

Отпуск, выполняемый при невысокой температуре нагрева, называют *искусственным старением*. Процесс искусственного старения состоит из нагрева закаленной детали до температуры 120...150 °С и выдержки при этой температуре в течение 18...35 ч. Искусственное старение осуществляют в масляных ваннах с автоматической регулировкой температуры.

Отпуск, если он проходит при комнатной температуре, называют *естественным старением*. При естественном старении детали и инструмент выдерживают при комнатной температуре в течение  $\geq 3$  мес, так как процесс, вызывающий изменение размеров детали, протекает значительно медленнее, чем при искусственном старении.

## 15.6. ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

*Термомеханическая обработка* — сравнительно новый метод упрочнения сталей и сплавов при сохранении достаточной пластичности, совмещающий пластическую деформацию и упрочняющую термическую обработку (закалку и отпуск). Различают два способа термомеханической обработки: высоко- и низкотемпературную термомеханические обработки. Термомеханической обработке подвергают стали и стареющие сплавы.

### 15.6.1. Термомеханическая обработка сталей

При термомеханической обработке деформации подвергают сталь в аустенитном состоянии, а при последующем быстром охлаждении формирование структуры закаленной стали (мартенсита) происходит в условиях наклепа аустенита, в связи с чем повышаются механические свойства сталей. Пластическую деформацию при этой обработке осуществляют прокаткой, ковкой, штамповкой и другими способами обработки металлов давлением. На рис. 15.3 приведена схема термомеханической обработки стали.

При высокотемпературной термомеханической обработке сталь нагревают выше точки  $A_{c3}$ , пластически деформируют при данной температуре (степень деформации 20...30 %) и закаливают. При низкотемпературной термомеханической обработке ее нагревают выше температуры точки  $A_{c3}$ , охлаждают до температуры относительной устойчивости аустенита, но ниже температуры рекристаллизации, пластически деформируют при этой температуре со степенью деформации 75...95 % и закаливают. В обоих случаях после закалки следует низкий отпуск.

Высокотемпературной термомеханической обработке можно подвергать любые стали, а низкотемпературной — только стали с повышенной устойчивостью переохлажденного аустенита (легированные стали). По сравнению с обычной закалкой после термомеханической обработки механические свойства получаются более высокими. Наибольшее упрочнение достигается после низкотемпературной термомеханической обработки ( $\sigma_b \approx 2800...3300$  МПа,  $\delta = 6$  %), а после обычной закалки и низкого отпуска предел прочности  $\sigma_b \approx 2000...2200$  МПа.

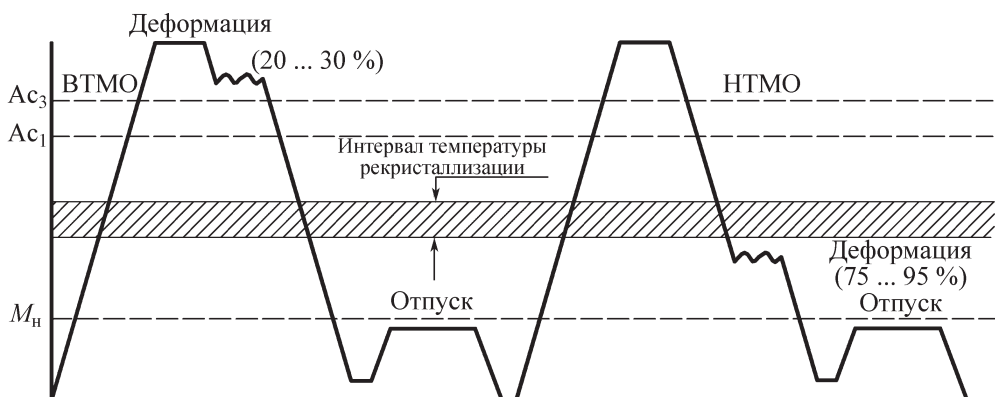


Рис. 15.3. Схема термомеханической обработки стали

При термомеханической обработке стали повышение прочности объясняется тем, что в результате деформации аустенита происходит дробление его зерен. В случае последующей заковки из такого аустенита образуются более мелкие пластинки мартенсита, что положительно сказывается на пластических свойствах и вязкости стали.

### 15.6.2. Термомеханическая обработка стареющих сплавов

Низкотемпературная термомеханическая обработка стареющих сплавов — наиболее широко распространенная в промышленности термомеханическая обработка (рис. 15.4). Основное назначение этого вида обработки — повышение прочностных свойств стареющих сплавов. Сплав сначала подвергают обычной заковке, а перед старением — холодной пластической деформации. По сравнению со старением без предшествующей деформации получают более высокие временное сопротивление  $\sigma_b$  и предел текучести  $\sigma_{0,2}$  и более низкие показатели пластичности.

Упрочнение при низкотемпературной термомеханической обработке вызвано двумя причинами. Во-первых, холодная деформация создает наклеп, и последующее дисперсионное твердение начинается с более высокого уровня твердости сплава. Во-вторых, что особенно важно, холодная деформация увеличивает эффект дисперсионного твердения. В самом первом приближении можно утверждать, что холодный наклеп, вызванный холодной пластической деформацией, повышая плотность несовершенств в кристаллах пересыщенного твердого раствора, делает его менее термодинамически стабильным и ускоряет старение. Благодаря простоте технологии и эффективности процесса в настоящее время его широко применяют в технологии производства полуфабрикатов из стареющих сплавов с различной основой.

При высокотемпературной термомеханической обработке проводят горячую пластическую деформацию, заковку с деформационного нагрева и старение. Сущность высокотемпературной термомеханической обработки заключается в том, что после горячей деформации и заковки получается пересыщенный твердый раствор с перекристаллизованной структурой, т.е. с повышенной плотностью несовершенств



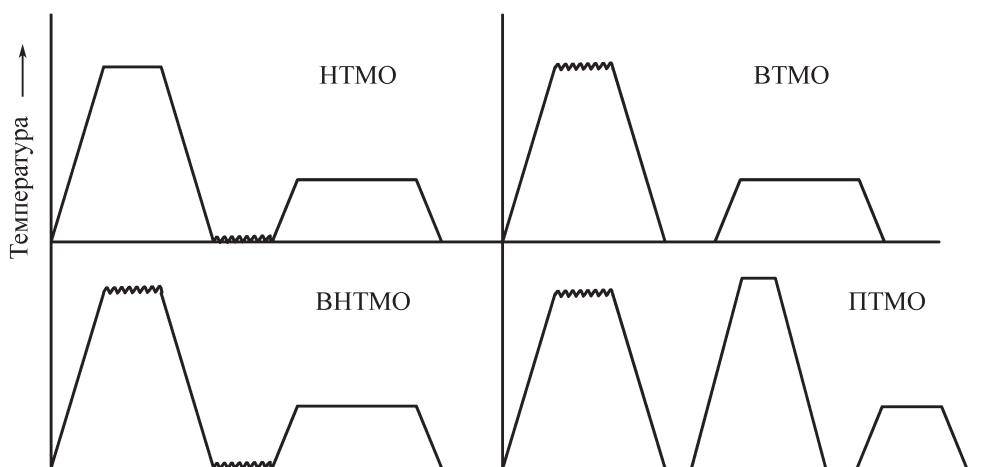


Рис. 15.4. Схемы термомеханической обработки стареющих сплавов

(границ зерен, свободных дислокаций). В результате старения сплава с такой структурой формируются повышенные механические свойства.

Применение высокотемпературной термомеханической обработки ограничивается следующими факторами: сплав может иметь такой узкий температурный интервал нагрева под закалку, что поддерживать температуру горячей обработки давлением в таких узких пределах практически невозможно (например, в пределах  $\pm 5^\circ\text{C}$  для дуралюмина Д16); оптимальный температурный интервал горячей деформации может находиться значительно ниже интервала температур нагрева под закалку.

Высокотемпературную термомеханическую обработку используют для повышения прочностных и пластических характеристик сплавов. В отличие от низкотемпературной обработки, заметно снижающей пластичность, упрочнение при высокотемпературной обработке достигается практически без изменения пластичности. Упрочнение от высокотемпературной термомеханической обработки сохраняется до более высоких температур, чем после низкотемпературной термомеханической обработки.

На практике в производстве чаще используют комбинацию процессов обоих методов обработки — так называемую высоконизкотемпературную термомеханическую обработку, при которой вначале проводят закалку с деформированного нагрева, затем — холодную деформацию и старение. После этого прочность получается выше, а пластичность ниже, чем после высокотемпературной термомеханической обработки.

*Предварительная термомеханическая обработка (ПТМО)* отличается от высокотемпературной термомеханической тем, что операции горячей пластической деформации и нагрева под закалку разделены. Этот вид обработки алюминиевых сплавов давно широко используют в массовом производстве полуфабрикатов; он является эффективным примером применения термомеханической обработки в производстве.

### 15.7. ТЕРМООБРАБОТКА ПОКОВОК И ШТАМПОВОК ИЗ УГЛЕРОДИСТЫХ И ЛЕГИРОВАННЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ

Поковки и штамповки из углеродистых и легированных конструкционных сталей после горячей пластической деформации необходимо подвергать термической обработке. Термообработку поковок и штамповок после горячей пластической деформации из углеродистых и легированных конструкционных сталей выполняют непосредственно после горячей деформации. Термообработку после горячей деформации выполняют для снятия внутренних напряжений и устранения причин образования трещин, а также для уменьшения твердости и улучшения обрабатываемости резанием.

Для некоторых сталей (например, ЭИ 961, ЭИ 736 и др.) мартенситного класса оговаривается разрыв во времени между горячей деформацией и последующим отпуском (как правило, время разрыва лежит в интервале 6...12 ч), причем для мартенситных сталей отпуск следует выполнять после каждого перехода высокотемпературной деформации. Режимы термообработки для углеродистых и легированных сталей после горячей пластической деформации приведены в табл. 15.1 и 15.2.

