



**ПРОИЗВОДСТВО
ГОРЯЧЕ-
КАЛИБРОВАННОГО
ПРОКАТА**

ПРОИЗВОДСТВО ГОРЯЧЕ- КАЛИБРОВАННОГО ПРОКАТА

**Издательство «Техніка»
Киев — 1975**

6П4.2
П80

УДК 621.771

Производство горячекалиброванного проката. Гладков Г. А., Калинович С. В., Стычинский Л. П., Когадеев А. А., Николаев Э. П., Сергеев С. Т., «Техніка», 1975, 176 стр.

В книге обобщен опыт металлургических заводов Макеевского им. С. М. Кирова и Серовского им. А. К. Серова по созданию и эксплуатации калибрующих блоков трехвалковых клетей при прокатке круглой и шестигранной стали, а также приведены разработки Донецкого научно-исследовательского института черной металлургии. Описаны конструкции блоков и методы их расчета, изложены основные положения теории горячего калибрования и результаты исследования жесткости трехвалковых клетей, точности калиброванной стали, износа валков, качества поверхности металла, применения горячекалиброванной стали вместо холоднотянутой на машиностроительных заводах. Книга рассчитана на инженерно-технических работников металлургической промышленности, может быть полезна студентам, специализирующимся в области обработки металлов давлением.

Табл. 23, ил. 78, библи. 83.

Рецензент канд. экон. наук Н. А. Терещенко
Редакция литературы по тяжелой промышленности
Заведующий редакцией инж. В. И. Кравец

П 31010—097 69-75
М202 (04)-75

© Издательство «Техніка», 1975 г.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Одна из основных задач, поставленных девятым пятилетним планом развития народного хозяйства СССР перед черной металлургией, состоит в коренном улучшении качества металлопродукции за счет внедрения прогрессивных способов производства металла и ее эффективном применении. Важным показателем качества прокатной продукции является точность размеров поперечного сечения, которая позволяет повысить коэффициент использования металла, снизить затраты по переделу, уменьшить брак по размерам на прокатных станах, облегчить металлоконструкции и машины, повысить производительность труда.

Задача повышения точности размеров продукции решается путем совершенствования технологии производства, применения систем автоматического регулирования толщины и ширины полосы, а также счетно-решающих машин, установки в чистовых группах станов жестких рабочих клетей, внедрения новых методов прокатки.

Особенно эффективна прокатка в отрицательном поле допускаемых отклонений размеров сечения проката и с точностью, соответствующей калиброванной (холоднотянутой) стали, что позволяет применять такой металл на машиностроительных предприятиях, минуя дополнительный передел — волочение. Среди проката, подвергаемого волочению, наибольшее место занимают профили простого сечения — круглая и шестигранная сталь. Точности проката, соответствующей калиброванной стали, можно достичь методом горячего калибрования в отдельных клетях или в специальных калибрующих блоках, установленных в линии прокатного стана за чистовой клетью [41, 75]. Этот метод получил развитие только за последние годы и нуждается в обосновании выбора типа клетей и конструкций калиб-

рующих блоков, разработке технологии и теории процесса, методов расчета основных конструктивных и технологических параметров.

Предлагаемая книга обобщает опыт создания и внедрения калибрующих блоков трехвалковых клетей на Макевском металлургическом заводе им. С. М. Кирова (ММЗ) и Серовском металлургическом заводе им. А. К. Серова (СМЗ) при прокатке круглой и шестигранной стали. Большое внимание уделено теоретическому и экспериментальному исследованию основного оборудования и технологии процесса, позволяющим определить возможности и основные пути дальнейшего развития метода горячего калибрования. Излагается опыт создания установки для удаления окалины с поверхности проката и реализации нового вида металлургической продукции — горячекалиброванной стали.

Отдельные главы книги написали: Г. А. Гладков — гл. II, III, IV, V; С. В. Калинович — гл. I, II, IV, V; А. А. Когадеев — гл. I, II, IV, V; Л. П. Стычинский — гл. I, II, IV, V; Э. П. Николаев — гл. III, IV; С. Т. Сергеев — гл. III.

Отзывы и пожелания по книге просим направлять по адресу: 252601, Киев, 1, ГСП, Пушкинская, 28, издательство «Техніка».

Глава I

СПОСОБЫ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ПРОКАТА

ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ТОЧНОСТЬ ПРОКАТА

Для всех типов станов факторы, определяющие точность прокатываемых профилей, являются общими и отличаются лишь степенью влияния на каждом конкретном стане. В данном случае имеются в виду наиболее распространенные сортопрокатные станы, калибры рабочих клетей которых образуются двумя валками. К основным факторам, определяющим точность размеров сечения проката, относятся: сортамент сталей и профилей данного стана; жесткость рабочих клетей и конструкция основного технологического оборудования; температурные условия прокатки; скоростные условия прокатки и режим натяжения; калибровка прокатных валков; стойкость рабочего инструмента.

От сортамента стана в значительной степени зависит точность размеров сечения прокатываемых профилей, особенно таких станов, в сортамент которых входят профили, разные по форме и размерам, а также марки сталей от низкоуглеродистых до высокоуглеродистых и легированных. Это приводит к различному заполнению калибров как по высоте (за счет различного давления металла на валки), так и по ширине профиля (за счет различного уширения), поэтому размеры сечения готового проката могут изменяться в определенных пределах. В результате требуются тщательный контроль размеров раската при переходе на новую марку стали и соответствующая регулировка валков рабочих клетей. Частые переходы на прокатку различных профилей или профилеразмеров также отрицательно сказываются на точности размеров сечения проката, затрачивается время на настройку и регулировку рабочих клетей при работающем стане. В более выгодных условиях находятся станы, в сортамент которых входят два-три профилеразмера

(например, проволочные), каждый из которых прокатывают длительное время. Это создает условия для качественной настройки и стабилизации режима прокатки, получения стабильных размеров больших масс проката.

Колебания размеров сечения круглой стали в связи с изменяющимися параметрами прокатки во многом обуславливаются жесткостью основного технологического оборудования и оснастки стана — рабочих клетей и привалковой арматуры. Недостаточная жесткость рабочих клетей приводит к изменениям вертикального размера сечения профиля, а недостаточная жесткость или неточная установка привалковой арматуры — к различному заполнению калибра металлом. Деформация калибра при прокатке складывается из упругой деформации рабочих валков, станины клетки, подушек и подшипников, выбора зазора между отдельными узлами клетки. При значительной длине бочки валков их деформация является преобладающей над другими и достигает 60% от общей. В процессе прокатки изменение технологических факторов (температуры металла, скорости и натяжения, марки стали, количества прокатываемых в одной клетке раскатов) приводит к изменению давления металла на валки и, следовательно, к изменению величины деформации всех элементов клетки. Для уменьшения этой деформации применяются специальные рабочие клетки, высокая жесткость которых достигается за счет малой длины бочки валка, предварительного напряжения станины и подушек, установки многорядных подшипников качения, строгой фиксации всех элементов клетки в исходном состоянии.

Изменение температурных и скоростных условий прокатки, режима натяжения металла между клетями приводит к изменению давления металла на валки и колебанию вертикальных размеров сечения профилей, но в еще большей степени влияние этих факторов сказывается на колебаниях горизонтальных размеров. Температура и скорость прокатки обуславливают различное уширение металла и заполнение калибра, а колебание натяжения — утяжку профиля на середине длины полосы и переполнение ее концов, в результате колебания размеров в горизонтальном направлении достигают 1 мм и более. Для устранения этого явления необходима надежная стабилизация указанных условий прокатки, что достигается равномерными нагревом, темпом прокатки заготовок и загрузкой привода ра-

бочих клетей, контролем и оперативным регулированием натяжения металла между клетями, особенно в чистовой группе клетей. В процессе прокатки имеет место разогрев рабочих валков, их тепловое расширение и изменение размеров выходящего из валков раската, что особенно ощутимо при переменном темпе прокатки.

Важным фактором, способствующим получению точных размеров сечения профилей, является калибровка прокатных валков. Решающую роль в этом вопросе играет конструкция калибров валков предчистовых и чистовых клетей. Для различных профилей и размеров используются проверенные практикой системы калибров, обеспечивающие определенную точность готового профиля. Для прокатки круглой стали наибольшее распространение получила система предчистового и чистового калибров овал — круг, которая используется для всех размеров этого профиля с некоторыми конструктивными отличиями на разных прокатных станах. Конструкция двухвалкового круглого калибра имеет ряд недостатков с точки зрения получения точных размеров сечения профиля: отсутствует контроль размеров готового профиля в горизонтальном направлении (в местах разбега калибра), что приводит к появлению «лампасов» или «лысок»; имеет место интенсивная местная выработка чистового калибра и образование «плеч» на профиле; степень изменения размера калибра в вертикальном направлении отличается от соответствующих изменений в других направлениях, а это увеличивает овальность профиля; неодинаковая линейная скорость различных точек калибра влияет на трение металла о валки, износ калибра и изменение размеров профиля во времени, ухудшает качество поверхности проката. Эти недостатки присущи всем круглым калибрам и не устраняются в жестких и предварительно напряженных рабочих клетях. На точность размеров профиля в пределах больших партий проката влияет также стойкость прокатных валков. В процессе прокатки калибр изнашивается неравномерно по периметру, что изменяет форму и размеры сечения готового профиля. Для увеличения стойкости калибров подбирают соответствующие материал валков, температурный режим прокатки и режим охлаждения, конструкцию смежных калибров. Рассмотренные факторы, определяющие точность проката, взаимосвязаны и тесно переплетаются в общем технологическом процессе прокатки на каждом стане.

Отечественные станы прокатывают круглую, квадратную и шестигранную сталь в соответствии с ГОСТ 2590—71, ГОСТ 2591—71 и ГОСТ 2879—69. Большинство станков прокатывают сталь по обычной точности указанных ГОСТов, а некоторые — по повышенной. Однако прокат даже с высокой точностью не удовлетворяет требованиям 4 и 5-го классов точности ГОСТ 7417—57, ГОСТ 8559—57, ГОСТ 8560—67 на калиброванную сталь. Если сравнить обе группы ГОСТов (табл. 1), то можно увидеть, что, во-первых, отклонения размеров сечения по 5-му классу точности допускаются только в сторону отрицательного допуска, тогда как по повышенной точности допускаются значительные по величине (33—50% от отрицательного допуска) отклонения в сторону положительного допуска; во-вторых, величина отрицательных отклонений размеров по повышенной точности в 1,25—1,5 раза больше величины отклонений по 5-му классу точности.

Применение предварительно напряженных клетей (ПНК) конструкции ВНИИметмаша на станах 250 и 350 Донецкого металлургического завода (ДМЗ) и стане 300 Чепельского металлургического комбината (Венгерская Народная Республика) позволило получить точность размеров круглой стали в пределах поля отклонений 0,5 мм [28, 49]. Дальнейшая эксплуатация ПНК при прокатке круглой стали диаметром 17—30 мм обеспечила стабильное получение размеров сечения с отклонениями +0,2 ... —0,6 мм (100%) и лишь 33% проката с отклонениями +0 ... —0,28 мм. На стане 300 Магнитогорского металлургического комбината (ММК) за счет усовершенствования калибровки валков была получена круглая сталь диаметром 30 мм с отклонением размеров $\pm 0,2$ мм и овальностью 0,2 мм [16]. По отрицательному отклонению размеров сечения такая сталь удовлетворяет 5-му классу точности по ГОСТ 7417—57, однако положительные отклонения не позволяют отнести ее к 5-му классу. Кроме того, не известно, какое количество металла произведено с точностью $\pm 0,2$ мм.

При изучении точности прокатки профилей массового назначения, производимых на 115 сортовых станах страны [17], установлено, что на непрерывных мелкосортных станах 250 Криворожского (КрМЗ) и Череповецкого (ЧМЗ) металлургических заводов круглую сталь диаметром 10—28 мм прокатывают с полем отклонений размеров в пределах 0,6 мм, а круглую сталь диаметром 17 мм — на полу-

Таблица 1

Допускаемые отклонения на размеры горячекатаной и калиброванной стали, мм

Сталь круглая				Сталь квадратная				Сталь шестигранная			
горячекатаная повышенной точности (ГОСТ 2590—71)		калиброванная 5-го класса точности (ГОСТ 7417—57)		горячекатаная повышенной точности (ГОСТ 2591—71)		калиброванная 5-го класса точности (ГОСТ 8559—57)		горячекатаная повышенной точности (ГОСТ 2879—69)		калиброванная 5-го класса точности (ГОСТ 8560—67)	
Диаметр	Допускаемые отклонения	Диаметр	Допускаемые отклонения	Сторона квадрата	Допускаемые отклонения	Сторона квадрата	Допускаемые отклонения	Диаметр вписанной окружности	Допускаемые отклонения	Диаметр вписанной окружности	Допускаемые отклонения
—	—	3,1—6	—0,16	—	—	3,2—6	—0,16	—	—	3,2—6	—0,16
5—9	+0,1 —0,3	6,1—10	—0,20	5—9	+0,1 —0,3	6,3—10	—0,20	8—9	+0,1 —0,3	6,3—10	—0,20
10—19	+0,2 —0,3	10,2—18	—0,24	10—19	+0,2 —0,3	11—18	—0,24	10—19	+0,2 —0,3	11—18	—0,24
20—32	+0,2 —0,4	18,5—30	—0,28	20—25	+0,2 —0,4	19—30	—0,28	20—25	+0,2 —0,4	19—30	—0,28
34—48	+0,2 —0,6	31—50	—0,34	26—48	+0,2 —0,6	32—50	—0,34	26—48	+0,2 —0,6	32—50	—0,34
50—56	+0,2 —0,9	52—80	—0,40	50—56	+0,2 —0,9	53—80	—0,40	50—56	+0,2 —0,9	53—80	—0,40
60—75	+0,3 —1,0	—	—	60—75	+0,3 —1,0	—	—	60—75	+0,3 —1,0	—	—

непрерывном стане 250-1 ММК с полем отклонений размеров в пределах 0,4 мм. Анализ фактических данных позволил установить возможность сокращения допускаемых отклонений на 0,1—0,3 мм на мелкосортную и крупносортную круглую и квадратную сталь. Для непрерывных станов 250 КрМЗ, ЧМЗ и Западно-Сибирского металлургического завода (ЗСМЗ) на сталь диаметром 10—30 мм плюсовое допускаемое отклонение уменьшено на 0,2—0,3 мм, а на станах 250 и 350 ДМЗ, Карагандинского металлургического комбината (КарМК) и других — на 0,2 мм. Рекомендовано производить круглую и квадратную сталь повышенной точности на станах 250 КрМЗ и ЗСМЗ, 250 и 350 ЧМЗ, 250 и 350 (с применением ПНК) ДМЗ, 350 Днепровского металлургического завода им. Ф. Э. Дзержинского. На непрерывных мелкосортных станах КрМЗ и ЧМЗ можно выпускать 95,6—99% проката в пределах повышенной точности по ГОСТ 2590—71. Приведенные данные показывают, что прокатывать мелкосортную сталь по требованиям к размерам сечения на калиброванную сталь нельзя из-за плюсовых отклонений и большого поля отклонения размеров, которое в лучшем случае равно 0,4—0,6 мм, а по ГОСТам наибольшее поле для такой стали (по 5-му классу) составляет 0,28 мм. Аналогичное положение наблюдается и при прокатке крупносортных профилей.