#### 15.1. Режимы термообработки поковок и штамповок после их изготовления горячей пластической деформацией

| Марка материала                        | Аустенизация<br>(нормализация) |                          | Отжиг (отпуск)       |                          | Твердость<br>НВ |
|----------------------------------------|--------------------------------|--------------------------|----------------------|--------------------------|-----------------|
|                                        | Темпера-<br>тура, °С           | Среда<br>охлажде-<br>ния | Темпера-<br>тура, °С | Среда<br>охлаж-<br>дения |                 |
| Ст 3, стали 10, 15, 20,<br>25, 10ХСНД* | 880 ± 20                       | Воздух                   | 680 ± 20             | Воздух                   | 170...229       |
| Сталь 45*                              |                                |                          |                      |                          |                 |
| 38ХА, 40Х                              | —                              | 149...241                |                      |                          |                 |
| 40ХН2МА                                |                                | 179...269                |                      |                          |                 |
| 12ХН3А                                 |                                | 156...229                |                      |                          |                 |
| 12Х2Н4А                                |                                | 187...269                |                      |                          |                 |
| 14ХГСН2МА (ДИ 3А),<br>(ЭП 176)         | 930 ± 20                       | Воздух                   |                      |                          | ≤ 285           |
| 18Х2Н4МА                               | —                              |                          |                      |                          | 197...255       |
| 30ХГСА                                 |                                |                          |                      |                          | 156...229       |
| 38Х2МЮА                                |                                |                          |                      |                          | 187...255       |
| 38ХН3МФА                               |                                |                          |                      |                          |                 |
| 20Х3МВФ (ЭИ 415)                       |                                |                          |                      |                          | ≤ 255           |
| 12Х13, 20Х13, 30Х13                    |                                |                          |                      |                          | ≤ 285           |
| 20Х13                                  |                                |                          |                      |                          | 207...285       |



Окончание табл. 15.1

| Марка материала                                           | Аустенизация<br>(нормализация) |                       | Отжиг (отпуск)       |                       | Твердость<br>НВ |
|-----------------------------------------------------------|--------------------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------|
|                                                           | Темпера-<br>тура, °С           | Среда ох-<br>лаждения | Темпера-<br>тура, °С | Среда охлаж-<br>дения |                 |
| 14Х17Н2 (ЭИ 268)                                          | —                              | Воздух                | 680 ± 20             | Воздух                | ≤ 285           |
| 07Х12Н2МБФ-Ш<br>(ЭП 609-Ш)                                |                                |                       |                      |                       | ≤ 269           |
| 15Х12Н2МФАБ-Ш<br>(ЭП 517-Ш)                               |                                |                       | 760 ± 20             |                       | ≤ 302           |
| 15Х16К2Н2МВФАБ<br>(ЭП 866-Ш)                              | 680 ± 20                       |                       | ≤ 341                |                       |                 |
| 16Х20К6Н2МВФ-Ш<br>(ЭП 768, ВНС 22-Ш)                      |                                |                       | ≤ 302                |                       |                 |
| 10Х11Н23Т3МР-ВД;<br>10Х12Н22Т3МР-ВД<br>(ЭП 33-ВД, ЭИ 696) | —                              |                       | 850 ± 20             | Вода                  | ≤ 285           |
| ХН67МВТЮ**<br>(ЭИ 445, ЭП 202)                            | 1100 ± 10                      | Воздух                | —                    |                       |                 |
| ХН62ВМТЮ-ВД<br>(ЭП 708-ВД)                                | 1120 ± 10                      |                       |                      |                       |                 |
| 12Х18Н9Т,<br>12Х18Н10Т***                                 | 1050 ± 10                      | Вода                  |                      |                       |                 |
| 13Х11Н2В2МФ-Ш****<br>(ЭИ 961-Ш)                           | —                              |                       | 720 ± 20             | Воздух                | ≤ 302           |
| БрАЖН10-4-4                                               |                                |                       | 725 ± 20             |                       | —               |
| Л63                                                       |                                |                       | 650 ± 30             |                       |                 |
| БрАЖ9-4                                                   |                                |                       | 725 ± 25             |                       |                 |
| БрАМц9-2                                                  |                                |                       | 700 ± 20             |                       |                 |
| МЗ*****                                                   |                                |                       | 650 ± 30             | Вакуум                |                 |

\* Нормализация выполняется для грузоподъемных деталей

\*\* Для деталей, входящих в сварное соединение.

\*\*\* Закалку выполнять для стопорных шайб.

\*\*\*\* Отжиг выполнять дважды.

\*\*\*\*\* Для деталей топливной аппаратуры, отжиг в вакууме.

15.2. Режимы термообработки поковок и штамповок

| Марка материала | Закалка (аустенизация, нормализация) |                   |                                           | Отпуск (старение) |                   |                  | Твердость НВ                                   | Примечания |
|-----------------|--------------------------------------|-------------------|-------------------------------------------|-------------------|-------------------|------------------|------------------------------------------------|------------|
|                 | Температура, °С                      | Время выдержки, ч | Среда охлаждения                          | Температура, °С   | Время выдержки, ч | Среда охлаждения |                                                |            |
| Сталь 25        | 880 ±10                              | —                 | Воздух                                    | 600...650         | —                 | Воздух           | —                                              | —          |
| Сталь 45        | 840 ± 10                             |                   | Масло или вода при температуре 40...60 °С | 580 ± 30          |                   | Воздух или вода  | 207...255                                      |            |
| 38ХА, 40Х       | 850 ± 10                             |                   |                                           | 570 ± 30          |                   | Вода или масло   | 255...302                                      |            |
|                 |                                      |                   | 680 ± 20                                  | Воздух            |                   | 149...241        |                                                |            |
| 18Х2Н4МА        | 860 ± 10                             |                   | 570 ± 30                                  |                   |                   | 285...341        |                                                |            |
| 12Х2Н4А         | —                                    |                   | 680 ± 20                                  |                   |                   | 197...269        |                                                |            |
| 40ХН2МА         | 850 ± 10                             | —                 | Масло                                     | 560 ± 30          | —                 | Воздух или вода  | 187...255                                      |            |
| 12Х13           | 950 ± 10                             |                   |                                           | 302...375         |                   |                  |                                                |            |
|                 |                                      |                   | 179...223                                 | 207...285         |                   |                  | Для деталей третьей и четвертой групп контроля |            |

Продолжение табл. 15.2

|                                       |                                 |   |                        |          |           |        |           |                                                                                                                      |
|---------------------------------------|---------------------------------|---|------------------------|----------|-----------|--------|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 14X17H2 (ЭИ 268)                      | 990 ± 10                        |   | Масло                  | 650 ± 30 | —         | Вода   | 255...302 | При со-<br>вмещении<br>закалки с<br>рихтовкой<br>темпера-<br>тура на-<br>грева под<br>закалку<br>(1030 ±<br>± 10) °С |
|                                       |                                 |   |                        | 570 ± 30 |           |        | 285...341 |                                                                                                                      |
| 15X16H2AM-Ш<br>(ЭП 479-Ш)             | 1040 ± 10                       | — | Масло<br>или<br>воздух | 650 ± 20 |           |        | 255...302 | —                                                                                                                    |
|                                       |                                 |   |                        |          |           |        | 285...341 |                                                                                                                      |
| 08X15H24B4T-ИД<br>(ЭП 164-ИД)         | —                               |   | —                      | 750 ± 10 | 16...17   |        | 207...285 | Детали<br>третьей<br>группы<br>контроля                                                                              |
|                                       |                                 |   |                        |          |           |        |           |                                                                                                                      |
| 13X11H2B2MФ<br>(ЭИ 961-Ш)             | 950 ± 10                        |   | Масло<br>или<br>воздух | 600 ± 20 | —         | Воздух | 293...363 | —                                                                                                                    |
|                                       |                                 |   |                        | 680 ± 30 |           |        | 269...321 |                                                                                                                      |
|                                       |                                 |   |                        | 740 ± 10 |           |        | 229...285 |                                                                                                                      |
| 16X20K6H2MВФ<br>(ВН С22-Ш,<br>ЭП 768) | 1060 ± 10                       | 2 | Масло                  | 630 ± 10 | 3,0...3,5 |        | 302...375 | Детали из<br>листового<br>материала                                                                                  |
|                                       | Обработка<br>холодом<br>при –70 |   | Воздух                 | 590 ± 10 |           |        |           |                                                                                                                      |
|                                       | 1050 ± 20                       |   | Вода                   | —        |           |        |           |                                                                                                                      |
| 12X18H9T                              | 1050 ± 20                       | — | Вода                   | —        |           |        |           |                                                                                                                      |

Продолжение табл. 15.2

| Марка материала                          | Закалка (аустенизация, нормализация) |                   |                  | Отпуск (старение) |                   |                  | Твердость<br>НВ         | Примечания                                                                      |
|------------------------------------------|--------------------------------------|-------------------|------------------|-------------------|-------------------|------------------|-------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
|                                          | Температура, °С                      | Время выдержки, ч | Среда охлаждения | Температура, °С   | Время выдержки, ч | Среда охлаждения |                         |                                                                                 |
| ХН60ВТ-ВД<br>(ВЖ 98-ВД,<br>ЭИ 868-ВД)    | 1060 ± 20                            | —                 | Воздух           | —                 | 3,0...3,5         | Воздух           | 302...375               | Детали из листового материала                                                   |
|                                          | 1110 ± 10                            |                   | Вода             |                   |                   |                  |                         |                                                                                 |
| ХН60МЮВТ-ВД<br>(ЭП 539-ВД)               | 1210 ± 10                            | 2...2,5           | Воздух           | 800 ± 10          | 16...17           |                  | 269...341               | —                                                                               |
|                                          | 1050 ± 10                            | 4...4,5           |                  |                   |                   |                  |                         |                                                                                 |
| ХН67МВТЮ-ВД<br>(ЭИ 445Р-ВД<br>ЭП 202-ВД) | 1100 ± 10                            | —                 |                  |                   |                   |                  |                         |                                                                                 |
|                                          | 1090 ± 10                            | 2...2,5           |                  |                   |                   |                  |                         |                                                                                 |
| ХН70ВМТЮ-ВД<br>(ЭИ 617-ВД)               | 1050 ± 10                            | 4...4,5           |                  | 800 ± 10          | 16...17           | Воздух           | 269...341;<br>3,7...3,3 | Для деталей, работающих при температуре < 700 °С, первая закалка не выполняется |
|                                          |                                      |                   |                  |                   |                   |                  |                         |                                                                                 |
| ХН75МБТЮ-ВД<br>(ЭИ 602-ВД)               | 1060 ± 10                            | —                 |                  | —                 |                   |                  |                         | Штамповки листовые                                                              |

Окончание табл. 15.2

|                                                                  |                             |         |        |                                                                           |           |        |                         |                                                                                                                      |
|------------------------------------------------------------------|-----------------------------|---------|--------|---------------------------------------------------------------------------|-----------|--------|-------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 10X11N23T3MP-ВД;<br>10X12N22T3MP-ВД<br>(ЭИ 696М-ВД,<br>ЭП 33-ВД) | Отжиг<br>при<br>850 ± 10    | 2...2,5 | Воздух | —                                                                         | 16...17   | Воздух | 269...341;<br>3,7...3,3 | —                                                                                                                    |
|                                                                  | Закалка<br>при<br>1000 ± 10 | —       | Масло  | Старе-<br>ние пер-<br>вое при<br>750 ± 10;<br>старение<br>при<br>650 ± 10 | 16...16,5 |        | 302...388;<br>3,5...3,1 | Для дета-<br>лей, рабо-<br>тающих<br>при тем-<br>пературе<br>≤ 400 °С,<br>операция<br>закалки<br>не выпол-<br>няется |

### **15.8. ТЕРМООБРАБОТКА ПОКОВОК И ШТАМПОВОК ИЗ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ**

Поковки и штамповки из никелевых сплавов после горячей пластической деформации необходимо подвергать термической обработке для снятия внутренних напряжений и уменьшения твердости с целью улучшения последующей обрабатываемости резанием. Термообработка никелевых сплавов после горячей пластической обработки отличается от термической обработки сталей, подвергаемых отпуску. Штамповки и поковки из никелевых сплавов после горячей пластической деформации, как правило, закаливают или выполняют их двойную закалку. В табл. 15.1 и 15.2 приведены режимы термообработки поковок и штамповок из никелевых сплавов. Но в некоторых случаях после горячей деформации осуществляют и полную термообработку, состоящую из закалки и последующего старения.

### **15.9. ТЕРМООБРАБОТКА ПОКОВОК И ШТАМПОВОК ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ**

Титановые сплавы в процессе горячей штамповки сильно упрочняются, что связано с особенностью их строения и фазовым составом. Поэтому поковки и штамповки из титановых сплавов подвергают отжигу или неполному отжигу. Температура отжига титановых сплавов лежит выше температуры рекристаллизации, но ниже точки  $A_{c3}$ . Охлаждение после отжига может быть непрерывным на воздухе или ступенчатым путем переноса в печь с низкой температурой.

Изотермический отжиг штамповок выполняют при температурах на 20...160 °C ниже температуры полиморфного превращения, далее охлаждают вместе с печью или переносят в печь с температурой на 300...450 °C ниже точки  $A_{c3}$ , выдерживают при этой температуре и далее производят охлаждение на воздухе. Неполный отжиг осуществляют при температурах ниже температуры отжига для снятия напряжений после пластической деформации и механической обработки. В табл. 15.1 и 15.2 приведены режимы термообработки поковок и штамповок.

### **15.10. ТЕРМООБРАБОТКА ПОКОВОК И ШТАМПОВОК ИЗ ЦВЕТНЫХ СПЛАВОВ**

Поковки и штамповки из сплавов на основе алюминия и сплавов на основе магния, как правило, подвергают полной термообработке. Режимы термообработки важнейших из этих сплавов приведены в табл. 15.1 и 15.2.

## Глава 16

# НАНОТЕХНОЛОГИЯ И ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

---

---

### 16.1. ВВЕДЕНИЕ

Слова с приставкой нано-: нанотехнология, наномир, нанонаука, нанотехника, наноматериалы и т.п. — стремительно вошли в лексикон не только специалистов различного профиля, но и журналистов, политиков, предпринимателей и т.д. Это обусловлено взрывообразным развитием наносферы в деятельности человека и громадным значением ее для настоящего и будущего.

Целью этой главы является стремление в очень сжатом виде ознакомить читателя с некоторыми конкретными примерами осуществления нанотехнологических подходов в области обработки материалов давлением и преимуществ их использования на практике. При этом, не являясь специалистами в области нанотехнологии, авторы взяли за основу монографию Ю.И. Головина "Введение в нанотехнику" [31], фрагментарно приводя достижения нанотехники в области обработки материалов давлением в общедоступной форме.

В настоящее время общепризнано, что номинально наномир представлен объектами и структурами, характерные размеры которых измеряются нанометрами ( $1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м} = 10^{-6} \text{ мм} = 10^{-3} \text{ мкм}$ ). Сама десятичная приставка **нано-** происходит от греческого слова *nanob* — **карлик** и означает одну миллиардную часть чего-либо. Реально наиболее ярко специфика нанообъектов проявляется в области характерных размеров — от атомных ( $\sim 0,1 \text{ нм}$ ) до нескольких десятков нанометров. В этой области все свойства материалов и изделий (физико-механические, тепловые, электрические, магнитные, оптические, химические и др.) могут радикально отличаться от макроскопических.

Отнесение того или иного объекта к наномасштабным весьма условно. Нанообласти в структурной пирамиде можно выделить практически в любом объемном, пленочном или волокнистом объекте (границы зерен, ядра дислокаций и т.п. в кристаллах; области упорядоченных молекул в полимерах и т.д.). В качестве разумного критерия принадлежности объекта к наноструктурным, очевидно, можно принять высокую степень влияния на свойства объекта именно наноразмерных элементов его реальной структуры. Принято, что "нановладения" занимают промежуточную область между миром отдельных атомов, управляемых квантовой механикой, и макромиром, хорошо описываемым различными теориями (упругости, гидро- и электродинамики и т.п.).

С технико-экономической точки зрения основные побудительные мотивы развития нанотехнологий в области обработки материалов давлением состоят в том, что с их помощью можно:

- радикально изменять свойства традиционных материалов, не меняя их химического состава (появляется возможность заменить дорогие легированные стали бо-

лее дешевыми рядовыми марками сталей, структура и свойства которых после обработки по нанотехнологиям не уступают легированным);

– снижать материало-, энерго- и трудоемкость, а также стоимость продукции, одновременно резко уменьшая загрязнение окружающей среды отходами производства (например, сверхпластическое течение, привлекательное для обработки материалов давлением, может осуществляться при более низкой температуре и с тем большей скоростью, чем мельче зерно).

До настоящего времени человек не раз сталкивался и стихийно использовал объекты и процессы, принадлежащие наномиру, не подозревая об этом и не выделяя их. Например, упрочняющее действие сильной пластической деформации (особенно в холодном состоянии), сопровождающееся дроблением кристаллической структуры, известно несколько веков. Интуитивно ее применяли для упрочнения режущего холодного оружия, орудий труда, ответственных деталей машин и т.п. Масштабным примером "интуитивной" нанотехнологии являются биохимические реакции между макромолекулами, составляющие основу всей жизнедеятельности биосферы и человека как ее части.

Бродильные процессы при изготовлении хлеба, сыра, вина и т.д. в присутствии катализаторов (ферментов, имеющих наноразмеры), получение фотографических изображений путем фотохимических реакций в наночастицах серебра, изготовление зеркал и многое другое – лишь небольшая часть применения "природной" нанотехнологии.

Современное производство технической продукции очень неэффективно в сравнении с природными процессами как по доле полезно используемой массы первичного сырья, так и по затратам энергии. В конечный потребительский продукт превращается ~1,5 % процента добываемого сырья [31], а доля полезно используемой энергии (по сравнению с теоретически необходимой на химические, структурные превращения, формоизменения элементов в конечный продукт) и того меньше. Природа же широко использует безотходную сборку и самосборку очень сложных биологических систем из простых молекул, замыкает "производственные" потоки и цепи, в которых отходы одного цикла становятся сырьем для другого, и т.д.

При этом законы физики не препятствуют получению изделий методом поатомной (или помолекулярной) сборки, а, скорее, провоцируют это и помогают этому. В пределе сказанное выливается в новый подход ко всему, что делает современная промышленность. Например, вместо получения готовых деталей, изделий из крупных заготовок путем отделения ненужных частей (например, точение болта из прутковой заготовки) появляется возможность получения детали или изделия (например, того же болта) посредством безотходной сборки из элементарных "кирпичиков" природы – атомов и молекул. Разумеется, в настоящее время это всего лишь броский лозунг, призванный обозначить новый характерный подход к массовым производствам, основанным на промышленных нанотехнологиях.

Нанопродукция обладает множеством очевидных и скрытых достоинств (например, крайне низкими материало- и энергоемкостью производства в расчете на одно готовое изделие, снижением сырьевой зависимости и транспортных расходов, экологической чистотой нанотехнологий и т.д.). В связи с этим передовые страны в течение последних десятилетий планомерно перестраивают экономику на инновационные рельсы, где успех определяют фундаментальные знания и высокие технологии. В последнее время эта работа начата и в России.



При этом разработка и производство нанопродукции требуют высококачественного естественно-научного образования, способного поднять интеллектуальный потенциал общества в целом. Нанореволюция ускорит переход к постиндустриальному этапу развития общества и сделает экономику инновационной по преимуществу, т.е. основанной на знаниях и высоких технологиях, а не на эксплуатации природных ресурсов или крупнотоннажном производстве, наносящем значительный ущерб окружающей среде, как в индустриальном обществе. Для жителей современной России актуален вопрос: станут ли россияне только потребителями благ нанореволюции или еще и созидателями, разработчиками, т.е. будут ли они лишь платить за нанопродукцию, ввезенную из-за рубежа, или зарабатывать на нанотехнологиях.

## **16.2. СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ ОБЪЕМНЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ НАНОСТРУКТУРНЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДАМИ ИХ ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ**

Основными характеристиками конструкционных материалов являются: модуль Юнга<sup>1</sup>, предел текучести, предел прочности, износостойкость, вязкость разрушения. В отличие от модуля Юнга, который мало зависит от структуры материала, все остальные характеристики структурочувствительны, т.е. могут управляться целенаправленным изменением структуры, в частности изменением номенклатуры и концентрации структурных дефектов, размером зерен, ячеек и других субструктурных единиц.

Типовая обобщенная зависимость прочностных показателей от концентрации структурных дефектов материалов приведена на рис. 16.1.

Основная задача конструкционных материалов — выдерживать механическую нагрузку в течение определенного времени при заданных условиях эксплуатации, удовлетворять требованиям минимизации массы конструкции, ее функциональности, надежности, экономичности.

Зависимость имеет вид кривой с минимумом в области, где располагается большинство традиционных конструкционных материалов (сталей, чугунов, алюминиевых сплавов и т.д.). Из этого следует, что для улучшения физико-механических характеристик можно использовать обе восходящие ветви этой зависимости, т.е. или резко уменьшать число атомных дефектов в решетке, приближаясь к идеальному порядку (усы, монокристаллы), или, напротив, увеличивать их число, стремясь к нанокристаллическому (старые названия: "субмикронному", ультрадисперсному) или аморфному состоянию материала (металлические стекла).

Обычно повышение пределов прочности и текучести приводит к охрупчиванию материала, или, иначе, снижению величины деформации до разрушения. Поэтому основная задача создания нового материала — обеспечение одновременно высоких характеристик прочности и высокого сопротивления трещинообразованию.

Наноструктурные материалы как раз и могут обеспечить оптимальное сочетание этих свойств, причем положительный эффект достигается не введением дорогостоящих легирующих компонентов, а только путем изменения структуры.

---

<sup>1</sup> Коэффициент пропорциональности  $E$  в законе Гука  $\sigma = E \varepsilon$  — характеризует жесткость материала.

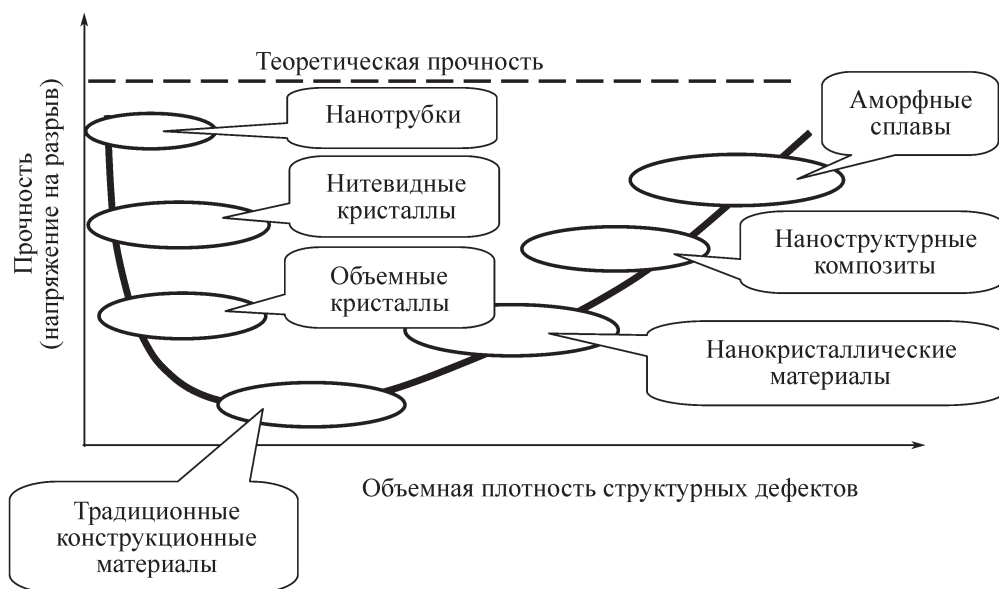


**Рис. 16.1.** Схематическая зависимость прочности материалов от концентрации атомных дефектов, показывающая два принципиально возможных направления повышения прочностных характеристик: путем уменьшения и посредством увеличения дефектов структуры материалов

Существует несколько принципиально отличающихся подходов к созданию объемных наноматериалов: компактирование порошков, интенсивная пластическая деформация, контролируемая кристаллизация аморфных сплавов и ряд других. Здесь рассматриваются лишь два первых направления.