По данным Ф. Морза [42] допускаемые отклонения размеров катанки по диаметру, используемые в Англии, равны $\pm 0,25$ мм, а сортовой стали диаметром 9,5 мм составляют $\pm 0,13$ мм. В среднем при одностаночной прокатке допускаемые отклонения размеров на мелкосортную сталь равны $\pm 0,2$ мм. При прокатке катанки на проволочных станах [34] с одностаночной чистой группой клетей шведского типа получено отклонение размеров $\pm 0,2$ мм с наилучшими результатами $\pm 0,075 \dots \pm 0,10$ мм (до 40 т проката на калибр). На станах с одностаночной чистой группой клетей немецкого типа (чередующиеся горизонтальные и вертикальные клетки) достигнуто отклонение размеров $\pm 0,25 \dots \pm 0,3$ мм, в некоторых случаях $\pm 0,15 \dots \pm 0,2$ мм, а на станах с многостаночными группами клетей с групповым приводом (клетки горизонтальные) американского типа — $\pm 0,35 \dots \pm 0,4$ мм с овальностью 0,4—0,45 мм (до 110 т на калибр), а в особых условиях — $\pm 0,25 \dots \pm 0,3$ мм. На станах с чистовыми группами трехвалковых клетей типа «Кокс» при прокатке 300 т катанки диаметром 5,5 мм вы-

держивается отклонение размеров $\pm 0,2$ мм и достигнуто отклонение $\pm 0,1$ мм.

В стандарте США на катанку диаметром 5,6—8 мм установлено допускаемое отклонение $\pm 0,38$ мм, а в стандартах западно-европейских стран — до $\pm 0,25$ мм, однако в связи с повышением требований к точности размеров фактические отклонения меньше, чем в стандартах. Стандартом Японии предусмотрены допускаемые отклонения $\pm 0,4$ мм для круглой стали диаметром 5—22 мм, а фактически на станах фирмы «Анти Сэйко» и «Токию Сэйко» [17] прокатывают круглую сталь с отклонениями $\pm 0,1 \dots \pm 0,14$ мм. Для легированных сталей на заводе «Варшава» (Польская Народная Республика), оборудованный комбинированным мелкосортно-проволочным станом, производит катанку диаметром 5,5—7 мм с отклонениями размеров $\pm 0,1$ мм, круглую сталь диаметром 7—10 мм — $\pm 0,12$ мм, а сталь диаметром 20—30 мм — $\pm 0,33$ мм [17, 34, 37]. Проволочный и мелкосортный станы фирмы «Демаг», установленные в Финляндии и ЮАР, обеспечивают отклонение размеров катанки $\pm 0,1$ мм, круглой стали диаметром 9,5—41 мм — $\pm 0,1 \dots \pm 0,3$ мм и $+0,2 \dots -0,5$ мм. Получили распространение бесстаночные предварительно напряженные клети Левфена, обеспечивающие отклонение размеров сечения проката в пределах $\pm 0,1$ мм, и чистовые группы клетей фирмы «Морган» и «Шлеманн» — $\pm 0,1 \dots \pm 0,2$ мм.

Анализ результатов по точности прокатки в зарубежной практике показывает, что получаемые размеры профилей имеют плюсовые отклонения, т. е. не удовлетворяют требованиям ГОСТ 7417—57 и только в ряде случаев поле допускаемых отклонений составляет 0,15—0,2 мм, что соответствует указанному ГОСТу. Если сдвинуть такие отклонения в минусовую сторону, то, очевидно, можно осуществлять горячую прокатку круглых профилей с точностью по 5-му классу на калиброванную сталь. Однако следует учитывать, что приведенные выше наилучшие результаты достигнуты при производстве малых объемов проката (40—50 т), а это не удовлетворяет требованиям высокой производительности станов.

КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТИ ГОРЯЧЕКАТАНОГО МЕТАЛЛА И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ РАЗМЕРОВ ЕГО СЕЧЕНИЯ

Требования к качеству поверхности горячекатаного металла с простой формой поперечного сечения в обработанном виде заключаются в следующем: на поверхности металла не должно быть трещин, плен, рванин, закатов, раковин, шлаковых включений и других дефектов, нарушающих сплошность металла; отдельные риски и царапины не должны превышать половины допуска на размер; величина обезуглероженного слоя должна быть не более 0,5% толщины прутка для конструкционной углеродистой стали и 1,5% для легированной. Важным фактором, характеризующим качество поверхности проката, является наличие и величина окалины.

На качество поверхности готового проката влияют технологические факторы производства, основными из которых являются: качество исходной заготовки, условия и режим ее нагрева, тип основного оборудования стана, система калибровки и качество прокатных валков, конструкция и состояние привалковой арматуры, температурный режим прокатки, технология отделки проката. Для предупреждения (уменьшения) дефектов поверхности проката принимают систему мероприятий, которые проводят, начиная со сталеплавильных цехов и кончая участками отделки сортопрокатных станов. В условиях сортопрокатных станов перед посадкой заготовок в печь осматривают поверхность исходной заготовки, имеющиеся складки, трещины, плены, закаты зачищают или вырубывают. Для уменьшения обезуглероживания и окалинообразования применяют печь с безокислительной атмосферой, скоростного двухступенчатого нагрева с шагающим подом или шагающими балками. Используют индукционные установки, комбинации газовых печей с индукционными, печи электроконтактного нагрева. Уточняют температурный режим нагрева и прокатки для каждой марки стали.

Для удаления окалины с поверхности заготовки, предупреждения вкатывания окалины в металл и появления вмятин служат окалиноломатели. Рабочие калибровки валков предусматривают плавное формоизменение металла по пропускам с попеременным расположением углов профиля

Материал валков и качество их обработки подбирают так, чтобы обеспечить высокую стойкость калибров и получить прокат с высоким качеством поверхности.

Значительное влияние на качество поверхности проката оказывает конструкция и состояние привалковой арматуры. Неправильно установленная и настроенная, а также изношенная арматура приводит к появлению закатов, рисок, царапин и других дефектов проката. Основной тенденцией при оснащении станов, производящих прокат высокого качества, является применение роликовой арматуры с использованием подшипников качения, с максимальным приближением к очагу деформации, с возможностью оперативной регулировки и унификации. На станах, где применение роликовой арматуры затруднено, обращают особое внимание на материал проводок и качество обработки их внутренних поверхностей.

В последнее время большое внимание уделяют вопросам окалинообразования на поверхности проката при охлаждении его после прокатки. Особенно это относится к мелкому сорту и катанке. Для уменьшения окалинообразования после прокатки станы оборудуют установками интенсивного контролируемого охлаждения проката после чистовой клетки: линиями сорбитизации и патентирования, душирующими установками, установками Стиллмор, фирмы «Шлеманн» и «Демаг». На некоторых станах применяют интенсивное принудительное охлаждение проката еще перед чистовой клетью. При применении этого способа за счет понижения температуры прокатки в чистовом пропуске улучшаются механические свойства проката, уменьшается окалинообразование и улучшается качество поверхности проката.

Повышение точности размеров сечения и, в частности, стабилизация размеров по длине раската приводит к уменьшению концевой обрезки и экономии металла. Повышение точности создает условия для сдачи металла по теоретическому весу и экономии металла в народном хозяйстве тем большей, чем больший объем проката производится в узком поле отрицательных допускаемых отклонений.

При дальнейшем переделе проката в не меньшей степени проявляется эффективность повышения точности. Существующее положение с точностью сечения прокатываемого металла обуславливает необходимость использования для волочения подкат с большим запасом по размерам, чтобы

при обжатии его в волоках имелась возможность полного устранения овальности профиля и остаточных черновин. Точный размер сечения позволяет уменьшить этот запас и снизить величину обжатия при волочении. При холодном волочении проката высокой точности достигается более высокая производительность волочильных станов благодаря некоторому увеличению скорости волочения, сокращению числа проходов или увеличению числа ниток на многониточных волочильных станах. При этом повышается качество калиброванной стали, так как из более точного подката получается более точная калиброванная сталь, уменьшается износ и расход рабочего инструмента волочильных станов (волоков), время остановок для его замены, снижается кривизна калиброванных прутков.

Для устранения обезуглероженного слоя, волосовин и других дефектов при производстве калиброванной стали высокого качества применяют шлифование, обточку, а поэтому размеры сечения подготавливают с большим запасом под обработку. Прокат высокой точности позволяет сократить этот запас, величину обдираемого слоя и уменьшить расход металла. В большинстве случаев перед шлифованием круглую сталь подвергают волочению только для того, чтобы устранить большую овальность. Использование проката высокой точности позволяет исключить вспомогательный передел — волочение (и связанные с ним операции) перед шлифованием.

Глава II

КАЛИБРУЮЩИЕ БЛОКИ

СУЩНОСТЬ ПРОЦЕССА ГОРЯЧЕГО КАЛИБРОВАНИЯ

Основная задача процесса холодной калибровки (волочения) — обеспечить соответствующую точность геометрических размеров профиля. Эту же задачу решает горячее калибрование, при котором обработке подвергают нагретый металл. Основные принципы горячего калибрования заключаются в следующем: процесс осуществляют с одного нагрева в едином технологическом потоке прокатного стана за чистовой двухвалковой клетью; калибруемый подкат

деформируют с сохранением подобия формы и ориентировки профиля относительно осей с малой степенью обжатия (в пределах 1—10% в зависимости от размеров профиля) в двух или трех многовалковых калибрах, места разъемов которых смещены один относительно другого на определенный угол в плоскости, перпендикулярной оси прокатки.

На рис. 1 представлены схемы получения круглой стали высокой точности и схема обычной прокатки (рис. 1, а). Схемы, показанные на рис. 1, б, в и г, по характеру формоизменения и степени деформации металла больше относятся к обычному процессу прокатки в многовалковых калибрах, чем к калибровке, однако названы так, очевидно, потому, что направлены на получение проката высокой точности. Схема, приведенная на рис. 1, б, предполагает установку жесткой клетки кварто на место обычной чистовой клетки дуо сортового стана, а за клетью кварто — калибрующую четырехвалковую клеть [14]. Двухвалковый калибр в клетки кварто должен обеспечить получение подката для калибрующей клетки в форме

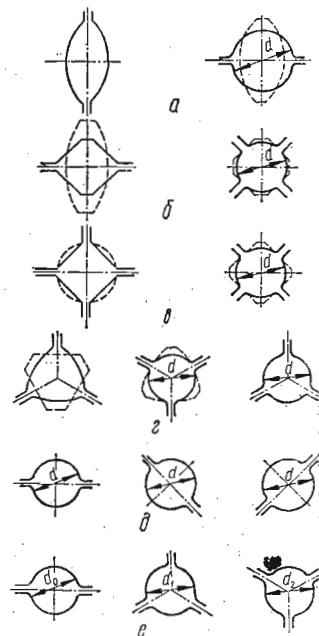


Рис. 1. Схемы прокатки круглой стали.

квадрата со скругленными углами. Степень заполнения углов квадрата может колебаться в широких пределах, так как эти места затем подвергают обжатию в четырехвалковом калибре. Размеры по граням квадрата должны быть предельно точными, так как в следующем пропуске середины граней попадают на разъемы четырехвалкового калибра и не контролируются валками. Несмотря на отсутствие в четырехвалковом калибре уширения и, при малых обжатиях, утяжки, такая схема не может гарантировать стабильное его заполнение и получение точных размеров круглой стали. Даже при высокой жесткости клетки кварто размер квадрата по граням может изменяться из-за колебания

температурного режима прокатки, износа калибра, натяжения металла и других причин, а значит, будут изменяться неконтролируемые в четырехвалковом калибре размеры в местах его разъемов. Колебание степени заполнения квадратного калибра приведет к различному обжатию в круглом калибре и различной деформации последнего в вертикальном и горизонтальном направлениях, искажая его форму. Другие факторы, как, например, сваливание (даже незначительное) раската в круглом калибре, натяжение его между клетями, также обуславливают неравномерное заполнение клетями и изменение размеров профиля. Указанные причины отрицательно влияют на возможность получения высокой точности размеров круглой стали, приводят к появлению на профиле «лысок» или «усов», которые снижают эффективность этой схемы производства точного проката. Поэтому схема, приведенная на рис. 1, б, еще находится в стадии совершенствования.

Аналогичное положение наблюдается и при прокатке по схеме, показанной на рис. 1, в, которая отличается лишь тем, что предчистовой квадратный калибр — четырехвалковый и деформирует не овальный, а круглый раскат. При промышленных испытаниях существующие четырехвалковые клетки имели меньшую жесткость, чем клетки, соответствующие рис. 1, б, а это обусловило пониженную точность готового профиля. В обоих случаях наличие одного чистового калибра не обеспечивает получения точных размеров готового профиля.