### 16.3. КОМПАКТИРОВАНИЕ НАНОПОРОШКОВ ПРЕССОВАНИЕМ

Эти процессы получили значительное распространение ввиду своей универсальности и сравнительной простоты исполнения. Давление, прикладываемое к прессуемому нанопорошку, может быть приложено в статическом, динамическом или импульсном режиме. Применяют как одноосное, так и всестороннее сжатие при комнатной или повышенной температуре, прокатку в оболочке или без нее, экструзию и другие методы (рис. 16.2).

Названные процессы позволяют получать самые разные одно-, двух- и многофазные материалы. Основной недостаток — высокая остаточная пористость, которая снижает модуль Юнга, предел текучести и другие механические свойства материала.

Разработано несколько способов, дающих возможность уменьшить пористость (среди них повышение температуры, увеличение длительности прессования, привлечение магнитоимпульсных, электротоковых и других эффектов). Дополнительным спеканием при высокой температуре удастся довести плотность до 98...99 % от

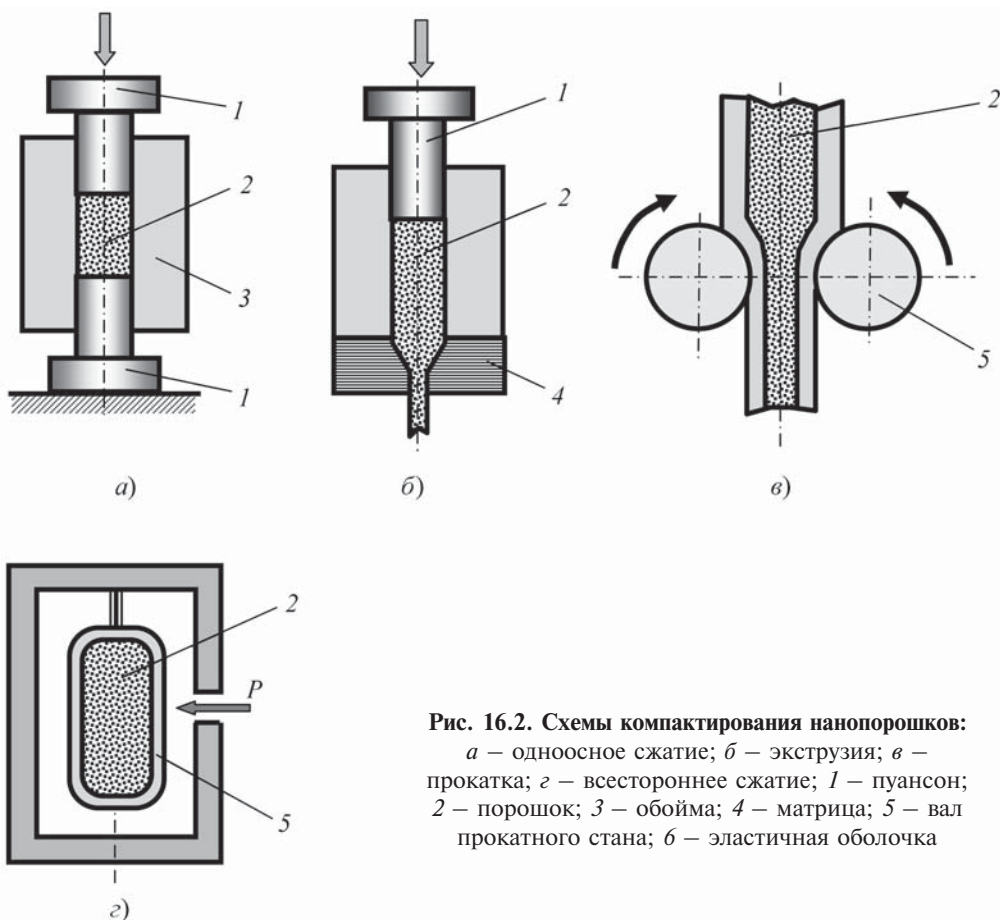


**Рис. 16.2. Схемы компактирования нанопорошков:**

*a* — одноосное сжатие; *б* — экструзия; *в* — прокатка; *г* — всестороннее сжатие; *1* — пуансон; *2* — порошок; *3* — обойма; *4* — матрица; *5* — вал прокатного стана; *б* — эластичная оболочка

теоретической для данного материала, но обычно — ценой существенного увеличения размеров зерна.

Практически полностью исключить пористость в процессе приготовления нанокристаллических материалов с размером зерен в несколько десятков — сотен нанометров позволяют методы интенсивной пластической деформации.

#### 16.4. МЕТОДЫ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Целенаправленно структуры материала, образующиеся в результате интенсивной пластической деформации (ИПД) при волочении проволоки через фильеру, начали изучать в 60-е гг. прошлого века, хотя сам процесс применялся для получения высокопрочной рояльной проволоки (струн) за много десятилетий до этого.

В настоящее время разработано несколько процессов обработки металлов давлением для получения однородной нанокристаллической структуры: кручение под квазигидростатическим давлением или одноосным сжатием (рис. 16.3, *a*); прессование через матрицу с винтообразным рабочим каналом (рис. 16.3, *б*); экструзия через

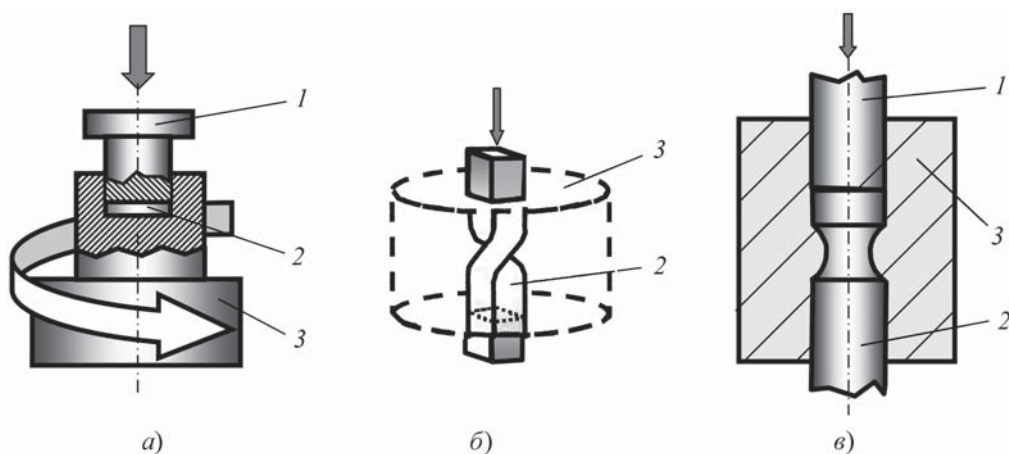


**Рис. 16.3. Схемы интенсивной пластической деформации:**

*a* — кручение под давлением; *б* — прессование через матрицу с винтообразным рабочим каналом; *в* — экструзия через матрицу; 1 — пуансон; 2 — обрабатываемый материал; 3 — матрица

матрицу (рис. 16.3, *в*); всесторонняя ковка (рис. 16.4, *а*), равноканальное угловое прессование (РКУ) (рис. 16.4, *б*) и его модификации: РКУП-ПК — прессование в параллельных каналах (рис. 16.4, *в*) [32]; РКУП-ПМ — прессование в подвижных матрицах (рис. 16.5).

Последние методы реализуются путем деформации заготовки простым сдвигом, когда она проходит через зону сопряжения каналов равного поперечного сечения, выполненных в специальной штамповой оснастке и расположенных под углом до  $90^\circ$ .

Такая геометрия рабочего канала позволяет многократно (с поворотом вокруг оси) деформировать заготовку, интенсифицируя процесс измельчения зерен. При этом чистые металлы за несколько проходов (обычно до 7–10) приобретают нанокристаллическую структуру с размером зерен 200...300 нм, а сплавы — с размером зерен  $< 100$  нм.

Данные методы позволяют сформировать беспористые заготовки диаметром в несколько десятков миллиметров и длиной  $\sim 1$  м.

В дополнение к описанным выше методам разработаны процессы, позволяющие получить нанокристаллическую структуру материала в трубчатых заготовках [33]. Пример такого процесса приведен на рис. 16.6. Его суть заключается в том, что трубную заготовку 1 (рис. 16.6, *а*) герметизируют осевыми пуансонами 2 и 3, в одном из которых выполнено осевое отверстие, гидравлически связанное с источником высокого давления. На торцы заготовки накладывают деформирующие нагрузки  $Q$ , а в полости заготовки создают высокое гидростатическое давление  $q$  наполнителя (рис. 16.6, *б*). Затем сообщают синхронное перемещение навстречу друг другу осевым пуансонам 2 и 3, а подвижную матрицу 5 перемещают вниз со скоростью, например, равной скорости осевых пуансонов. Под действием высокого давления наполнителя  $q$  в полости заготовки, сил  $P$  и  $Q$ , налагаемых на заготовку осевыми

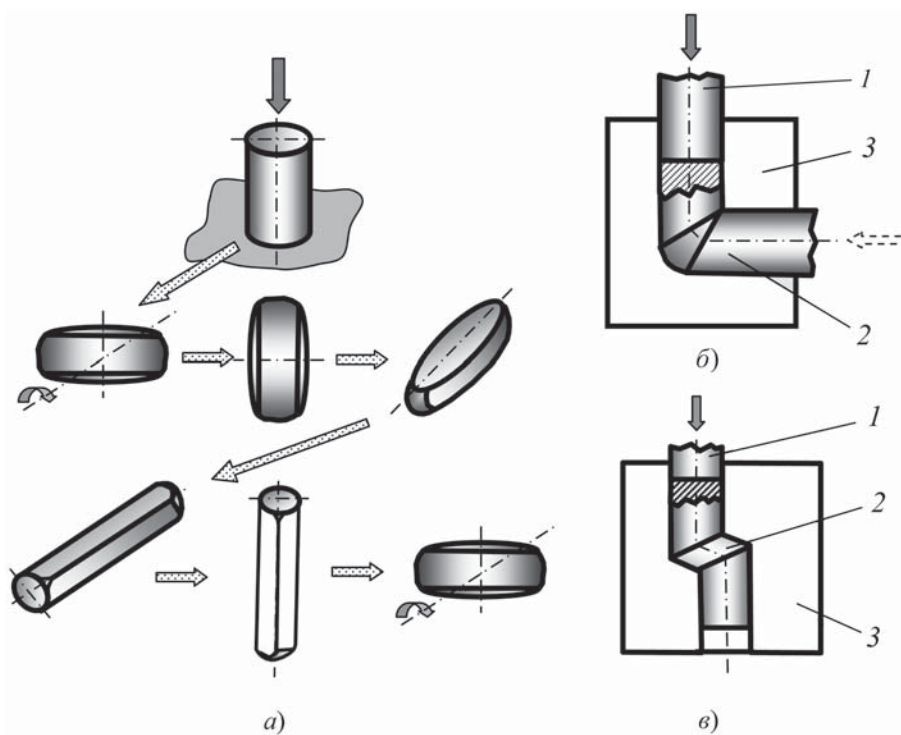


**Рис. 16.4. Схемы интенсивной пластической деформации:**

*a* – технологическая последовательность обработки материала ковкой; *б* – равноканальное угловое прессование (РКУП); *в* – равноканальное угловое прессование в параллельных каналах РКУП-ПК; 1 – пуансон; 2 – обрабатываемый материал; 3 – матрица