Неравномерная деформация металла по ширине калибра в схемах (рис. 1) приводит к повышенному и неравномерному износу валков, что снижает точность размеров готового профиля. С точки зрения надежного контроля размеров круглой стали по его периметру, более предпочтительными являются трехвалковые клетки, а не четырехвалковые. Именно такие калибры используют на блочных станах фирмы «Кокс» (рис. 1, г). В этом случае деформация металла происходит в ряде трехгранных вытяжных калибров с ровными гранями, а из предчистового калибра выходит раскат с выпуклыми гранями. Радиус вписанной окружности предчистового калибра равен радиусу чистовых калибров. Последние два круглых калибра в блоке имеют одинаковые размеры и форму. В первом из них (по ходу прокатки) выпуклый трехгранник обжимается и принимает круглую форму, а во втором осуществляется дополнительный кон-

троль размеров профиля и устраняются возможные отклонения размеров от требуемых. Эту схему (рис. 1, г) используют только на станах блочной конструкции после обжимных трехвалковых групп клетей. Несмотря на то, что в особых условиях достигнуто отклонение размеров $\pm 0,1$ мм, схема имеет существенные недостатки. Неравномерная по

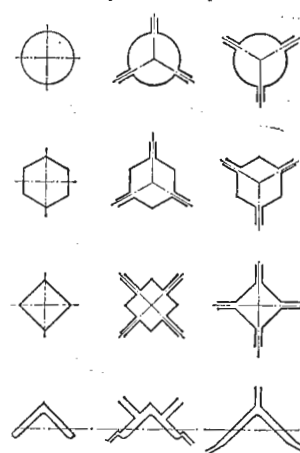


Рис. 2. Схемы горячего калибрования сортовых профилей.

ширине деформация металла в первом круглом калибре обуславливает его неравномерный износ и искажение формы профиля в процессе длительной прокатки. Равенство размеров и формы последних двух калибров в обычных условиях не может обеспечить получение высокой точности профиля из-за различных обжатий в этих калибрах и упругой деформации рабочих клетей. Под нагрузкой калибры теряют правильную форму, причем в различной степени: в первой клетки деформация больше, во второй — меньше. Поэтому в местах разъемов последнего калибра образуются искажения формы профиля в виде «лампасов», форма круглого калибра искажается и на остальной части по периметру, что приводит к повышенной овальности круглой стали. Этот недостаток присущ и схеме, показанной на рис. 1, д, которая к тому же обладает известными недостатками двухвалковых круглых калибров.

Предложенная ДонНИИчерметом схема горячего калибрования (рис. 1, е) лишена многих отмеченных недостатков, что достигается конструктивными особенностями калибров. Круглый двухвалковый калибр имеет диаметр несколько больше диаметра первого трехвалкового калибра и допускает колебания размеров выходящего из него подката в широких пределах. Трехвалковые калибры в статическом положении имеют различные размеры и форму. Правильную форму круга и одинаковые размеры они принимают только под нагрузкой во время обжатия металла. Это обстоятельство позволяет при колебаниях размеров

подката получать правильную форму готовой стали и стабильную точность заданных его размеров. Схема отличается более равномерным обжатием по ширине ручья, что положительно сказывается на изменении формы калибров в процессе износа и поддержании заданной овальности профиля в течение длительного периода прокатки.

Из анализа рассмотренных схем видно, что схема ДОН-НИИчермета обладает совокупностью преимуществ, которые в отдельности присущи другим схемам, и лишена многих недостатков последних. В дальнейшем при рассмотрении вопросов горячего калибрования имеется в виду схема, показанная на рис. 1, е.

При горячем калибровании круглой стали в первом трехвалковом калибре обжимается 75—80% всей поверхности подката, а во втором — те участки с искаженной геометрией, которые получены в местах разъемов первого калибра. При этом общее обжатие должно обеспечить полную проработку металла по всему периметру. Поступающий из двухвалкового калибра подкат может иметь форму, отличную от круга, за счет некоторого незаполнения чистового калибра, выработки «плеч» или появления небольших «лампасов» в местах разъема. В первом трехвалковом калибре поверхность профиля приобретает правильную геометрическую форму, но остаются искажения на участках разъемов, которые устраняются во втором калибре. Рабочие клетки с трехвалковыми калибрами располагаются за чистовой двухвалковой клетью стана и вместе с необходимой оснасткой и приводом представляют собой единую установку — калибрующий блок трехвалковых клетей. На рис. 1, е показан принцип горячего калибрования в трехвалковых калибрах, так как они являются наиболее целесообразными для калибрования круглой и шестигранной стали. Этот принцип горячего калибрования может быть использован при производстве квадратной, прямоугольной и фасонной стали (рис. 2).

РАБОЧИЕ КЛЕТЫ БЛОКОВ

Для прокатки труб и сортовой стали разработано большое количество конструкций рабочих клетей прокатных станов, отличающихся количеством и диаметром рабочих валков клетки, количеством приводных и холостых валков, размещением опор валков, формой станины клетки, особен-

ностями сборки, разборки и настройки. До внедрения калибрующих блоков в отечественной практике трехвалковые клетки использовали для редуцирования труб и прокатки катанки из цветных металлов. За рубежом трехвалковые клетки используют также в станах блочной конструкции фирмы «Кокс». Другие конструкции многовалковых клетей находятся в стадии исследования или внедрения.

На отечественных заводах наибольшее распространение получили трехвалковые клетки конструкции Электростальского завода тяжелого машиностроения (ЭЗТМ). Нерегулируемая черновая трехвалковая клеть модели I конструкции ЭЗТМ используется в составе редуцирующего стана 30—102. Клеть имеет один калибр, образованный тремя валками, оси которых расположены под углом 60° друг к другу. В клетке предусмотрено одинаковое расстояние между подшипниковыми опорами каждого рабочего валка и симметричное расположение опор относительно середины бочки валка. Опоры состоят из спаренных роликовых подшипников, установленных неподвижно в станине клетки совместно с коническими шестернями. При перевалке клетки узлы опор и конических зубчатых передач остаются в станине клетки, а для замены валков достаточно извлечь из клетки их оси. Рабочий валок снабжен втулкой с конической внутренней поверхностью, которая соприкасается с соответствующей конической частью оси. При сборке валок плотно насаживают на коническую часть, чем достигается жесткость крепления. Станины клетки представляют собой моноблочную конструкцию, в которой имеются проемы для рабочих валков, камеры подшипниковых узлов, отверстия для подвода смазки и охлаждающей воды, технологические отверстия для монтажа клетки. В камеры станины подают жидкую циркулирующую смазку для подшипников и зубчатых передач. Для герметизации подшипниковых узлов резиновые уплотнения крышек при сборке наполняют густой смазкой. В процессе работы клетки густая смазка в этих местах не пополняется, что является недостатком конструкции клетки данного типа — при работе происходит разгерметизация подшипников, появляется утечка жидкой смазки.

Техническая характеристика трехвалковой клетки модели I

Станина:	
диаметр, мм	960
ширина, мм	280

Валки:	
начальный диаметр, мм	330
ширина бочки, мм	115
расстояние между опорами, мм	200
Масса клетки в сборе, кг	935
Максимально допустимый крутящий момент прокатки, кН·м	4,84
Максимально допустимое усилие на валки, кН	61,6
Максимальная частота вращения валков, об/мин	660

В последнее время ЭЗТМ освоил выпуск более совершенных трехвалковых клеток типа VY-69 для редуционных и калибровочных станков. Клеть VY-69 (рис. 3) состоит из литого неразъемного корпуса 5 закрытого типа, в расточках которого на подшипниках качения смонтированы три оси под углом 60° друг к другу. На осях установлены валки 1, 2 и 4, образующие калибр. Размеры калибра не регулиру-

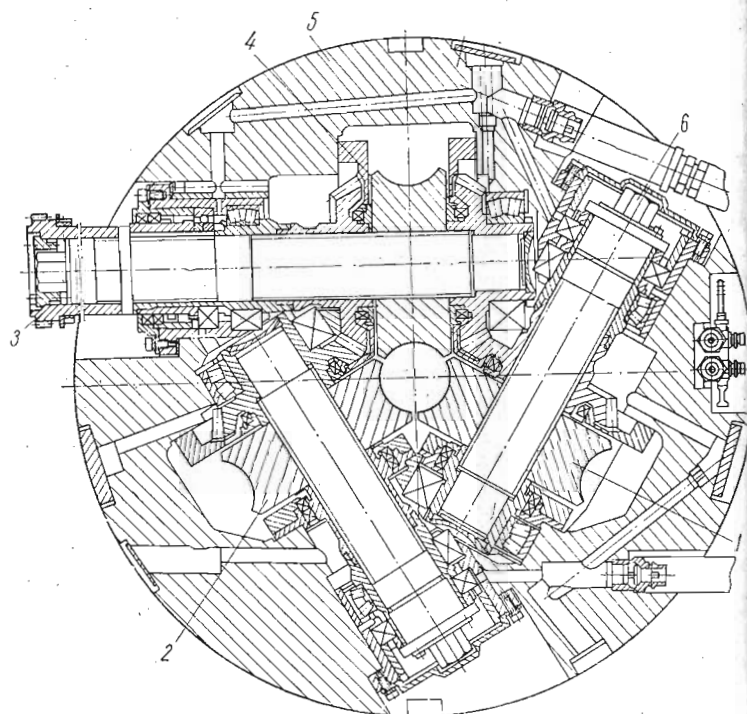


Рис. 3. Трехвалковая рабочая клеть VY-69 конструкции ЭЗТМ.

емые, их выполняют при расточке валков в собранной клетке на специальном станке.

Каждая ось установлена на двух подшипниковых опорах. Опоры с коническими однорядными спаренными роликовыми подшипниками зафиксированы в осевом направлении относительно станины и воспринимают осевые усилия, возникающие при прокатке. Опоры с радиальными сферическими двухрядными роликовыми подшипниками не зафиксированы в осевом направлении для компенсации тепловых изменений длины осей и их прогиба. Клеть имеет один приводной вал (он же служит осью горизонтального валка), на котором закреплена зубчатая втулка 3 муфты привода клетки. Две наклонные оси соединены с приводной коническими шестернями с круговым зубом. Через оси валков проходят стяжные болты 6, которыми выбираются продольные люфты валков. Рабочие валки являются сменным инструментом клетки и охлаждаются водой из кольцевого коллектора, закрепленного на станине. Коллектор имеет один подвод, к которому подсоединяют шланг с водой. Охлаждающая вода проходит через пять отверстий диаметром 5 мм, расположенных против каждого рабочего валка. Клеть можно установить приводным валом сверху или снизу, при этом направление вращения валков изменяется. Для фиксации клетки в раме линии стана на станине выполнены два шпоночных паза шириной 50 мм, в один из которых (нижний) входит призматическая шпонка рамы стана.

Кроме системы жидкой централизованной смазки клеть оборудована системой автоматической густой смазки, которая периодически подается в уплотнения подшипниковых узлов, поддерживая постоянную герметизацию уплотнений системы жидкой смазки. На станине клетки имеется панель для крепления питателей густой смазки, а на боковой стенке выполнена кольцевая проточка для разводки трубок подвода густой смазки. Для подвода жидкой смазки в станине имеется система отверстий, образующая каналы смазки, которые соединяют камеры с зубчатыми зацеплениями и узлами подшипников.

Техническая характеристика трехвалковой клетки VY-69

Станина:	
диаметр, мм	960
ширина, мм	300
Валки:	
начальный диаметр, мм	330

Таблица 2

Классификация трехвалковых клетей по группам прокатных станов

ширина бочки, мм	110
расстояние между опорами, мм	382
Масса клетки в сборе, кг	1245
Максимально допустимый крутящий момент прокатки, кН·м:	
в установившемся режиме работы	8
в неустановившемся » »	14
Максимально допустимое усилие на валки, кН:	
в установившемся режиме работы	70
в неустановившемся » »	105
Частота вращения валков, об/мин	100—570

	Размеры прокатываемой круглой стали, мм	Марки прокатываемых сталей	Исходные данные для расчета трехвалковых клетей		
			Скорость прокатки, м/с	Уси- лие про- катки, кН	Мо- мент про- катки, кН·м
Среднесортные станы					
1	30—70	Обычные, конструкционные, низколегированные, 55С2 60С2, 30ХГ2С, 25Г2С	15	170	3,5
2	30—70	Легированные, высоколегированные и специальные (ГОСТ 4543—71, ГОСТ 5950—63, ГОСТ 5632—61, ГОСТ 10500—63)	7	230	4,8
Мелкосортные станы					
3	10—30	Обычные, конструкционные, низколегированные, 55С2, 60С2, 30 Г2С, 25Г2С	20	85	1,8
4	10—30	Легированные, высоколегированные и специальные (ГОСТ 4543—71, ГОСТ 5950—63, ГОСТ 5632—61, ГОСТ 10500—63)	8	120	2,5
Проволочные станы					
5	5—10	Ст0 — Ст3кп (ГОСТ 380—71), сталь канатная, сталь 35 — сталь 85, 65Г, У8А, У7	20—36	25	0,5
6	5—10	Легированные, высоколегированные и специальные (ГОСТ 4543—71, ГОСТ 5950—63, ГОСТ 5632—61, ГОСТ 10500—63)	10	40	0,8
7	5—10	Ст0 — Ст3кп, сталь канатная, сталь 35 — сталь 85, 68ГА, 65Г У8А, У7	60	35	0,7

Трехвалковые клетки нормально работают при скорости прокатки до 11 м/с. Разрабатываются конструкции трехвалковых клетей для более высоких скоростей прокатки.