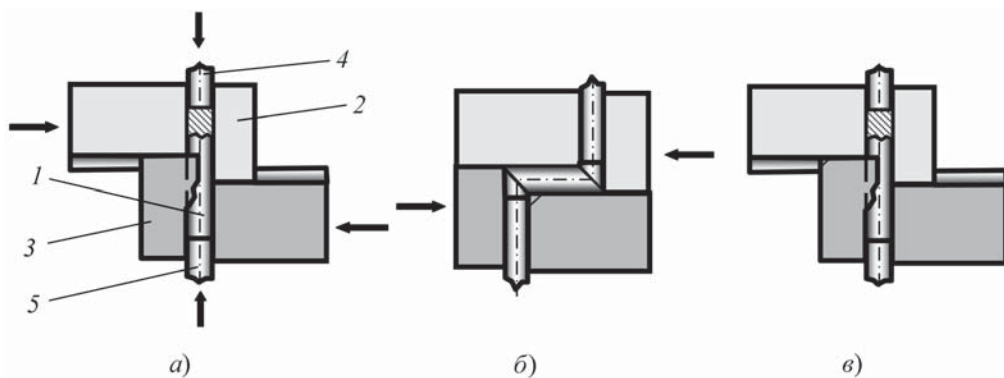


**Рис. 16.5. Схема интенсивной пластической деформации в подвижных матрицах (РКУП-ПМ) [34]:**

*a* – исходное положение; *б, в* – соответственно начало и конец четного этапа обработки материала заготовки; 1 – заготовка; 2, 3 – полуматрицы; 4, 5 – пуансоны

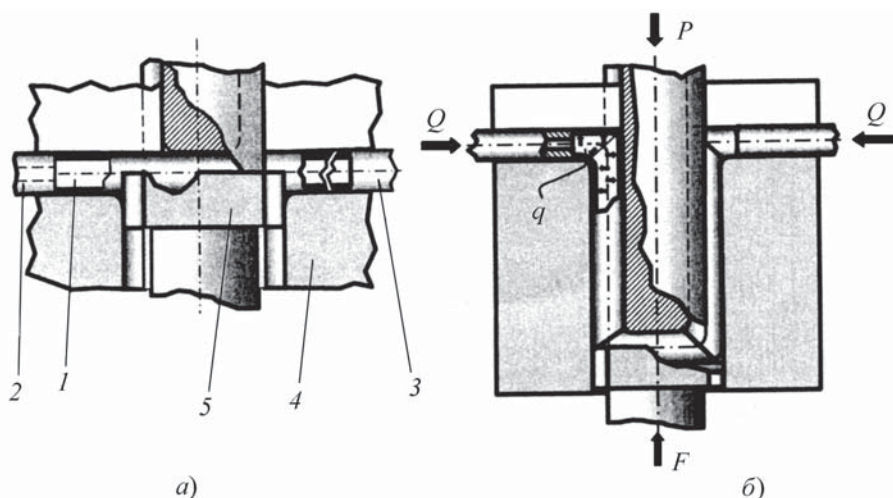


**Рис. 16.6. Схема наноструктурирования материала трубных заготовок:**  
 а – исходное положение; б – деформированное положение; 1 – трубная заготовка;  
 2, 3 – осевые пуансоны; 4 – неподвижная матрица; 5 – подвижная матрица

пуансонами и подвижной матрицей, трубная заготовка деформируются в  $\sqsubset$ -образный полуфабрикат (рис. 16.7).

В процессе формоизменения заготовки материал в ее коленных зонах деформируется преимущественно вследствие деформации сдвига, интенсифицируя процесс измельчения структуры материала заготовки, расположенного в вертикальных межколенных зонах  $\sqsubset$ -образного полуфабриката.

Измельчение структуры материала полуфабриката может быть продолжено путем реверса направления перемещения подвижной матрицы при сохранении в полости заготовки давления наполнителя и синхронного перемещения осевых пуансонов друг от друга. При этом  $\sqsubset$ -образный полуфабрикат приобретает вновь прямолинейную форму, идентичную форме исходной заготовки. В дальнейшем процесс дробления кристаллической структуры заготовки может быть продолжен по двум вариантам.

По первому варианту прямолинейный полуфабрикат вновь формоизмеряют в  $\sqsubset$ -образный полуфабрикат по описанный ранее схеме с последующим реверсом

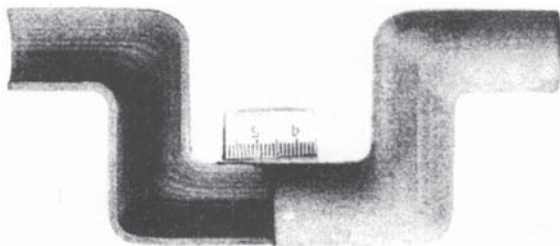


**Рис. 16.7.  $\sqsubset$ -образный полуфабрикат после нечетного этапа деформирования трубной заготовки (материал – Ст 3; диаметр заготовки 20 мм; толщина стенки 2 мм; радиус вогнутой поверхности колен 5 мм)**

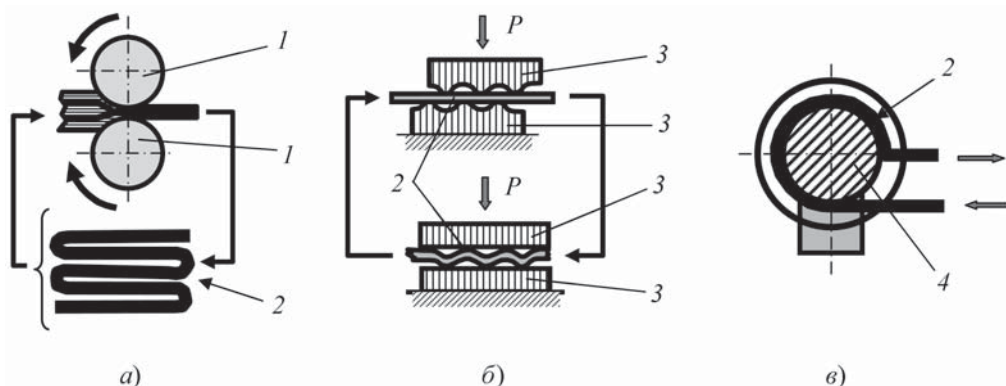


**Рис. 16.8. Схемы интенсивной пластической деформации:**

*а* – многократная прокатка, аккумулирующая деформацию; *б* – многократное гофрирование-распрямление; *в* – схема процесса РКУП "Конформ"; 1 – ролики; 2 – обрабатываемый материал; 3 – матрицы; 4 – вращающийся вал, окруженный неподвижным желобом, по которому силами трения перемещается заготовка

исполнительных механизмов устройства и получением вновь прямолинейного полуфабриката.

По второму варианту полученный прямолинейный полуфабрикат деформируют в  $\sqsubset$ -образный, являющийся зеркальным отражением  $\sqsubset$ -образного полуфабриката, полученного в результате первого цикла деформирования трубной заготовки с последующим реверсом работы устройства (отличающегося от схемы, приведенной на рис. 16.6) и получением вновь прямолинейного полуфабриката. Этот вариант позволяет вовлечь в процесс структурообразования дополнительные плоскости скольжения материала заготовки.

Дополнительно, управляя соотношением скоростей перемещения осевых пуансонов и подвижной матрицы, удастся в процессе формоизменения заготовки управлять схемой напряженного состояния материала в очагах пластической деформации, расположенных в коленных зонах  $\sqsubset$ -образного полуфабриката, управляя тем самым и процессом структурообразования материала заготовки.

Длинномерные заготовки получают непрерывными методами: многократной прокаткой, многократным гофрированием или привлечением метода РКУП "Конформ" [35] (рис. 16.8).

Для упрочняющей обработки поверхностных слоев деталей применяется также множество схем реализации, обеспечивающих получение нанокристаллической структуры в приповерхностных слоях. Некоторые из них приведены на рис. 16.9.

Как отмечалось, основной задачей ИПД является измельчение зерен до субмикронного размера. Однако не меньшее значение, чем размер зерна, имеет и структура образующихся границ между зернами. К преимуществам приведенных схем относится возможность в отличие от поликристаллических структур получать межзеренные границы с большими углами разориентировки, доля которых достигает до 70...80 %. Как сейчас установлено, такая форма границ играет решающую роль в



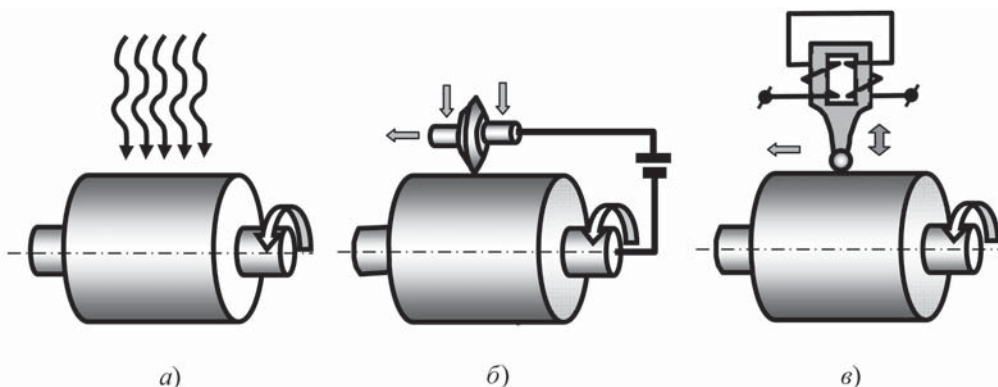


**Рис. 16.9. Схемы ИПД (упрочнения) поверхностных слоев:**

*а* — упрочнение различными видами облучения и плазменного воздействия; *б* — обкатка с пропусканием тока в зоне контакта ролика и детали; *в* — обкатка с ультразвуковым воздействием

упрочнении материала, она же облегчает зернограницное проскальзывание, увеличивая тем самым ресурс пластичности материала.

Структура межзеренных границ после ИПД при температуре  $T < 0,3$  от точки плавления отличается высокой неравномерностью, которую усиливают значительные напряжения в зернах и по их границам. Электронная микроскопия фиксирует сильную размытость, волнистость и складчатость границ, свидетельствуя о присутствии большого числа атомных дефектов внутри них. Однако низкотемпературный отжиг (при  $T = 200...300$  °С, например, для титана) обеспечивает упорядочение границ и уменьшение их толщины.