Трехвалковая клеть для горячего калибрования со скоростью прокатки до 35 м/с разработана в ДонНИИЧермете на базе трехвалковой клетки модели I ЭЗТМ. Она характерна тем, что вместо зубчатых передач на каждом рабочем валу установлен индивидуальный электропривод. Оси валков выходят за пределы станины и с помощью муфты соединяются с валом электродвигателя. Электродвигатели крепятся к станине клетки болтами. Для привода используются фланцевые электродвигатели переменного тока типа АДС-40 мощностью 40 кВт каждый и частотой вращения до 3900 об/мин. В конструкции данной клетки конические зубчатые передачи имеются только между рабочими валками, однако их функция заключается не в передаче крутящего момента прокатки, а в механической синхронизации частоты вращения валков. Эти передачи могут отсутствовать, если имеется надежная электрическая синхронизация привода валков. Перевалку клетки осуществляют после отсоединения электродвигателей.

Имеющийся выбор промышленных трехвалковых клетей является недостаточным для использования их в качестве калибрующих на ряде станов. Невозможно также создать универсальную трехвалковую клеть, техническая характеристика которой удовлетворяла бы условиям прокатных станов различного типа. Проанализировав энергосиловые и скоростные условия прокатки отечественных прокатных станов, а также произведя соответствующие расчеты, можно определить ряд типовых конструкций трехвалковых клетей, которые целесообразно использовать для горячего калибрования сортовой стали. В табл. 2 приведена предлагаемая классификация трехвалковых клетей по группам прокатных станов.

КОНСТРУКЦИЯ И РАСПОЛОЖЕНИЕ КАЛИБРУЮЩИХ УСТАНОВОК

При выборе калибрующих установок руководствуются основными условиями процесса горячего калибрования, которые являются общими для всех типов прокатных станов. Основные условия заключаются в достаточной жесткости крепления трехвалковых клетей и привалковой арматуры, надежности в работе, удобстве и простоте обслуживания. Остальные конструктивные и технологические стороны могут иметь различное решение и зависят от конкретных условий каждого прокатного стана.

Такие факторы, как сортамент прокатываемых на данном стане профилей и марок стали, а также скоростной режим, являются определяющими при выборе электропривода и конструкции трехвалковых клетей, но не изменяют в принципе компоновки и расположения остальных элементов калибрующих установок.

Технология горячего калибрования предусматривает непрерывность процесса в трехвалковых клетях и чередование поворота разъемов последующего калибра на угол 60° (или 180°) относительно предыдущего. Исходя из этого, трехвалковые клетки устанавливают рядом для образования калибрующего блока клетей. Расстояние между клетями блока должно быть по возможности минимальным и может быть ограничено только габаритами привалковой арматуры. Для удобства установки и обслуживания арматуры рекомендуется следующее минимальное расстояние между внутренними габаритными размерами трехвалковых клетей в блоке: 600—650 мм для среднесортных станов и 300—350 мм для мелкосортных и проволочных станов. Максимальное расстояние определяется исходя из обеспечения компактности блока, позволяющей устанавливать его в линии сортовых станов без существенной реконструкции, возможностью поворота профиля вокруг осей на участке между клетями блока и совмещения необработанных поверхностей на металле в предыдущем калибре с разъемами последующего, а также динамикой работы механической системы клетки блока — раскат. Рекомендуется следующее максимальное расстояние между внутренними габаритами клетей: 1,5—2,0 м для среднесортных станов и 0,8—1,0 м для мелкосортных и проволочных станов. Как отмечалось, технологически необходимое количество клетей в блоке не должно быть мень-

ше двух: две клетки с изменением положения разъемов между вальками обеспечивают полный контроль размеров по всему периметру калибруемой стали. Расстояние калибрующего блока от чистовой двухвалковой клетки стана определяется расположением оборудования на этом участке, возможностью прокладки коммуникаций и другими условиями. Ниже приведена характеристика калибрующих блоков,

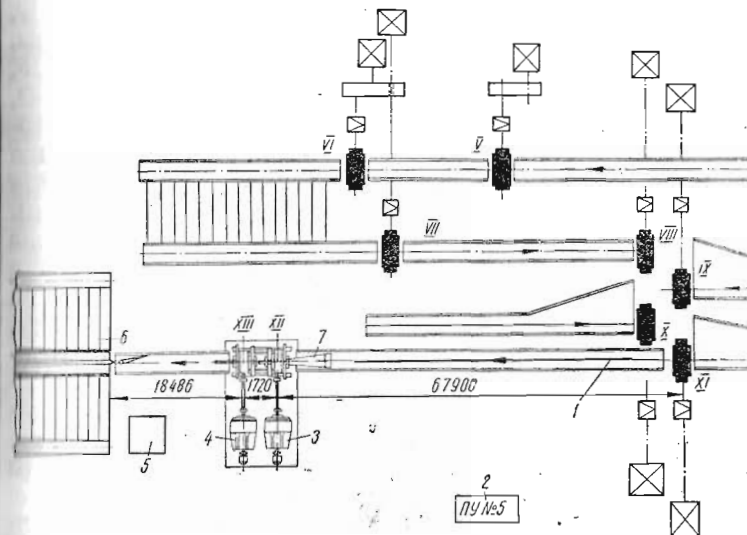


Рис. 4. Схема расположения калибрующего блока в линии среднесортного стана 350-1.

на примере которых можно подробно разобрать конструктивные и технологические стороны их применения.

ДонНИИчерметом совместно с ММЗ разработан калибрующий блок трехвалковых клетей на среднесортном шахматном стане 350-1 [41, 75]. Около 33% всего объема производства на стане составляет круглая сталь диаметром 32—56 мм из углеродистых, конструкционных и низколегированных марок. Масса заготовки находится в пределах 360...550 кг, длина раската после чистовой клетки — 30...65 м, скорость прокатки в чистовой клетке — 8...10 м/с. В состав стана входят 11 двухвалковых клетей [46], калибрующий блок расположен за клетью XI (рис. 4). Раскат I по транспортному отводящему рольгангу за клетью XI поступает к трехвалковым калибрующим клетям XII и XIII через

воронку 7, калибруется и поступает на холодильник 6. Привод клеток индивидуальный от электродвигателей 3 и 4. Управление приводами блока осуществляется с поста 2. Подача смазки — из маслоподвала 5. Габаритные размеры блока составляют $5500 \times 4780 \times 1610$ мм.

На рис. 5 показан продольный разрез калибрующего блока, поясняющий его конструкцию. В комплект собственно блока входят: станина 1, трехвалковые клетки 28 и 9, крышки 27 и 10, коробки 14 и 15 привалковой арматуры, крепежные болты 13 коробок, втулки 11 и 17, воронки 16, трубки 12 и 18, клиновое крепление 19, 20, 21 арматуры, узел регулировки 22—26 арматуры по вертикали, плита 6, центрирующие призмы 3, клиновое крепление 7 и 8 станины к плитовине, фундаментная рама 5, ролики 4 роляганга, шпоночное крепление 2 трехвалковой клетки. В работе блока используются трехвалковые клетки типа ВУ-69. Валки изготовлены из модифицированного чугуна с отбеленным слоем твердостью 60—70 единиц по Шору. При монтаже клеть Х/1 установлена приводным валом книзу, клеть Х/II — приводным валом кверху. Привод трехвалковых клеток осуществляется от двух двигателей постоянного тока номинальной мощностью 200 кВт с частотой вращения 500 ... 1500 об/мин, имеющих принудительное воздушное охлаждение. Пульт управления двигателями и регуляторы скорости установлены на посту управления оператора шахматной группы стана. Для измерения и контроля частоты вращения двигателей установлены тахогенераторы и центробежные регуляторы, а также амперметры и таховольтметры, расположенные на пульте управления и у стола старшего вальцовщика чистовой группы стана. Регулировка частоты вращения двигателей осуществляется в пределах 630 ... 780 об/мин, что соответствует скорости прокатки 9—12 м/с. Для передачи вращения от приводов к клетям блока использованы карданные валы автомобиля КрАЗ с максимальным допустимым крутящим моментом $5,5 \text{ кН} \cdot \text{м}$ и частотой вращения 1600 об/мин.

Трехвалковые клетки и привалковую арматуру монтируют в станину на специальном участке вне линии прокатки. Полностью готовый для прокатки блок устанавливают в линию прокатки стана. Таким образом, перевалку блока осуществляют как обычную перевалку прокатного стана клетями. Для постоянной эксплуатации калибрующего блока предусмотрено три одинаковых станины: одна

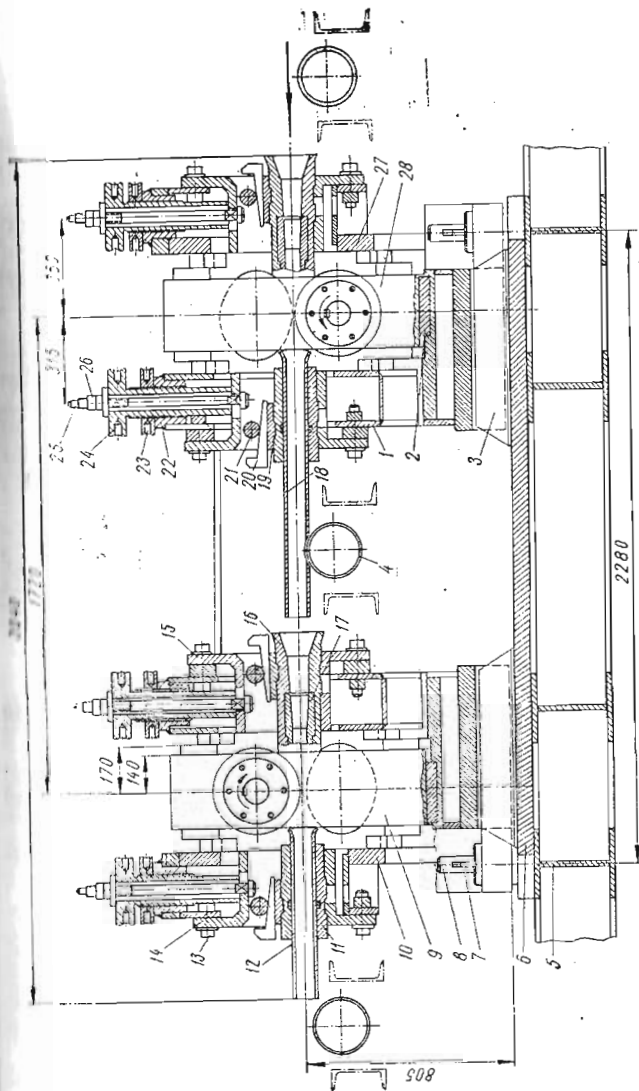


Рис. 5. Продольный разрез калибрующего блока трехвалковых клеток среднесортного стана 350-1.

находится в работе, другая подготавливается для прокатки очередного типоразмера профиля, третья передается на участок сборки блока. Общая масса станины с трехвалковыми клетями и привалковой арматурой составляет 10 т.

Привалковая арматура блока служит для точной подачи раската в трехвалковые клетки, вывода его из валков и направления на отводящий рольганг. В качестве вводной арматуры использованы состоящие из двух половин воронки 16, которые устанавливают в корпус коробки 15 и крепят клиньями 19, 20, 21, и чугунные втулки 17. Коробки с помощью болтов можно регулировать по вертикали и горизонтали. В качестве выводной арматуры применяют трубки 12 и 18 с расширяющейся частью у валков, закрепленные в корпусах 14 с помощью разъемных втулок 11 и клиновых механизмов. Втулки и трубки являются сменным элементом и для каждого размера профиля имеют определенный внутренний диаметр, который больше диаметра профиля на 2—3 мм. Кроме того, на рольганге с передней стороны блока устанавливают направляющие линейки и воронку, а с задней стороны — отводящую трубу длиной 1,5—2 м.

Система жидкой смазки вращающихся деталей трехвалковых клеток состоит из маслобака, насоса, маслопроводов и распределителей, подающих смазку в клетки. Подвод и отвод жидкой смазки типа МС-20 или П-28 осуществляются самотеком, расход смазки на одну клетку составляет 7—16 л/мин. Система смазки к клетям подключается с помощью штуцеров в соответствии с существующей схемой, снабжена световой сигнализацией, показывающей наличие смазки в системе. Густая смазка типа ЭП-1 подается на клетку автоматически для герметизации уплотнений и повышения срока службы уплотнительных колец.

Система водяного охлаждения валков состоит из распределительного коллектора на трехвалковой клетке, штуцера и шланга. Вода на валки подается с выходной стороны клетки XII и с входной стороны клетки XIII. Суммарный расход воды на две клетки составляет 3 м³/ч. После охлаждения валков вода отводится по каналу, проходящему под калибрующим блоком и соединенному с общей системой слива воды на прокатном стане.

На стане 350-1 ММЗ было проведено опробование калибрующего блока, конструктивное решение которого несколько иное, хотя место установки его и принципиальные положения горячего калибрования сохранены прежними.

Калибрующий блок представлял собой две отдельные рамы-тележки на колесах, которые могли передвигаться перпендикулярно линии прокатки. В рабочем положении рамы-тележки крепили болтами к раме фундамента. На каждой из рам-тележек были укреплены трехвалковая клетка и двигатель мощностью 46 кВт. С помощью этого блока было прокатано 5660 т горячекалиброванной круглой стали диаметром 32, 36 и 38 мм. При эксплуатации калибрующего блока были выявлены конструктивные и технологические недостатки: недостаточная жесткость крепления калибрующих клеток и рам-тележек, недостаточная мощность привода, неудобства, связанные с перевалкой блока отдельными клетями у линии прокатки и дополнительными затратами времени на настройку блока в целом в линии прокатки. Более целесообразным было признано стационарное расположение привода блока, а перевалку блока производить отдельной станиной, в которой обе клетки и арматура полностью подготовлены к работе.