По данным российских исследователей [35], ИПД в титане технической чистоты достигнут предел текучести 1,1 ГПа, а предел прочности 1,25 ГПа при приемлемой деформации до разрушения, равной 14 %. Одновременно наблюдается почти двукратное увеличение предела выносливости (с 230 до 450 МПа).

В табл. 16.1 приведены механические свойства титановых сплавов в зависимости от их структурного состояния [36].

Область наноматериалов представляет значительный интерес для технологов, работающих в области деформирования материалов в сверхпластическом состоянии. Управление структурой границ и оптимизация их строения позволяют существенно снизить температуру, при которой наблюдается эффект сверхпластичности, и существенно увеличить скорость деформирования.

В настоящее время наноматериалы производятся на лабораторных установках (в лучшем случае на опытно-промышленных), себестоимость их производства велика, а спрос ограничен. По мере совершенствования технологии и роста объемов производства цена наноматериалов будет падать, а потребление расти. Наблюдаемые сейчас повсеместное повышение стоимости сырья и энергии, ужесточение эко-



**16.1. Изменение свойств титановых сплавов в результате наноструктурирования**

| Материал                             | $\sigma_{\text{в}}$ , МПа | $\sigma_{0,2}$ , МПа | $\delta$ , % | $\sigma_{-1}$ , МПа | Число циклов до разрушения $N$ |
|--------------------------------------|---------------------------|----------------------|--------------|---------------------|--------------------------------|
| BT1-0, крупнозернистый               | 436                       | 360                  | 25           | 300                 | $2,5 \cdot 10^5$               |
| BT1-0, субмикрокристаллические зерна | 840                       | 760                  | 15           | 520                 | $> 1 \cdot 10^6$               |
| BT1-0, нанокомпозит                  | 1100                      | 850                  | 10           | 600                 | $> 2 \cdot 10^6$               |
| BT6, крупнозернистый                 | 970                       | 900                  | 20           | 550                 | —                              |
| BT6, нанокомпозит                    | 1400                      | 1380                 | 10           | 750                 |                                |

Условия обработки: равноканальное угловое прессование, 13 проходов с последующими осадкой ( $\varepsilon = 55\%$ ) и отжигом при  $500^\circ\text{C}$ .

логических требований делает традиционные материалы, используемые в промышленности, все менее конкурентоспособными по сравнению с наноматериалами.

## Глава 17

### ТЕХНИЧЕСКОЕ НОРМИРОВАНИЕ И ОПЛАТА ТРУДА

---

---

По методу установления принято различать два вида норм: обоснованные и опытные. На практике нормы затрат труда образуются либо путем разработки оптимального трудового процесса на основе детального анализа содержания нормируемой работы, либо суммарно, без анализа, базируясь на опыте нормировщика и статистических данных о фактических затратах труда на аналогичные работы в прошедшие периоды.

Аналитический метод позволяет установить технически обоснованные нормы, использование которых способствует росту производительности труда. Суммарный метод, который приводит к образованию так называемых опытно-статистических норм, не нацеливает на выявление и использование резервов и совершенствование организации труда.

Определение норм времени на каждую единицу работы (операцию) аналитическим методом является прогрессивным методом нормирования труда.

Аналитический метод нормирования труда имеет две разновидности: аналитически-расчетный и аналитически-исследовательский. При установлении нормы аналитически-расчетным методом необходимые затраты времени определяются по заранее образованным нормам и берутся из отраслевых справочников по нормированию труда. Под нормативом понимаются регламентированные затраты труда на выполнение единицы объема работ с учетом прогрессивных организационно-технических условий их осуществления.

Наиболее распространено укрупненное нормирование, когда для установления требуемой численности работников на выполнение определенного объема работ используют нормативы либо численности, либо трудоемкости.

Дифференцированное нормирование труда позволяет определять необходимые затраты рабочего времени на проведение конкретных операций или других единиц работы. С этой целью исходят из нормативов времени и норм режимов работы оборудования.

Аналитически-исследовательский метод нормирования основан на изучении и анализе выполняемых работ и затрат времени непосредственно на рабочих местах. Его применяют при отсутствии соответствующих нормативов, а также для уточнения, пересмотра и подтверждения норм, рассчитанных на основе нормативных материалов. Этот метод характеризуется проведением исследования фактических затрат времени на нормируемые работы с целью их минимизации путем хронометража, фотографий рабочего времени, построением рациональных балансов рабочего времени.

К нормам затрат труда предъявляются следующие требования: напряженность, прогрессивность, реальность и однородность по напряженности. Качество устанавливаемых норм во многом определяется качеством исходных нормативных данных. Если эти данные (нормы) устарели, то по ним нельзя установить прогрессивные нормы затрат труда.

Нормативные материалы разрабатываются для многократного использования при определении норм затрат труда применительно к различным вариантам типовых организационно-технических условий выполнения работы. Они действуют без изменения длительное время.

В отличие от нормативных материалов нормы затрат труда устанавливаются для одной конкретной операции, работы и применительно к конкретным организационно-техническим условиям осуществления работы на данном предприятии или конкретном рабочем месте. Нормы систематически должны пересматриваться в связи с изменением организационно-технических условий труда и по мере накопления исполнителями навыков.

**Нормирование труда.** При установлении норм времени на работы по изготовлению продукции используются нормативы времени и режимов обработки. Нормативы дают возможность определить норму времени с высокой точностью (до 5 %) только при расчленении процесса работы на элементы. Укрупненные нормы времени позволяют определить время сразу на переход или операцию целиком, но с меньшей точностью (до 20 %).

Норма времени состоит из штучного и подготовительно-заключительного времени. Штучное время содержит затраты времени, рассчитанные на единицу выполняемой работы; подготовительно-заключительное время – на комплекс действий, связанных с определенной партией осуществляемой работы, и рассчитывается на всю партию.

Штучное время складывается из следующих составляющих:

$$t_{\text{шт}} = t_o + t_b + t_{\text{т.о}} + t_{\text{о.о}} + t_{\text{п.л}} + t_{\text{от.л}}, \quad (17.1)$$

где  $t_o$  – основное время, затрачиваемое непосредственно на изменение предмета труда (технологическое время);  $t_b$  – неперекрываемая часть вспомогательного времени, которая уходит на действия, обеспечивающие выполнение основных элементов операции;  $t_{\text{т.о}}$  – время на техническое обслуживание: смену изношенного инструмента, регулирование и переналадку пресса, связанную со сменой инструмента, и т.д.;  $t_{\text{о.о}}$  – время на организационное обслуживание, затрачиваемое преимущественно на уход за рабочим местом;  $t_{\text{п.л}}$  – время неустраимых перерывов, предусмотренных технологией и организацией производственного процесса;  $t_{\text{от.л}}$  – время на отдых и личные потребности.

Основное и вспомогательное время в сумме составляют оперативное время работы  $t_{\text{оп}}$ . Оно рассчитывается в минутах или часах по нормативам. Остальные элементы штучного времени определяются в процентах к оперативному времени

$$t_{\text{шт}} = t_{\text{оп}} (1 + \alpha / 100), \quad (17.2)$$

где  $\alpha$  – время на обслуживание рабочего места, отдых и личные надобности и перерывы в процентах от оперативного времени.

При установлении нормы времени по элементным нормативам основное время определяют по переходам операций, исходя из режимов обработки, которые назначаются технологами по соответствующим нормативам с учетом возможностей используемого оборудования. Степень детализации нормирования основного и вспомогательного времени обуславливается типом производства.

При установлении нормы времени по указанным нормативам основное время находят расчетом не по режиму обработки, а по нормативу на единицу расчетной длины обрабатываемой поверхности или числу ударов. Вспомогательное время в таких нормативах указывается на переход и проход.

При бригадной организации и оплате труда должны рассчитываться два вида норм: нормы на операции (работы) и комплексные нормы, устанавливаемые на основании технически обоснованных норм и нормативов с учетом более полного рабочего времени, достигаемого посредством оптимальных взаимосвязей между рабочими в условиях коллективного труда.

Нормирование труда вспомогательных рабочих, осуществляющих функции обслуживания, проводится укрупненно. Оно заключается в установлении нормативной численности для выполнения определенных работ.

**Оплата труда.** Основным инструментом обеспечения единой государственной политики в области оплаты труда является Единая тарифная система, при помощи которой осуществляются дифференциация и регулирование заработной платы различных категорий работников в зависимости от квалификации, сложности, напряженности и специфики.

Тарифная система применяется для оплаты труда всех категорий работников. Она состоит из следующих взаимосвязанных частей: тарифных ставок, тарифных сеток и тарифных коэффициентов для рабочих и работ различной квалификации.

Существуют системы надбавок и доплат (районные коэффициенты, особые условия труда и т.д.), которые приплюсовываются к тарифным ставкам.

Наряду с тарифной системой оплаты труда важная роль в повышении эффективности принадлежит механизму материального стимулирования, включающему в себя систему премирования.

**Сдельная оплата труда.** Труд рабочих-сдельщиков более напряжен, поэтому тарифные ставки у рабочих-сдельщиков предусмотрены на 7 % выше, чем у рабочих-повременщиков.

Сдельная оплата труда является преобладающим видом оплаты труда рабочих. Она осуществляется по результатам труда в зависимости от количества сданной продукции или объема выполненной работы. Преобладает она в цехах основного производства, где большие возможности для нормирования, учета работы и увеличения ее объема на каждом рабочем месте.

**Повременная оплата труда.** Повременная форма оплаты труда применяется в сборочных, испытательных и вспомогательных цехах, а также в обслуживающих подразделениях. При повременной оплате труда учет затрат труда и его оплата осуществляются пропорционально отработанному времени. Имеются две формы: простая повременная и повременно-премиальная. Такой вид оплаты труда применяется на тех работах, которые трудно поддаются нормированию: на работах экспериментального характера, разработке и освоении новых технологий и новой техники. Повременно-премиальная система оплаты труда используется в опытном производстве (основном и вспомогательном), экспериментальных цехах и лабораториях.

## Глава 18

# ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ В КУЗНЕЧНО-ШТАМПОВОЧНЫХ ЦЕХАХ

---

---

Цеха металлургического производства относятся к цехам повышенной опасности. Основными опасными и вредными факторами в них являются: тепловое излучение; вибрации; шум; повышенные запыленность, загазованность, напряжение в электрических цепях, напряжение магнитного поля, пожаровзрываемость.

Требования к технике безопасности при работе на кузнечно-штамповочном оборудовании изложены в следующих основных документах: ПОТ РМ-003–97 (Правила по охране труда при выполнении кузнечно-прессовых работ), ГОСТ 12.3.026–81, ОСТ 1.42299.

### 18.1. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ

1. К выполнению технологических процессов кузнечно-прессовых участков допускаются лица не моложе 18 лет, успешно прошедшие предварительный медосмотр, профессиональное обучение и имеющие удостоверение о получении соответствующей профессии, а также прошедшие обучение и инструктаж по безопасности труда.

2. Повторный инструктаж по охране труда должен проводиться не реже одного раза в 3 мес.

3. Опасными и вредными производственными факторами при работе на кузнечно-прессовом оборудовании являются:

- повышенная температура поверхности нагревательного оборудования, заготовок, штамповок;
- подвижные части оборудования;
- физические перегрузки при транспортировании заготовок, деталей, оснастки;
- острые кромки, заусенцы и шероховатости на поверхности заготовок;
- повышенные напряжение в электрической цепи, уровень шума, уровень вибраций, уровень яркости и инфракрасной радиации при открытых рабочих зонах нагревательного оборудования, нагретых заготовок.