В 1973 г. на мелкосортном стане 320 СМЗ пущен в промышленную эксплуатацию калибрующий блок трехвалковых клеток. Стан 320 [46] линейного типа прокатывает круглую сталь диаметром 11—32 мм и шестигранную с диаметром вписанной окружности 12—29 мм (в том числе буровую сталь). В сортамент стана входят легированные и специальные, а также конструкционные и углеродистые марки стали. Масса заготовки находится в пределах 140... 215 кг, длина раската после чистовой клетки доводится до 220 м. Скорость прокатки в чистовой двухвалковой клетке стана равна 4,3—5,2 м/с, объем производства стана — 150 тыс. т в год. В состав стана входят обжимная клетка трио и чистовая линия из восьми клеток переменного дуо.

Разработанный ДонНИИчерметом совместно с СМЗ и установленный на стане калибрующий блок отличается от блока конструкции ММЗ следующими характеристиками. В блоке используются трехвалковые клетки модели I ЭЗТМ с приводом от двигателей постоянного тока мощностью 145 кВт каждый через редукторы с передаточным отношением 1,27. Питаются двигатели от двух управляемых тиристорных выпрямительных агрегатов. Регулировка частоты вращения двигателей производится в пределах 1170... 1330 об/мин, что обеспечивает скорость прокатки в блоке, равную 4,3—5,2 м/с. Пульт управления приводом блока и

контрольно-измерительные приборы установлены у рабочего места старшего вальцовщика.

Схема расположения части основного оборудования калибрующего блока стана 320 приведена на рис. 6. Участок блока включает направляющий желоб 1, воронку 10, трехвалковые клетки 7 и 9, редукторы 8 и 11, двигатели 2 и 3 привода калибрующего блока. За калибрующим блоком находятся барабанные 6 и планетарные 5 летучие ножницы, холодильник 4. Габаритные размеры блока равны $7850 \times 4150 \times 1900$ мм. Расположение блока на стане определено участком порезки металла летучими ножницами.

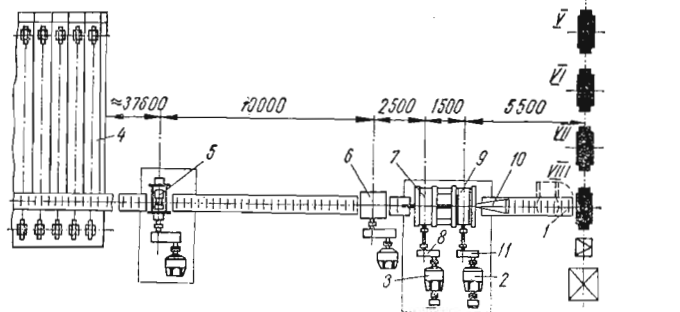


Рис. 6. Схема расположения калибрующего блока в линии мелкосортного стана 320.

С учетом длины раската, выходящего из клетки VIII, за чистовой клетью стана образовалась последовательно расположенная непрерывная трехклетевая группа, включающая двухвалковую клетку VIII и две трехвалковые клетки 7 и 8 блока, в которых металл прокатывают с натяжением. Таким образом, отличительная особенность калибрующего блока стана 320 состоит в том, что горячему калиброванию подвергают мелкосортную сталь из легированных и специальных марок, процесс происходит в непрерывной трехклетевой группе, а также то, что сортамент для блока включает не только круглую, но и шестигранную сталь.

Кроме использования калибрующих блоков на двух указанных станах, Гипромез предусматривает установку

такого блока в цехе по производству биметаллических пальцев тракторов. На рис. 7 приведена принципиальная схема расположения оборудования участка прессования и калибрования прутков. Биметаллический пруток (подкат) изготавливают методом горячего прессования литой заготовки на гидравлическом горизонтальном прутково-профильном прессе 1 усилием 20 МН. Выходящий из пресса

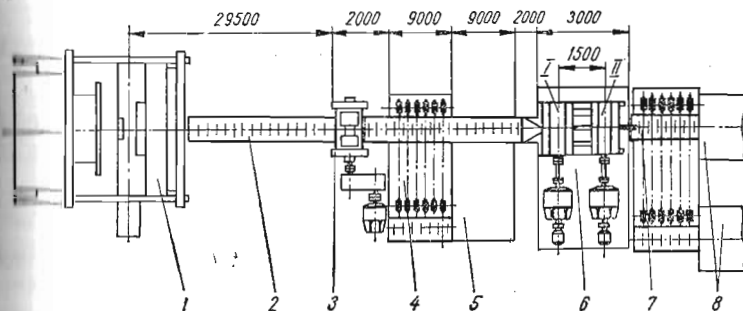


Рис. 7. Схема расположения калибрующего блока в линии прессования и калибрования биметаллических прутков.

пруток имеет диаметр $23 \pm 0,5$ мм и длину 10—20 м. После отрезки пресс-остатка пруток по приводному отводящему рольгангу 2 направляют к летучим ножницам 3, где обрезают передний конец и разрезают пруток на мерные длины 4, 3 ... 6 м. Затем прутки поступают к калибрующему блоку 6 трехвалковых клеток. Трехвалковые клетки имеют следующую характеристику: усилие, с которым металл давит на валки в установившемся режиме, равно 100 кН, крутящий момент на приводном валу клетки — 3,2 кН · м, частота вращения валков — 310 ... 440 об/мин. Клетку I устанавливают приводным валом книзу, клетку II — валом вверх. После горячего калибрования прутки принимают окончательный размер $22 \pm 0,28$ мм и по отводящему рольгангу 7 поступают к термическим печам 8. Термообработанные прутки подвергают правке, очистке поверхности от окалины дробеструйным способом и подают на участок изготовления пальцев тракторов.

В калибрующем блоке протекает непрерывный процесс горячего калибрования биметаллических прутков со скоростью 5—7 м/с при температуре прутков 950—1100° С. Между клетями I и II натяжение раската составляет 5%.

Максимальное обжатие профиля в блоке равно 1,78 мм. При температуре прутка ниже 950° С предусмотрен стеллаж 4 и подогревательная печь 5, в которой прутки подогреваются до требуемой температуры. Производительность всего комплекса составляет до 20 000 т в год.

РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Величины усилий, действующих на станину калибрующего блока, определяют по трем факторам: по крутящим моментам M_1 и M_2 приводов трехвалковых клетей

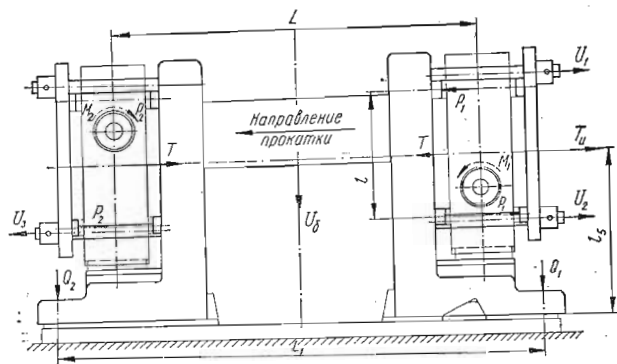


Рис. 8. Расчетная схема станины блока.

натяжению T металла между клетями блока или между первой клетью блока и чистовой клетью стана и инерционным усилиям $T_{\text{и}}$ (рис. 8).

Крутящие моменты приводов клеток блока определяю силы, действующие на первую клеть:

$$P_1 = \frac{M_1}{l}$$

и на вторую клетку:

$$P_2 = \frac{M_2}{l},$$

где l — расстояние между боковыми опорами трехвалковой клетки.

Максимальное значение этих сил

$$P_{\text{макс}} = \frac{M_{\text{дв}}}{l},$$

где $M_{\text{дв}} = 975 \frac{W}{n}$ — максимально возможный крутящий момент привода, кН · м; W — мощность электропривода, кВт; n — частота вращения привода, об/мин.

Максимальное значение силы натяжения металла [61]

$$T_{\text{макс}} = \frac{2M_{\text{дв}}}{D_{\kappa}}, \quad (4)$$

где D_k — катающий диаметр валков трехвалковой клетки.

Инерционные силы T_n , вызываемые неравномерным движением калибруемого раската [61],

$$T_a = \frac{U}{g} j, \quad (5)$$

где U — вес раската; g — ускорение свободного падения; j — ускорение движения калибруемого раската.

Уравнение равновесия инерционных сил в момент за-
хвата раската тремя валками первой клетки блока (рис. 9)

$$T_{\text{н}} = 3F \cos \alpha - 3N \sin \alpha, \quad (6)$$

где $F = \frac{2M_1}{3D_k}$ — касательные силы, приложенные к раскату со стороны валков; α — угол захвата металла валками; $N = \frac{F}{v_3}$ — нормальные силы; v_3 — коэффициент трения между валками и металлом в момент захвата.

Подставляя значение этих сил в уравнение (6), получаем

$$T_{\text{H}} = \frac{2M_1 \cos \alpha}{D_K} \left(1 - \frac{\text{tg } \alpha}{v_3} \right). \quad (7)$$

Сила инерции увеличивается с уменьшением угла захвата β , а максимально возможное значение этой силы можно определить из уравнения

$$T_{\text{и.макс}} = \frac{2M_{\text{дв}}}{D_{\text{к}}} \quad (8)$$

Приведенные зависимости позволяют определить усилия, действующие на элементы конструкции станины кабрирующего блока.

Максимальные значения растягивающих сил, действующих на стяжки первой трехвалковой клетки, возникают в

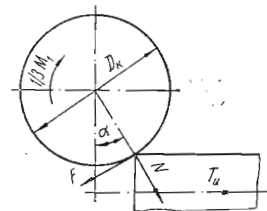


Рис. 9. Схема сил, действующих на полосу со стороны одного валка в момент захвата.

момент захвата металла этой клетью при значениях $M_1 = M_{др}$ и $T_n = T_{н.макс}$. В этом случае (рис. 8) расчетное усилие на верхней стяжке

$$U_1 = \frac{T_{н.макс}}{2} - P_1 = M_{дв} \left(\frac{1}{D_k} - \frac{1}{l} \right) \quad (9)$$

и на нижней стяжке

$$U_2 = \frac{T_{н.макс}}{2} + P_1 = M_{дв} \left(\frac{1}{D_k} + \frac{1}{l} \right). \quad (10)$$

Максимальное значение растягивающей силы, действующей на нижнюю стяжку второй клетки блока,

$$U_3 = P_{2макс} = \frac{M_{дв}}{l}. \quad (11)$$

Верхняя стяжка второй клетки растягивающих усилий не воспринимает и служит для надежного прижатия клетки станины.

Расчетными для поперечины станины являются сжимающие усилия $T_{макс}$, определяемые по формуле (5), и изгибающие моменты $M_{изг} = P_{макс} l$, приложенные к крайним сечениям поперечины со стороны стоек.

Стойки станины подвергаются действию изгибающего момента от инерционной силы T_n , максимальное значение которого

$$M_{н.макс} = T_{н.макс} l_5 = \frac{2M_{дв} l_5}{D_k}, \quad (12)$$

где l_5 — расстояние от линии прокатки до основания станины и моментов M_1 и M_2 , максимальные значения которых равны $M_{дв}$.

Опрокидывающий момент, действующий на станину,

$$M_{оп} = M_n - M_1 + M_2. \quad (13)$$

Максимальное значение опрокидывающего момента возможно при $M_1 = 0$ (авария в линии привода первой клетки блока), $M_n = M_{н.макс}$ и $M_2 = M_{дв}$, тогда

$$M_{оп} = \frac{2M_{дв} l_5}{D_k} + M_{дв} = M_{дв} \left(1 + \frac{2l_5}{D_k} \right). \quad (14)$$

Усилия Q_1 и Q_2 (см. рис. 8) на опорах станины блока можно определить по формулам

$$Q_1 = \frac{M_{оп.макс}}{L_1} + \frac{U_6}{2}; \quad (15)$$

$$Q_2 = \frac{M_{оп.макс}}{L_1} - \frac{U_6}{2}, \quad (16)$$

где L_1 — расстояние между опорами; U_6 — вес калибрующего блока (с учетом веса трехвалковых клетей и привалковой арматуры).

Стяжки рассчитывают на максимальное растягивающее усилие U_2 :

$$\sigma = \frac{U_2}{F_T} \leq [\sigma], \quad (17)$$

где F_T — площадь поперечного сечения одной стяжки; $[\sigma]$ — допустимое напряжение.

Напряжения в поперечине не должны превышать величины

$$\sigma = \frac{T_{макс}}{F_n} + \frac{M}{W_n} \leq [\sigma], \quad (18)$$

где F_n — площадь поперечного сечения поперечины; W_n — момент сопротивления изгибу сечения поперечины; M — изгибающий момент.

Для расчета стоек станины примем случай захвата металла валками первой трехвалковой клетью блока при максимальных значениях $M_1 = M_{дв}$ и $T_n = T_{н.макс}$. Рассмотрим в отдельности каждую стойку, заменив действие поперечины соответствующими реакциями (рис. 10).

Изгибающие моменты в правой стойке на участке от $y = 0$ до $y = l_2$

$$M = -U_2(l_2 - y) - U_1(l_4 - y) + U_5(l_3 - y) + M', \quad (19)$$

на участке от $y = l_2$ до $y = l_3$

$$M = U_5(l_3 - y) - U_1(l_4 - y) + M', \quad (20)$$

на участке от $y = l_3$ до $y = l_4$

$$M = -U_5(l_4 - y), \quad (21)$$

где U_5 — горизонтальная реактивная сила; M' — реактивный момент правой стойки.

Изгибающий момент в левой стойке

$$M = M'' - U_5(l_3 - y),$$

где M'' — реактивный момент левой стойки.

Изгибающий момент в правой стойке в сечении у поперечины

$$M = M', \quad (22)$$

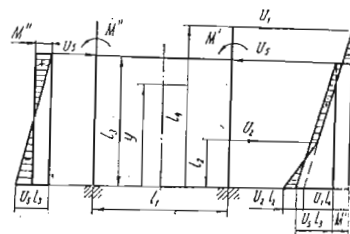


Рис. 10. Эпюры изгибающих моментов в стойках станины блока.

в левой стойке $M = M''$, у основания в правой стойке

$$M = -U_1 l_4 + M' + U_5 l_3 - U_2 l_2, \quad (23)$$

в левой стойке $M = U_5 l_3 + M''$. Тогда расчетное напряжение в стойке

$$\sigma = \frac{M_{\max}}{W_c}, \quad (24)$$

где $M_{\max}$ — максимальное значение изгибающих моментов, определяемое по уравнениям (22) и (23); W_c — момент сопротивления сечения стойки.

Статически неопределимые моменты M' и M'' можно найти по способу Верещагина — Пирле [61]:

для правой стойки

$$\frac{1}{EJ_c} \left(\frac{U_5 l_3^2}{2} - \frac{U_1 l_4^2}{2} - \frac{U_2 l_2^2}{2} + M' l_3 \right) = 0, \quad (25)$$

для левой стойки

$$\frac{1}{EJ_c} \left(M'' l_3 - \frac{U_5 l_3^2}{2} \right) = 0, \quad (26)$$

где E — модуль упругости первого рода материала станины; J_c — момент инерции сечения стойки.

Из формул (25) и (26) получаем

$$M' = \frac{U_5 l_3}{2} - \frac{U_1 l_4^2}{2l_3} - \frac{U_2 l_2^2}{2l_3}; \quad (27)$$

$$M'' = \frac{U_5 l_3}{2}. \quad (28)$$

Величину усилия U_5 , действующего на поперечину, находят из условия

$$f_1 = f_2 + \Delta l_1, \quad (29)$$

где f_1 и f_2 — стрелы прогиба правой и левой стоек; $\Delta l_1 = U_5 l_1 / EF_n$ — деформация растяжения поперечины; l_1 — длина поперечины; F_n — площадь ее сечения.

Значения прогиба стоек [61]

$$f_1 = \frac{1}{EJ_c} \left[-\frac{U_2 l_2^2}{2} \left(l_3 - \frac{l_2}{3} \right) - \frac{U_1 l_4^2}{2} \left(l_3 - \frac{l_4}{3} \right) + \frac{M' l_3^2}{2} + \frac{U_5 l_3^3}{3} \right]; \quad (30)$$

$$f_2 = \frac{1}{EJ_c} \left(-\frac{U_5 l_3^3}{3} + \frac{M'' l_3^3}{2} \right). \quad (31)$$

Подставляя в эти формулы значения M' и M'' из уравнений (27) и (28), получаем

$$f_1 = \frac{1}{EJ_c} \left[U_1 \left(\frac{l_1^3}{6} - \frac{3l_4^2 l_3}{4} \right) + U_2 \left(\frac{l_2^3}{6} - \frac{3l_2 l_3}{4} \right) + \frac{7U_5 l_3^3}{12} \right]; \quad (32)$$

$$f_2 = -\frac{U_5 l_3^3}{12EJ_c}. \quad (33)$$

Подставляя эти значения в уравнение (29), находим

$$U_5 = \frac{-U_1 \left(\frac{l_4^3}{6} - \frac{3l_3 l_4^2}{4} \right) - U_2 \left(\frac{l_2^3}{6} - \frac{3l_2^2 l_3}{4} \right)}{\frac{2}{3} l_3^3 - \frac{l_1 J_c}{F_n}}. \quad (34)$$

Зная величину силы U_5 , можно найти значения моментов M' и M'' по уравнениям (27) и (28) и, выбрав большее, определить напряжение в стойке станины.

При освоении калибрующих блоков авторы неоднократно наблюдали возникающие между трехвалковыми клетями вынужденные поперечные колебания горячего раската в условиях резонанса, когда частота возмущающей силы совпадала с частотой свободных колебаний. Это явление сопровождалось сильными ударами раската о направляющую арматуру между клетями блока и появлением остаточных местных изгибов, периодически расположенных по длине раската, которые не устранялись после правки на роликовых машинах.

Возмущающей силой в рассматриваемой системе является действие валков трехвалковых клеток блока. Обусловлена возмущающая сила в основном изгибом раската при выходе из предчистовой клетки блока за счет эксцентриситета валков и некоторой разницы в диаметрах валков и натяжением металла между клетями. Частоту возмущающей силы можно определить по формуле

$$\eta = \frac{mv_1}{\pi D_k}, \quad (35)$$

где m — количество валков в одной клетке блока; v_1 — скорость прокатки в блоке, м/с.

Условие резонанса системы калибрующий блок — полса, в первом приближении, может быть определено по

формуле [40]

$$\eta = \frac{\pi \beta_n^2}{2L^3} \sqrt{\frac{E\chi^3}{q}}, \quad (36)$$

где β_n — коэффициент формы колебаний ($\beta_1 = 1,5056$, $\beta_2 = 2,4997$); L — расстояние между клетями блока (рис. 8), м; E — модуль упругости первого рода калибруемого материала, кН/м²; $\chi = \frac{r}{2}$ — половина радиуса калибруемого круглого проката, м; q — плотность калибруемого материала, кг/м³.

Из формулы (36) можно определить резонансное расстояние L между клетями блока, которое при заданных скоростных параметрах горячего калибрования, диаметрах валков трехвалковых клетей и калибруемого металла приводит к значительным поперечным колебаниям раската внутри блока. Принятое расстояние $L = 1,72$ м между клетями блока конструкции ММЗ близко к расчетному резонансному, определенному по формуле (36) для круглой стали диаметром 32—40 мм. В этом случае требуются специальные меры для устранения указанных явлений. В качестве такой меры принят метод акустической развязки [40, 56], который заключался в том, что внутренний диаметр трубок 12 (см. рис. 5) привалковой арматуры стали выполнять на 2—3 мм больше диаметра калибруемого профиля, т. е. сократили до минимума зазор. Такая мера позволила полностью исключить явление резонансных колебаний калибруемого металла. При разработке калибрующих блоков принятое расстояние между клетями следует проверять по формуле (36).

ПОДГОТОВКА КАЛИБРУЮЩИХ БЛОКОВ К РАБОТЕ

Подготовка блоков к работе включает следующие этапы: изготовление рабочих валков для трехвалковых клетей; сборку трехвалковых клетей; черновую нарезку калибров; чистовую расточку калибров; проверку рабочих клетей; подготовку привалковой арматуры; монтаж блока на стенде; установку калибрующего блока в линии стана.

Особую важность приобретает операция чистовой расточки трехвалковых калибров, так как от тщательности ее выполнения и качества расточки калибров зависит точность калибруемого металла и, следовательно, эффективность

работы блока. Опыт создания оснастки для нарезки калибров на существующем оборудовании и установок для шлифовки калибров трехвалковых клетей на ММЗ и СМЗ заключается в следующем. Рабочие валки изготавливают из литой цилиндрической полой заготовки и обрабатывают на токарном станке в две стадии. Вначале обрабатывают боковые поверхности и посадочные отверстия под втулку и

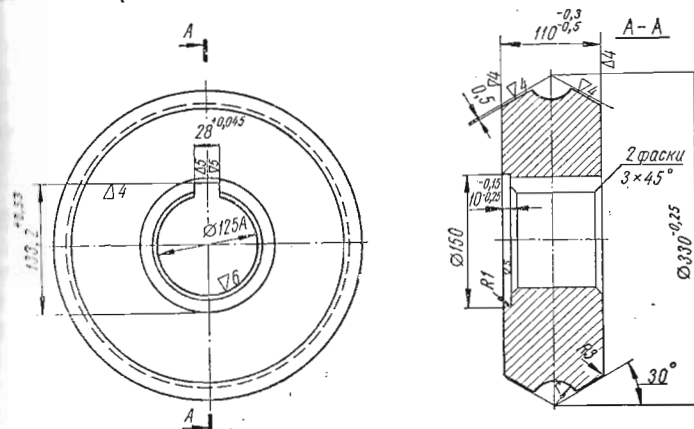


Рис. 11. Чертеж рабочего валка клетки блока.

производный паз, а затем, после запрессовки втулки, производят проточку ручья и буртов валка на специальной оправке (рис. 11). Последующая разборка узла валок — втулка не допускается. Установку валков в трехвалковую клеть и ее окончательную сборку производят в соответствии с инструкцией по эксплуатации данного типа клетей. Монтаж и демонтаж трехвалковых клетей выполняют на специальном стенде. Клеть укладывают на стенд на уровне 400—500 мм от пола, чтобы обеспечить удобное расположение клетей для работающих. На стенде укрепляют ограничители, фиксирующие положение клетки, и специальный домкрат для извлечения и установки осей рабочих валков.

Черновую нарезку калибров выполняют в собранной клетке на токарном станке. Устанавливают клетку в специальной постели на параллелях станины станка. Вращение валкам передается через карданный вал, концы которого соединяют с приводным валом клетки и патроном станка. Ручьи калибра нарезают на каждом валке в отдельности с помощью специальных резцедержателей, закрепляемых на суппорте

станка, и резцов, заточенных по шаблону для данного размера калибра. Форму и размеры калибра проверяют проходной и непроходной пробками. Диаметр проходной пробки

$$d_{\text{п}} = d_{\text{вп}} - 0,5$$

и непроходной

$$d_{\text{нп}} = d_{\text{п}} + 0,1,$$

где $d_{\text{вп}}$ — диаметр калибра, мм.

После черновой нарезки калибра остается припуск 0,4—0,6 мм по диаметру калибра, который обеспечивает получение точных размеров калибра после чистовой расточки. Чистовую расточку калибра осуществляют путем шлифования на установке, состоящей из двигателя привода клетки, редуктора, карданного вала, постели клетки с наклонными растяжками и стола подачи, на котором закреплен двигатель с оправкой для абразивного инструмента. Стол можно перемещать в трех взаимно перпендикулярных направлениях, что позволяет устанавливать абразивный инструмент в требуемое положение. Двигатель привода клетки мощностью 5—10 кВт и редуктор обеспечивают частоту вращения валков, равную 20 об/мин. Двигатель с абразивным инструментом имеет мощность 1—2 кВт и частоту вращения 2500—3000 об/мин.

Перед шлифовкой трехвалковую клеть устанавливают на постели и закрепляют абразив на оправке. Перекос, люфты и вибрация клетки и абразива не допускаются. Для калибров подбирают соответствующего диаметра абразивные круги, которые затем заправляют на необходимый диаметр алмазным карандашом. В общем случае диаметр рабочей части шлифовального круга меньше диаметра калибра, поэтому обработка ручьев абразивом производится внутри калибра. Шлифовку калибра начинают с очистки поверхности валков от рисок и волнистости, возникающих при токарной обработке. Затем проверяют размер и форму калибра с учетом люфтов, упругой деформации клетки и ошибок при токарной обработке путем прокатки алюминиевого образца длиной 40—50 мм с обжатием 1 мм.

При подготовке комплекта клетей последовательно обрабатывают предчистовой, а затем чистовой калибры. В окончательно подготовленном предчистовом калибре прокатывают 7—8 алюминиевых образцов, которые исполь-

зуют для контроля точности шлифовки чистового калибра. Прокатанные в двух калибрах образцы не должны иметь следов рисок, подрезов, закатов и переполнения. Овальность образцов не должна превышать 0,03—0,05 мм. Для оперативного контроля размеров шлифуемых калибров целесообразно использовать нутромер индикаторного типа соответствующего диапазона измерений. После шлифовки калибров до заданного размера скругляют острые кромки и бурты валка по заданному радиусу с помощью фигурного резца. В предчистовом калибре делают выпуски в соответствии с калибровкой для данного профиля. Геометрию каждого ручья предчистового калибра с выпусками проверяют шаблоном.

Изложенную технологию черновой и чистовой расточки трехвалковых калибров используют в условиях ММЗ и СМЗ на первом этапе эксплуатации калибрующих блоков. При дальнейшем расширении объема и сортамента калибруемого металла эта технология может стать узким местом в подготовке калибрующих клетей к работе. Поэтому для расточки калибров целесообразно использовать специальное оборудование, отличающееся высокими технико-эксплуатационными качествами. Для расточки калибров трехвалковых клетей редукционных станков применяют расточные станки модели КЖ-2615, КЖ-2619 и их модификации, изготавливаемые Краматорским заводом тяжелого станкостроения им. В. Я. Чубаря. Обработку валков на этих станках производит вращающейся оправкой с резцом. Диаметр нарезаемых калибров составляет 20 ... 103 мм. Один станок может обслуживать весь парк трехвалковых клетей прокатного стана.

При расшлифовке трехвалковых калибров для прокатки катанки применяют станки, выпускаемые фирмой «Кокс» [77]. Каждый валок в отдельности шлифуют со стороны боковой поверхности клетки, что обеспечивает возможность нарезки калибров различных размеров и формы. Абразивный инструмент заправляют на требуемые размеры и форму алмазной заточной головкой с копировальным механизмом. Станок оборудован оптической системой, которая обеспечивает проецирование на экран калибра с 20-кратным увеличением. Сравнивая контур калибра на экране с шаблоном, можно с высокой точностью производить обработку валков. Станок фирмы «Кокс» обеспечивает обработку трехвалковых калибров с точностью размеров $\pm 0,02 \dots \pm 0,04$ мм

и чистотой обрабатываемой поверхности, соответствующей 8—10-му классу.

Черновую нарезку шестигранных калибров для калибрующего блока стана 320 СМЗ осуществляют на станке ДИП-500 аналогично нарезке круглых калибров. Чистовую обработку валков выполняют с помощью специальной приставки по принципу бокового шлифования (как на станке фирмы «Кокс»).

Трехвалковые клетки используют для калибрования профиля от наименьшего размера к наибольшему (из сортамента данного стана) без демонтажа и замены валков. Если интервал между размерами соседних профилей невелик (до 1,0 мм), то переточку калибра можно выполнять шлифованием. При интервале более 1,0 мм нужно производить черновую нарезку калибра большего размера на токарном или расточном станке. После износа калибра наибольшего размера для данного стана трехвалковую клеть демонтируют и заменяют валки.