4. Средства индивидуальной защиты:

- костюм хлопчатобумажный с огнезащитной пропиткой (ГОСТ 12.4.045–87);
- ботинки кожаные с металлическими носками (ГОСТ 28507–90);
- рукавицы брезентовые (ГОСТ 12.4.010–75);
- защитные очки;
- защитная каска (ГОСТ 12.4.128–83);
- наушники противושумные (ТУ 400–28–127).

5. Контроль над соблюдением требований безопасности труда на участке возлагается на мастера участка или лицо, его замещающее согласно приказу.

6. Работник обязан соблюдать правила внутреннего трудового распорядка и техники безопасности.

## 18.2. ТРЕБОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПЕРЕД НАЧАЛОМ РАБОТЫ

1. Правильно надеть спецодежду: куртку поверх брюк, брюки поверх ботинок, ботинки должны быть с металлическими носками.

2. Проверить наличие и исправность индивидуальных средств защиты: защитных очков, защитной каски, наушников, брезентовых рукавиц.

3. Подготовить к работе необходимый инструмент: клещи, молоток, зубила, топоры, оправки и т.п. Убедиться в их исправности:

- зубила, топоры, оправки не должны иметь трещин и наклепа;
- рукоятки кувалд и молотков должны быть овального сечения, не иметь трещин;

- клещи должны быть изготовлены из стали, не воспринимающей закалку, а губки — иметь форму, соответствующую конфигурации заготовки. На внутренней поверхности ручек клещей должен быть упор, предупреждающий сдавливание пальцев руки. Неисправным инструментом пользоваться не разрешается;

- длина рукояток клещей, крючков и других инструментов должна быть достаточной, чтобы во время работы руки не подвергались тепловому воздействию и не находились в рабочей зоне молота, пресса. Инструмент должен иметь изолированные по длине захвата рукоятки;

- необходимо проверить наличие чистой воды в бочке для охлаждения инструмента.

4. Проверить, чтобы на рабочем месте не было грязи и каких-либо посторонних предметов, загромождающих площадь пола.

5. Проверить исправность молота, пресса:

- осмотреть воздухопровод, по манометру проверить давление воздуха в магистрали, убедиться в исправности болтовых соединений и клиновых креплений, проконтролировать плотность затяжки клиньев и исправность ограждений пусковой педали молота, пресса;

- прокачать бабу молота, медленно пуская ее в ход;

- многократным нажатием пускового устройства проверить исправность работы включающего механизма, контролировать, нет ли двоянных ударов или самопроизвольного опускания ползуна;

- проверить наличие у молота всех оградительных средств (с задней стороны и со стороны проходов; экранов, защищающих от действия нагревательных устройств, отлетающей окалины);

- проверить исправность защитного заземления оборудования;

- убедиться, что на подвижных частях молота или пресса, а также на неподвижных частях, расположенных сверху, нет каких-либо предметов, которые могут упасть при работе.

6. Обо всех недостатках и неисправностях оборудования, обнаруженных на рабочем месте, доложить мастеру для принятия мер по их устранению до начала работы.

Во время работы на кузнечно-прессовом оборудовании также необходимо соблюдать правила техники безопасности.

## 18.3. ТРЕБОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ВО ВРЕМЯ РАБОТЫ

1. Выполнять только ту работу, которая поручена администрацией подразделения.

2. При осуществлении работы не отвлекаться самому и не отвлекать других.
3. Запрещается присутствие на рабочем месте посторонних лиц.
4. Поддерживать надлежащий порядок на рабочем месте: инструмент, заготовки и поковки укладывать на отведенные места, не допуская загромождения рабочего места и проходов.
5. Не проводить осмотр, смазку и очистку при включенном оборудовании.
6. Использовать инструмент только по назначению.
7. При штамповке не держать клещи перед собой, а располагать их сбоку туловища.
8. Соблюдать температурный интервал штамповки, указанный в технологической карте. Штамповка перегретого или охлажденного ниже нормы металла запрещается.
9. Заготовки и поковки (штамповки) не должны иметь острых кромок и заусенцев размером, превышающим указанные на чертеже.
10. Располагать заготовку в ручье штампа строго в установленном месте, используя каждый ручей только по назначению.
11. При штамповке с предварительной осадкой заготовки в торец укладывать заготовку в центре осадочной площадки, располагая заготовку строго вертикально и так, чтобы сколы торцев были обращены в сторону к себе или от себя.
12. Предварительно складывать штамп в соответствии с технологическим процессом, предотвращая залипание штамповок и перегрев штампа.
13. При залипании детали в штампе прекратить работу и немедленно поставить в известность мастера.
14. Не штамповать случайных заготовок с размерами больше, чем расчетные, так как излишек металла, не вместившийся в ручей, может быть отсечен и выброшен наружу.
15. При выходе металла из облойной щели на зеркало штампа немедленно останавливать работу и поставить в известность мастера.
16. Ни при каких обстоятельствах не вводить руки в зону опускания бабы молота или ползуна пресса.
17. Окалину со штампа удалять только указанными в технологии средствами. Запрещается удалять окалину руками или рукавицами, сдувать сжатым воздухом, если нет приемного патрубка вытяжной вентиляции.
18. При удалении заготовки, застрявшей в ручье штампа, применять только приспособления, указанные в технологической карте. Помнить, что подкладывание в ручей штампа каких-либо предметов и удары по ним приводят к тяжелым травмам.
19. Во время укладки заготовки в штамп, при перемещении ее в ручей и снятии со штампа не держать ногу на педали.
20. Не допускать холостых ударов верхней части штампа о нижнюю.
21. Периодически проверять надежность крепления штампа в процессе работы. Заметив неисправность или ослабление клиньев, немедленно остановить молот или пресс.
22. Выбивку и забивку клиньев проводить только с помощью специально предназначенных для этого средств, соблюдая особую осторожность.
23. Забивку и выбивку клиньев посредством "сокола" выполнять под непосредственным наблюдением мастера.

24. Выбивку клиньев начинать с нижнего штампа. Если клин не выступает за тело штампа, то при выбивке клина использовать выколотки и начинать выбивку следующим образом: клещами взять выколотку, подставлять к концу клина и легкими ударами "сокола" выбивать клин.

25. При перерывах в работе остановить молот, плавно опустить бабу, не оставляя ее на весу. При переналадке или устранении неисправности бабу поставить на подставку или в специальное запирающее устройство, отключить привод.

26. Не класть клещи и другой инструмент на штамп и не бросать на пол. Хранить инструмент в стеллажах и пирамидах.

27. Для утоления жажды пить подсоленную газированную воду. Не принимать пищу на рабочем месте.

28. Использовать во время работы воздушный душ, а при перерывах в работе отдыхать, сидя вне зоны теплового воздействия (облучения).

29. В случае травмы, недомогания прекратить работу, сообщить мастеру и обратиться в медпункт.

Во время выполнения сменного задания могут произойти всякого рода непредвиденные ситуации, поэтому данные моменты оговариваются в правилах техники безопасности.

#### **18.4. ТРЕБОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ В АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЯХ**

1. Действия персонала в аварийных ситуациях должны осуществляться в соответствии с планом ликвидации аварийных ситуаций.

2. При внезапном отключении электроэнергии, неожиданном падении давления воздуха в системе, обнаружении неисправности оборудования, приспособлений и инструмента необходимо:

- остановить работу;
- отключить оборудование;
- немедленно сообщить мастеру о возникшей ситуации.

3. При возникновении пожара:

- отключить оборудование;
- немедленно сообщить о случившемся мастеру или вызвать пожарную часть;
- приступить к тушению пожара имеющимися средствами пожаротушения.

4. При получении травмы сообщить мастеру и обратиться в медпункт.

В правилах техники безопасности также оговариваются действия по окончании работ.

#### **18.5. ТРЕБОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПО ОКОНЧАНИИ РАБОТЫ**

1. Остановить молот (пресс), плавно опустить бабу молота в нижнее положение, запереть рычаг управления и перекрыть подачу пара (воздуха) у пневматических молотов, выключить электродвигатель у пресса.

2. Привести в порядок рабочее место, убрать отходы, окалину.

3. Протереть молот, пресс. Очистка сжатым воздухом запрещается.

4. Убрать на место годный для дальнейшей работы инструмент, а пришедший в негодность отделить для ремонта или изъятия.

5. Сложить поковки и заготовки в тару.



6. Сдать рабочее место сменщику или мастеру, обо всех замеченных неполадках в работе сообщить мастеру.
7. Снять спецодежду и обувь, убрать в шкаф.
8. Принять душ.

## **18.6. ТРЕБОВАНИЯ ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ РАБОТЕ НА НАГРЕВАТЕЛЬНОМ ОБОРУДОВАНИИ**

### **18.6.1. Общие требования**

1. К работе на нагревательных печах допускаются лица не моложе 18 лет, успешно прошедшие предварительный медицинский осмотр, обученные по электробезопасности, прошедшие инструктаж по технике безопасности на рабочем месте.
2. Повторный инструктаж по технике безопасности должен проводиться не реже одного раза в 3 мес.
3. Периодический медицинский осмотр необходимо проходить не реже одного раза в год.
4. Средства индивидуальной защиты:
  - костюм хлопчатобумажный (ГОСТ 27575—87);
  - рукавицы брезентовые (ГОСТ 12.4.010—75);
  - ботинки кожаные (ГОСТ 12.4.032—77);
  - каска защитная (ГОСТ 12.4.128—83);
  - очки защитные.
5. Периодическая проверка знаний должна проводиться не реже одного раза в год.
6. Температура наружных поверхностей органов управления, выполненных из металла, не должна превышать 40 °С, а из материалов с низкой теплопроводностью — быть не более 50 °С.
7. У печей всех типов рабочие отверстия должны закрываться дверцами (заслонками), футерованными огнеупорными материалами или асбестовыми защитными экранами на металлической основе.
8. Приводы механизмов печей и грузы, уравнивающие дверцы печей (заслонок), должны быть закрыты оградительными устройствами.
9. Электрические печи должны иметь блокировку для автоматического обесточивания нагревательных элементов при открывании дверцы печи.
10. Все токонесущие части электрических печей должны быть изолированы и ограждены, а ограждения и другие нетоковедущие части — заземлены.
11. При работе на печах-ваннах с расплавленными средами на каждой ванне должны быть установлены таблички с указанием типа и мощности ванны, рабочего интервала температур и состава расплава.
12. В процессе эксплуатации соляных печей-ванн возможно разъедание кладки, растравленной солью, поэтому внутренняя поверхность печей-ванн должна выкладываться шамотным кирпичом.
13. Клещи и другие приспособления для переноса нагретой заготовки должны быть изготовлены в соответствии с размером и профилем заготовки. Рукоятки инструмента, применяемого для загрузки, выгрузки из печи, подачи на пресс, должны быть такой длины, чтобы руки рабочего не подвергались воздействию высокой температуры.

14. Контроль над соблюдением требований безопасности труда возлагается на мастера участка.

15. Ответственность за соблюдение и обеспечение безопасных условий труда ложится на администрацию.

16. Рабочий должен соблюдать правила внутреннего трудового распорядка и техники безопасности.

17. Несоблюдение правил техники безопасности рассматривается как нарушение трудовой дисциплины. Виновное лицо может быть отстранено от работы и несет ответственность в соответствии с действующим законодательством.

18. При несчастном случае нужно немедленно сообщить об этом мастеру и обратиться в медпункт.

### **Требования безопасности перед началом работы**

1. Проверить наличие и исправность средств индивидуальной защиты. Надеть спецодежду, спецобувь, защитную каску и защитные очки.

2. Привести в порядок рабочее место.

3. Проверить достаточность освещения рабочего места.

4. Приготовить к работе инструмент, приспособления и убедиться в их исправности.

5. Проконтролировать исправность приборов и оборудования печи, грузозахватных приспособлений и грузоподъемных механизмов, блокировок, заземления, сигнализации.

6. Включить общую и местную вентиляцию.

7. Обо всех обнаруженных неисправностях сообщить мастеру и не приступать к работе до их устранения.

### **Требования безопасности во время работы**

1. Выполнять только ту работу, которая поручена администрацией подразделения.

2. Быть внимательным, не отвлекаться на посторонние дела и разговоры и не отвлекать других.

3. Воспрещается присутствие на рабочем месте посторонних лиц.

4. При загрузке-выгрузке заготовок из печи запрещается стоять против отверстия печи, необходимо находиться сбоку, предварительно убедившись, свободно ли место сзади, необходимое для отхода при срыве кочерги или клещей.

5. Запрещается в замасленной или облитой легковоспламеняющейся жидкостью спецодежде подходить к открытой печи и таре с горячими заготовками.

6. При работе на печах-ваннах с расплавленными средами следует применять средства индивидуальной защиты, оберегающие лицо и глаза от ожогов брызгами расплава.

7. Загрузка деталей в ванны должна проводиться на глубину  $\geq 150$  мм от поверхности расплава.

8. Для предотвращения резкого изменения температуры расплава в момент загрузки в ванну масса садки не должна превышать более чем в 10 раз массу расплава.

9. Уровень расплавленных солей не должен превышать  $3/4$  высоты ванны. Соли, добавляемые в процессе работы печи-ванны, должны быть просушены и засыпаться небольшими порциями (0,5...1 кг) при помощи специальных ковшей.

10. Пленка и шлаки с поверхности расплава в ваннах должны периодически удаляться посредством специальных предварительно просушенных ковшей с отверстиями.

11. Для уменьшения окисления и улетучивания расплавленных солей на рабочем месте необходимо иметь ящик с сухим песком.

12. При работе на ваннах следить за исправной работой вентиляции. Работа с неисправной вентиляцией запрещается.

13. В процессе работы нельзя:

- оставлять без присмотра работающее оборудование;
- принимать пищу;
- курить.

14. При останове электропечи, а также в случае возникновения на ней аварийной ситуации необходимо:

- отключить электронагрев печи;
- открыть загрузочное окно;
- доложить об этом мастеру.

#### **18.6.2. Требования безопасности в аварийных ситуациях**

1. При внезапном отключении электроэнергии и вентиляции на печах-ваннах прекратить работу, отключить оборудование и доложить об этом мастеру.

2. В случае отключения электроэнергии на электропечах отключить оборудование, доложить мастеру о случившемся и принять меры к выгрузке заготовок.

3. При обнаружении неисправностей оборудования, приборов, приспособлений немедленно сообщить мастеру.

4. При возникновении пожара следует немедленно вызвать пожарную охрану, доложить мастеру и приступить к тушению пожара имеющимися средствами пожаротушения.

#### **18.6.3. Требования безопасности по окончании работы**

1. Очистить ванны и печи от производственных отходов.

2. Сдать рабочее место чистым своему сменщику или мастеру.

3. Сообщить мастеру о всех неисправностях, замеченных во время работы.

4. Перед едой вымыть руки и лицо теплой водой с мылом, прополоскать рот.

5. Снять спецодежду и убрать в специальный шкаф.

6. По окончании работы принять душ.

В данной главе рассмотрены лишь основные требования к технике безопасности в кузнечно-штамповочных цехах.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Атрошенко А.П., Федоров В.И.** Горячая штамповка труднодеформируемых материалов. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1979. 287 с.
2. **Гуляев А.П.** Металловедение: учеб. для вузов. 6-е изд., перераб. и доп. М.: Металлургия, 1986. 544 с.
3. **Фиглин С.З., Бойцов В.В., Калпин Ю.Г., Каплин Ю.И.** Изотермическое деформирование металлов. М.: Машиностроение, 1978. 239 с.
4. **Сторожев М.В., Попов Е.А.** Теория обработки металлов давлением. Изд. 4-е. М.: Машиностроение, 1977. 423 с.
5. **Семенов Е.И.** Технология и оборудованиековки и горячей штамповки. М.: Машиностроение, 1999. 383 с.
6. **Физическое** металловедение: учеб. для вузов / С.В. Грачев, В.Р. Бараз, А.А. Богатов, В.П. Швейкин. Екатеринбург: Изд-во Уральского гос. техн. ун-та — УПИ, 2001. 534 с.
7. **Липевеч Ф.** Измерение температур в технике: справочник / пер. с нем. М.: Металлургия, 1980. 544 с.
8. **Специальные стали:** учеб. для вузов / М.И. Гольдштейн, С.В. Грачев, Ю.П. Векслер. М.: Металлургия, 1985. 408 с.
9. **Ковка и штамповка:** справочник. В 4-х т. / ред. совет: Е.И. Семенов (пред.) и др. М.: Машиностроение, 1985.
10. **Стали и сплавы для высоких температур:** справ. изд. В 2-х т. / С.Б. Масленков, Е.А. Масленкова. М.: Металлургия, 1991.
11. **Сплавы для термопар:** справ. изд. / И.Л. Рогельберг, В.М. Бейлин. М.: Металлургия, 1983. 360 с.
12. **Недоуров Ю.С., Кочетков В.А., Первов М.Л. и др.** О новых подходах к применению электроконтактного нагрева в процессах ОМД / тез. докл. "Совершенствование кузнечно-штамповочного производства". М.: НИАТ, 1990.
13. **Недоуров Ю.С., Кочетков В.А., Белякова Н.Л. и др.** А.с. 1423226 СССР. Способ изготовления деталей из полых полуфабрикатов // Бюллетень изобретений. 1988. № 34.
14. **Глебов А.Г., Мошкевич Е.И.** Электрошлаковый переплав. М.: Металлургия, 1985. 343 с.
15. **Марочник** сталей и сплавов / В.Г. Сорокин, А.В. Волосникова, С.А. Воткин и др.; под общ. ред. В.Г. Сорокина. М.: Машиностроение, 1989. 640 с.
16. **Журавлев В.Н. Николаева О.И.** Машиностроительные стали: справочник. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1992. 480 с.
17. **Марочник** сталей и сплавов. 2-е изд., доп. и перераб. / А.С. Зубченко, М.М. Колосков, Ю.В. Коширский и др.; под общ. ред. А.С. Зубченко. М.: Машиностроение, 2003. 784 с.
18. **Займовский В.А., Колупаева Т.Л.** Необычные свойства обычных металлов / под ред. Л.Г. Алмазова. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1984. 192 с.
19. **Живов Л.И., Овчинников А.Г., Складчиков Е.Н.** Кузнечно-штамповочное оборудование: учеб. для вузов / под ред. Л.И. Живова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 560 с.
20. **Громов Н.П.** Теория обработки металлов давлением. М.: Металлургия, 1978. 360 с.
21. **Новиков И.И.** Теория термической обработки металлов: учеб. для вузов. Изд. 3-е. М.: Металлургия, 1978. 392 с.
22. **Корнилов В.В., Синицкий В.М.** Гидропривод в кузнечно-штамповочном оборудовании: учеб. пособие для вузов / под ред. Н.В. Пасечника. М.: Машиностроение, 2002. 224 с.
23. **Организация, планирование и управление** авиационными научно-производственными организациями: учеб. пособие для вузов по авиационным специальностям / И.Ф. Бойдюк, В.В. Бойко, А.Д. Донец и др.; под общ. ред. В.И. Тихомирова. М.: Машиностроение, 1985. 344 с.
24. **Научные основы управления:** учебник / под ред. Д.М. Крука. М.: Экономика, 1978. 278 с.

25. **Тихомиров В.И.** Организация, планирование и управление производством летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1978. 495 с.
26. **Штамповка** на кривошипных горячештамповочных прессах и горизонтально-ковочных машинах / А.П. Атрошенко, Е.П. Булат, В.Д. Спирин и др.; под общ. ред. П.В. Камнева и А.П. Атрошенко. Л.: Машиностроение, Ленинградское отд., 1983. 95 с.
27. **ИСО 9000.** Международный стандарт. Общее руководство качеством и стандарты по обеспечению качества. 87 с.
28. **ГОСТ 12.4.010–75.** Система стандартов безопасности труда. Средства индивидуальной защиты.
29. **ПОТ РМ-005–98.** Межотраслевые правила по охране труда при термообработке металлов.
30. **ПОТ РМ-003–97.** Правила по охране труда при выполнении кузнечно-прессовых работ.
31. **Головин Ю.Н.** Введение в нанотехнику. М.: Машиностроение, 2007. 496 с.
32. **Боткин А.В., Мурашкин М.Ю., Рааб Г.И., Валиев Р.З.** Интенсивная пластическая деформация цилиндрической заготовки из сплава 6061 равноканальным угловым прессованием в параллельных каналах // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2009. № 4. С. 33–38.
33. **Матвеев А.С.** Пат. РФ № 2403206. Способ получения нанокристаллической структуры материала в трубных заготовках и устройство для его осуществления // Бюллетень изобретений. 2010. № 31.
34. **Полетаев В.А., Матвеев А.С., Казаков Р.А.** Способ обработки металлов давлением // Бюллетень изобретений. 2010. № 8.
35. **Валиев Р.З., Рааб Г.И., Мурашкин М.Ю., Гундеров Д.В.** Использование методов интенсивной пластической деформации для получения объемных наноструктурных металлов и сплавов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2008. № 11.
36. **Валиев Р.З., Александров И.В.** Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией. М.: Логос, 2000. 272 с.

Справочное издание

**МАТВЕЕВ АНАТОЛИЙ СЕРГЕЕВИЧ,  
КОЧЕТКОВ ВЛАДИМИР АНДРЕЕВИЧ**

**СПРАВОЧНИК КУЗНЕЦА**

Редактор *А.П. Лебедева*  
Дизайнер *Н.А. Свиридова*  
Инженер по компьютерному макетированию *С.А. Жиркина*  
Корректор *Л.И. Сажина*

---

Сдано в набор 31.03.11 г. Подписано в печать 26.09.11 г.  
Формат 70×100 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура NewtonС.  
Печать офсетная. Усл. печ. л. 29,25. Уч.-изд. л. 28,77.  
Тираж 500 экз. Заказ .

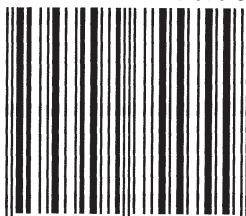
---

ООО "Издательство Машиностроение",  
107076, Москва, Стромьинский пер., 4  
[www.mashin.ru](http://www.mashin.ru)

---

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

ISBN 978-5-94275-579-9



9 785942 755799