Подготовленные к работе трехвалковые клетки и привалковую арматуру устанавливают в сменной станине калибрующего блока на специальном участке в прокатном цехе. Клетки собирают в станину комплектно для каждого прокатываемого профиля, при этом каждая клеть имеет определенное место в блоке, о чем указывается в паспорте приемки клетки. Монтаж и настройку блока выполняют в такой последовательности. Клетки, установленные в станину, закрепляют с помощью крышек и зажимных винтов. Сменные элементы привалковой арматуры закрепляют клиньями, и добиваются соосности трехвалковых калибров, втулок и трубок. Настройку арматуры выполняют поочередно на каждой клетке с использованием подсветки переносной лампой. После настройки арматуру закрепляют болтами. Смонтированный и настроенный блок транспортируют краном к линии прокатки и устанавливают на рабочее место. Благодаря наличию центрирующих направляющих установку станины блока по оси прокатки выполняют достаточно точно. Для подготовки блока к работе выполняют последние операции: укрепляют раму на плитовине с помощью четырех клиновых соединений; соединяют и фиксируют разъемные части карданных валов, соединяющих приводные валы клетей с приводом; подключают нагнетающий и сливной шланги системы жидкой смазки, а также питающий шланг системы водяного охлаждения; устанавливают во-

лоску и направляющие линейки с передней стороны блока. Операцию монтажа блока в линии прокатки выполняют три человека в течение 10—15 мин. Перед пуском двигателей блока включают системы жидкой смазки, водяного охлаждения и, убедившись в их исправной работе, включают привод блока.

Необходимым элементом подготовки к работе калибрующего блока является изготовление и проверка измерительных шаблонов для каждой калибруемой стали, которыми пользуются на стане при контроле размеров готового проката. Шаблоны для работы с калибрующим блоком изготавливают по 4 и 5-му классам точности на калиброванную сталь (ГОСТ 7417—57) или по высокой точности (ГОСТ 690—71) в зависимости от заданной программы прокатки.

Глава III

ОСНОВЫ ТЕОРИИ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГОРЯЧЕГО КАЛИБРОВАНИЯ

МЕТОДИКА РАСЧЕТА КРУГЛЫХ И ШЕСТИГРАННЫХ КАЛИБРОВ

При горячем калибровании круглой стали в двухклеточном калибрующем блоке трехвалковых клетей применяется система круглых калибров с диаметрами d_1 и d_2 в максимально нагруженном состоянии клетей (рис. 12). В первой (предчистовой) клетке происходит основная доля деформации металла в блоке. В местах разъема валков необходимо предусматривать технологические выпуски, величина которых зависит от максимально допустимого обжатия металла, абсолютного размера калибра и определяется углом 2β и шириной выпуска $b = AC$ (рис. 12, а). Технологический выпуск в плоскости калибра образуется касательными к контуру калибра из точки B пересечения контура подката диаметром d_0 с осью, проходящей через середину зазора между валками. Во второй (чистовой) трехвалковой клетке блока в основном осуществляется обкатка выступов, оставшихся на поверхности металла в местах технологических выпусков калибра первой клетки без обжатия металла по всему контуру. Калибр чистовой клетки не имеет технологических выпусков (рис. 12, б).

В максимально нагруженном состоянии

$$d_1 = d_2 = \alpha_T (d_n - \Delta d + f_d), \quad (3)$$

где α_T — коэффициент линейного расширения калибруемого материала; d_n — номинальный диаметр круглой стали в холодном состоянии; Δd — отрицательное допускаемое отклонение; f_d — пределы упругой деформации калибра в диаметральной плоскости.

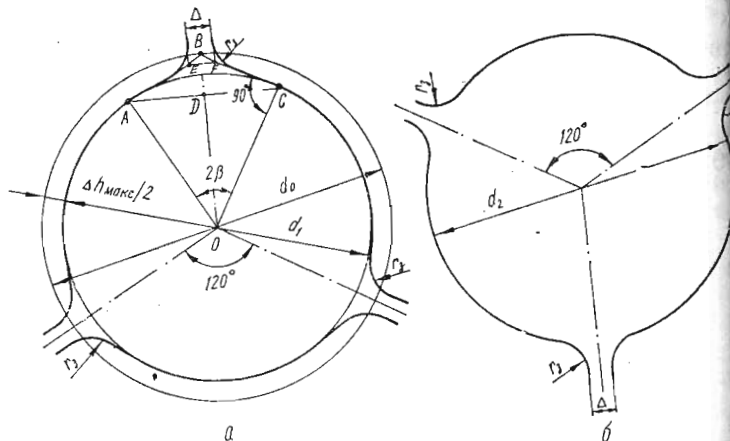


Рис. 12. Круглые калибры блока:
а — предчистовой; б — чистовой.

Максимальный диаметр подката для калибрующего блока

$$d_0 = d_1 + \Delta h_{\max}, \quad (38)$$

где $\Delta h_{\max}$ — максимальное обжатие металла в предчистовой калибровке.

Параметры выпусков калибра определяются из треугольников AOB и AOD (рис. 12, а):

$$\cos \beta = \frac{OA}{OB} = \frac{r_1}{r_1 + 0,5 \Delta h_{\max}}; \quad (39)$$

$$b = 2AD = 2r_1 \sin \beta. \quad (40)$$

Часть окружности диаметром d_1 , ограниченная выпусками для трехвалкового калибра, характеризуется коэффициентом

$$k_u = \frac{3\beta}{\pi} = 0,955\beta. \quad (41)$$

Радиус закругления кромок валков на участках

$$r_3 = (0,08 \dots 0,1) d_1. \quad (42)$$

Подготовленные к работе калибры чистовой и предчистовой калибровки должны отличаться по размерам и форме от круглых с учетом жесткости трехвалковой калибровки с тем, чтобы в процессе горячего калибрования калибр максимально приближался к форме круга. Правильный учет этого фактора определяет точность геометрических размеров проката и качество его поверхности. На примере предчистового трехвалкового круглого калибра блока (рис. 13) проанализируем динамику формы и размеров калибра в зависимости от упругой деформации валков без учета выпусков и зазоров. Если калибр при максимальном расчетном давлении металла на валок имеет правильную круглую форму с радиусом $r_1 = d_1/2$, то в свободном состоянии каждой ручей оказывается смещенным относительно центра O калибра на величину $OO_1 = f_0$ максимальной упругой деформации валка, включающей зазоры в элементах калибровки, и калибр приобретает овальную форму. Радиус вписанной окружности такого калибра

$$r_{\text{вп}} = r - f_0, \quad (43)$$

а радиус описанной окружности

$$r_{\text{оп}} = \sqrt{r_1^2 - \frac{3}{4} f_0^2} - \frac{1}{2} f_0. \quad (44)$$

Пренебрегая в подкоренном выражении уравнения (44) вторым слагаемым, получаем

$$r_{\text{оп}} = r_1 - \frac{1}{2} f_0. \quad (45)$$

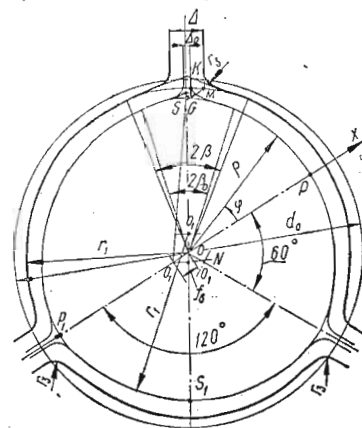


Рис. 13. Расчетная схема круглого предчистового калибра.

Угол β_0 , характеризующий выпуск ненагруженного калибра, можно определить из уравнения

$$\operatorname{tg} \beta_0 = \frac{r_1 \sin \beta - \frac{\sqrt{3}}{2} f_0}{r_1 - f_0}. \quad (46)$$

Уравнение каждого ручья относительно центра калибра принятого за полюс, в полярных координатах имеет вид [9]

$$\rho^2 + 2\rho f_0 \cos \varphi + f_0^2 = r_1^2, \quad (47)$$

где ρ — текущее значение радиуса; φ — угол между текущим радиусом и полярной осью Ox , проходящей через центр ручья.

Из уравнения (47)

$$\rho = -f_0 \cos \varphi \pm \sqrt{r_1^2 - f_0^2 \sin^2 \varphi}. \quad (48)$$

Уравнение (48) является основным, характеризующим динамику формы и размеров не абсолютно жесткого круглого калибра, и применимо для круглого калибра при любом количестве валков. Величина, задаваемая при нарезке калибра,

$$f_0 = \frac{P_{\text{т:акс}}}{c} + \Delta_3,$$

где $P_{\text{макс}}$ — максимальное расчетное давление при горячем калибровании круглого профиля соответствующего размера; c — жесткость рабочего валка трехвалковой клетки; Δ_3 — величина зазоров в элементах конструкции клетки.

В процессе горячего калибрования в результате упругой радиальной деформации каждого валка на некоторую переменную величину f_v расстояние от полюса O до центра O_1 отрезков окружности с радиусом r_1 по абсолютному значению будет

$$f_v = f_0 - f_y. \quad (49)$$

При $f_y < f_0$ величина $f_v < 0$, при $f_y = f_0$ калибр принимает форму правильного круга, а при $f_y > f_0$ контур калибра выходит за пределы круга, т. е. $f_v > 0$.

Величина диаметральных размеров калибра на участке дуги PS , ограниченной углом 60° , при одинаковой упругой деформации каждого из трех валков составляет

$$d_\varphi = \rho_\varphi + \rho_{60-\varphi}. \quad (50)$$

На остальных участках контура калибра характер изменения диаметральных размеров аналогичен рассмотренному. На рис. 14 показано изменение радиальных размеров по контуру калибра при $f_v < 0$, $f_v = 0$ и $f_v > 0$ от оси x против хода часовой стрелки (рис. 13). Графики построены в отклонениях радиуса $\Delta r_\varphi = r_1 - \rho$, единых для всех размеров круглой стали с погрешностью, не превышающей тысячных долей миллиметра.

Изменение экстремальных значений радиальных размеров в зависимости от величины и знака f_v графически показано на рис. 15 в виде $\rho_{\text{макс}} - r_1 = F(f_v)$. Принятие

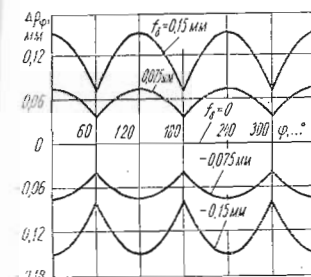


Рис. 14. Графики изменения радиальных размеров калибра при различных значениях f_v .

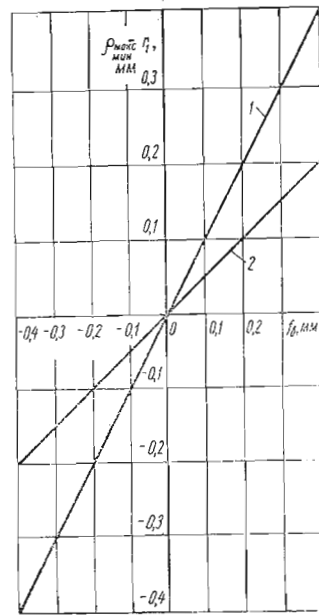


Рис. 15. График зависимости радиальных размеров круглого калибра от перемещений валков:

1 — для максимальных радиальных размеров; 2 — для минимальных.

таких единых графиков для всех значений диаметров круглой стали вносит погрешность в исследуемую функцию, не превышающую тысячных долей миллиметра. Анализ полученных графиков позволяет сделать вывод о том, что в случае применения системы двух круглых не абсолютно жестких калибров в блоке процесс горячего калибрования нормально может осуществляться только ниже линии $f_v < 0$. При этом условии участки калибруемого металла после первой трехвалковой клетки блока с радиальными размерами, соответствующими угловым координатам $\varphi = 0$,

120 и 240° (дно предчистового калибра, рис. 13), поступают в чистовой трехвалковый калибр (рис. 12) на участки его разъемов, где радиальный размер больше и соответствует угловым координатам $\varphi = 60, 180$ и 300° (рис. 14). Уширение металла в чистовом калибре отсутствует и поэтому затекания металла в зазор между валками быть не может. Участки же калибруемого металла, соответствующие разъемам предчистового калибра блока, с выступами в чистовом

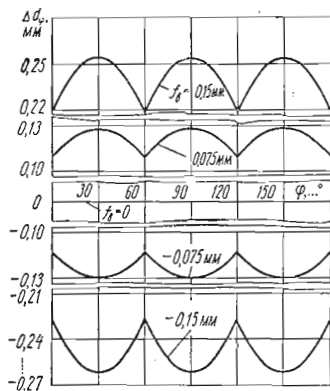


Рис. 16. Графики измерения диаметральных размеров по контуру калибра.

диаметральных размеров калибра (рис. 16) при значениях f_b , аналогичных приведенным на рис. 14. Отклонения $\Delta d_\varphi = d_1 - d_\varphi$ единые для всех размеров круглой стали с погрешностью, не превышающей 0,07%. Периодичность повторения диаметральных размеров составляет 60° , что в два раза чаще по сравнению с изменением радиальных размеров. Максимальные значения d_φ при $f_b < 0$ и минимальные при $f_b > 0$ соответствуют осям разъемов калибра, а минимальные значения при $f_b < 0$ и максимальные при $f_b > 0$ — углу $\varphi = 30^\circ$ с периодичностью в 60° . Изменение экстремальных значений диаметральных размеров в виде $d_{\text{макс}} - d_{\text{мин}}$ —

— $d_1 = F(f_b)$ графически изображено единой зависимостью для всех диаметров с ошибкой не более 0,02% (рис. 17). При равных величинах f_b разница между максимальным и минимальным значением диаметральных размеров значительно меньше, чем для радиальных размеров. На рис. 18 показано изменение овальности калибра $\Delta d = d_{\text{фмакс}} -$

— $d_{\text{фмин}}$ в зависимости от f_b для всех значений диаметров. Такой график позволяет оценить возможность трехвалкового калибра с точки зрения обеспечения заданной овальности круглой стали при определенной жесткости клетки, либо

выбирать необходимую жесткость при конструировании новых клеток.

Теоретически предельный минимальный диаметр $d_{1\text{пр}}$ круглой стали, горячее калибрование которой можно осуществить по условию жесткости имеющихся трехвалковых клеток, определяется из формулы (43):

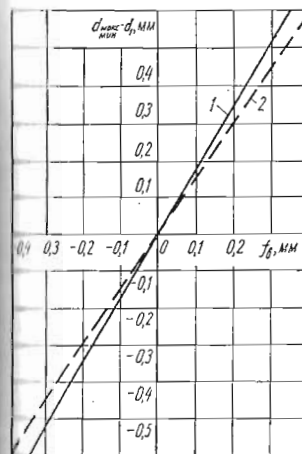


Рис. 17. График зависимости диаметральных размеров круглого калибра от перемещений валков:

1 — для максимальных значений; 2 — для минимальных.

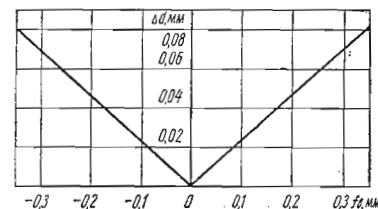


Рис. 18. График зависимости овальности калибра от перемещения валков.

$$d_1 = d_{\text{вп}} + 2f_0 = d_{\text{вп}} + 2\frac{P}{c}, \quad (51)$$

так как предельное условие соответствует $d_{\text{вп}} = 0$, то $d_{1\text{пр}} = 2f_0$.

Графически зависимость $d_{\text{вп}} = F\left(d_1, \frac{P}{c}\right)$ показана на рис. 19. Таким образом, искомый предельный диаметр калибра равен удвоенной величине упругой деформации валка при существующем давлении металла. Упругая деформация валка определяет и минимально допустимую величину зазора $\Delta_{\text{мин}}$ в раземе валков при горячем калибровании стали соответствующего диаметра. Из треугольника KMG (см. рис. 13).

$$\Delta_{\text{мин}} = \sqrt{3}f_0. \quad (52)$$

Рассмотренное изменение формы и размеров круглого калибра относится к симметричной упругой деформации опор валков. В существующих конструкциях трехвалковых клетей опоры валков иногда расположены несимметрично относительно центра ручья, что вносит дополнительные искажения калибра в процессе прокатки металла. На расчетной схеме (рис. 20) приняты следующие обозначения: l — расстояние между опорами валка; l_1 и l_2 —

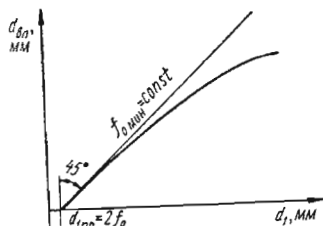


Рис. 19. График предельных размеров калибруемых профилей.

расстояние от центра ручья до опор ($l_1 > l_2$); D_0 — идеальный диаметр валка; f_0 , f_1 — деформация опор. Уравнение каждого ручья такого калибра в полярных координатах относительно центра калибра O , принятого за полюс, имеет вид

$$\rho^2 + 2\rho\rho_0 \cos(\varphi - \varphi_0) + \rho_0^2 = r_1^2, \quad (53)$$

где $\rho_0 = OO_2$ — величина смещения центра калибра в результате несимметричной деформации опор; φ_0 — угол между осью OA ручья и линией OO_2 .

Рассмотрим решение задачи для абсолютно жестких валков, т. е. когда их прогибом можно пренебречь. Из треугольника AOO_2

$$\rho_0 = \sqrt{(1 - \cos \alpha) \left(\frac{D_0^2}{2} + 2f_0 D_0 + 2f_0^2 + D_0 l_1 \operatorname{tg} \alpha + 2f_0 f_1 \operatorname{tg} \alpha \right) + l_1^2 \operatorname{tg}^2 \alpha};$$

$$\sin \varphi_0 = \frac{D_0 + 2f_0}{2\rho_0} \sin \alpha.$$

Величина угла перекоса валка

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{f_1 - f_0}{l} = \frac{P}{l^2} \left(\frac{l_1}{c_2} - \frac{l_2}{c_1} \right), \quad (56)$$

где c_1 и c_2 — жесткости опор валка; P — усилие, с которым металл давит на валок.

Основное уравнение, характеризующее форму и размеры калибра, на основании формулы (53) имеет вид

$$\rho = -\rho_0 \cos(\varphi - \varphi_0) \pm \sqrt{r_1^2 - \rho_0^2 \sin^2(\varphi - \varphi_0)}. \quad (57)$$

Для того чтобы в результате несимметричной упругой деформации элементов клетки в процессе прокатки калибр принял форму, максимально приближающуюся к круглой, при нарезке ручья необходимо предусматривать смещение режущего инструмента в горизонтальном направлении на величину (рис. 20)

$$\Delta_r = O_2 B = \rho_0 \sin \varphi_0, \quad (58)$$

в вертикальном направлении на величину

$$\Delta_b = OB = \rho_0 \cos \varphi_0. \quad (59)$$

При необходимости учета прогиба f_u вала, когда в треугольнике AOO_2

$$AO = \frac{D_0}{2} + f_0 + f_u + l_1 \operatorname{tg} \alpha \text{ и } AO_2 = \frac{D_0}{2} + f_0 + f_u,$$

уравнение (57) принимает вид

$$\rho_0 = \left[(1 - \cos \alpha_1) \left(\frac{D_0^2}{2} + 2D_0 f_0 + 2D_0 f_u + 2f_0^2 + 4f_0 f_u + D_0 l_1 \operatorname{tg} \alpha_1 + 2f_0 l_1 \operatorname{tg} \alpha_1 + 2f_u^2 + 2f_u l_1 \operatorname{tg} \alpha_1 + l_1^2 \operatorname{tg}^2 \alpha_1 \right) \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (60)$$

и уравнение (55)

$$\sin \varphi_0 = \frac{D_0 + 2f_0 + 2f_u}{2\rho_0} \sin \alpha_1, \quad (61)$$

где $\alpha_1 = \alpha - \Theta$; Θ — угол поворота соответствующего сечения вала на участке расположения валка, обусловленный изгибом вала.

Величина стрелы прогиба f_u вала и угол поворота Θ могут быть определены в каждом конкретном случае по методике, изложенной в работе Н. Н. Беляева [6].

На рис. 21 показано наложение контуров чистового (сплошная линия) и предчистового (штриховая линия) калибров при симметричной деформации опор валков в каждой клетке. Основная задача чистового калибра состоит в обкатке металла на участках технологических выпусков предчистового калибра. К чистовому калибру предъявляются следующие требования: разъемы калибра не должны оставлять следов на поверхности раската; следы технологического

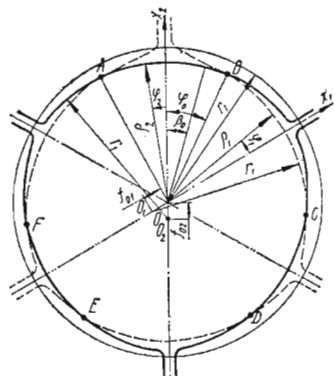


Рис. 21. Схема наложения контуров предчистового и чистового калибров блока.

выпуска предчистового калибра на калибруемом металле должны быть обработаны по всей ширине, соответствующей углу 2β ; должна быть обеспечена минимальная овальность готового профиля. Главное условие обеспечения этих требований состоит в правильном определении упругих деформаций валков клеток в процессе горячего калибрования металла и установлении необходимых соотношений величин этих деформаций.

Ранее было показано, что при максимально допустимых значениях обжатий металла контур в процессе упругой деформации валков не должен выходить за пределы окружности с диаметром d_1 . Давление металла на валки чистовой клетки и их максимальная деформация (рис. 21) меньше, чем для предчистовой клетки, поэтому $f_{01} > f_{02}$, а диаметр вписанной окружности для ненагруженного чистового калибра больше, чем для предчистового. При нагружении калибров текущее значение расстояния от полюса O (центра калибра) до точек O_1 и O_2 определяется для каждого из калибров по аналогии с выражением (49):

$$f_{01} = f_{01} - f_{y1} = f_{01} - \frac{P_1}{c}; \quad (62)$$

$$f_{02} = f_{02} - f_{y2} = f_{02} - \frac{P_2}{c}, \quad (63)$$

где f_{y1} и f_{y2} — текущее значение текущей деформации валков предчистовой и чистовой клеток. P_1 и P_2 — усилие,

которым металл давит на валки в предчистовой и чистовой клетях: c — жесткость рабочих валков клетки.

Контуров калибров пересекаются в точках A, B, C, D, E, F , положение которых определяется углами φ_0 и φ_k , соответственно при нарезке калибра и при нагружении валков. Для обеспечения второго требования, предъявляемого к чистовому калибру, необходимо соблюдение условия $\varphi_k \gg \beta_k$ при заполнении калибров металлом. Текущее значение угла выпуска β_k может быть определено по формуле (46) при подстановке вместо f_0 значения f_{01} по уравнению (62). Текущее значение радиальных размеров по контуру предчистового калибра в зависимости от упругой деформации валков определяется по уравнению (48):

$$\rho_1 = -f_{01} \cos \varphi_1 + \sqrt{r_1^2 - f_{01}^2 \sin^2 \varphi_1}, \quad (64)$$

а чистового калибра

$$\rho_2 = -f_{02} \cos \varphi_2 + \sqrt{r_2^2 - f_{02}^2 \sin^2 \varphi_2}. \quad (65)$$

Для определения угла φ_k , характеризующего положение точек пересечения контура двух калибров, приравниваются выражения (64) и (65). Пренебрегая вычитаемыми в подкоренных выражениях и обозначая $\frac{f_{01}}{f_{02}}$ через k , φ_1 и φ_2 через φ_k , получаем

$$\operatorname{tg} \varphi_k = \frac{2 - k}{k \sqrt{3}}. \quad (66)$$

Изменение угла φ_k в зависимости от k показано на рис. 22. Угол φ_k должен быть всегда больше или равен углу β_k . В соответствии с максимально допустимыми обжатиями металла в предчистовой клетке блока величина угла β для круглой стали диаметром от 5 до 70 мм находится в пределах $22 \dots 12^\circ$, а угол $\beta_0 = 20^\circ 30' \dots 11^\circ 30'$. Для ненагруженного калибра, когда $f_{y1} = f_{y2} = 0$, в указанном диапазоне диаметров величина $k_0 = \frac{f_{01}}{f_{02}} = 1,17 \dots 1,46$. Решая совместно уравнения (62) и (63), находим

$$k = \frac{cf_{01} - P_1}{cf_{02} - P_2}, \quad (67)$$

тогда

$$\operatorname{tg} \varphi_k = \frac{2cf_{02} - 2P_2 - cf_{01} + P_1}{\sqrt{3}(cf_{01} - P_1)}. \quad (68)$$

Уравнение (68) позволяет определять угловые координаты точек пересечения контуров чистового и предчистового калибров в зависимости от давления металла на валки, жесткости валков и исходной формы калибра. Зная величину угла φ_k , можно определить размеры и овальность круглой стали.



Рис. 22. Кривая изменения угла пересечения контура калибров в зависимости от отношения перемещений валков двух клетей.

Для определения диаметральных размеров горячекалиброванной стали необходимо рассмотреть два участка в секторе между осями x_1 и x_2 (см. рис. 21). На первом участке по направлению часовой стрелки от оси x_2 угол $\varphi_2 = \varphi_1$ изменяется в пределах $0 \dots \varphi_k$. Диаметральный размер на этом участке

$$d_\varphi = \rho_{\varphi 1} + \rho_{\varphi 2}. \quad (69)$$

Тогда, с учетом уравнений (64) и (65) и допущений, аналогичных выводу уравнения (66), получаем

$$d_\varphi = d_1 - \left[(f_{01} + f_{02}) - \left(\frac{P_1}{c} + \frac{P_2}{c} \right) \right] \cos \varphi_2. \quad (70)$$

На втором участке угол φ_1 находится в пределах $\varphi_k \dots (60 - \varphi_k)$ в направлении против часовой стрелки от оси x_1 , а диаметральные размеры металла соответствуют только предчистовому калибру и определяются уравнением (50). Аналогично выражению (70) для второго участка

$$d_\varphi = d_1 - \sqrt{3} \left(f_{01} - \frac{P_1}{c} \right) \cos (\varphi_1 - 30). \quad (71)$$

Изменение диаметральных размеров круглой стали по контуру сечения после горячего калибрования в двухклетевом блоке трехвалковых клетей в виде $\Delta d_\varphi = d_1 - d_\varphi = F(\varphi)$ показано на рис. 23. Кривая 1 соответствует условию $f_{B1} = f_{B2} = 0$, кривые 2 и 3 — $f_{B1} = -0,075$ мм и $f_{B1} = -0,15$ мм при $k = 1,13$, кривая 4 — $f_{B1} = -0,2$ мм при $k = 1,3$. Минимальные значения диаметральных размеров после прокатки в двух клетях блока (рис. 16 и 23) соответствуют осям шести разъемов валков (рис. 21), т. е. углам $0,60, 120$ и 180° , максимальные значения имеют также шесть фиксированных положений и соответствуют углам $\varphi_1 = \varphi_2 =$

φ_k . Тогда овальность горячекалиброванной стали

$$\Delta d = d_{\varphi k} - d_{\varphi 0}.$$

Значения величин $d_{\varphi k}$ и $d_{\varphi 0}$ определяются из уравнений (70), (71), отсюда

$$\Delta d = \left(f_{02} - \frac{P_2}{c} \right) + \left(f_{01} - \frac{P_1}{c} \right) [1 - \sqrt{3} \cos (\varphi_k - 30)]. \quad (72)$$

Уравнения (70)–(72) являются основными, характеризующими точность горячекалиброванной круглой стали. На рис. 24 показаны графики изменения радиальных размеров после калибрования в двух клетях блока при значениях f_{B1} и k , аналогичных приведенным на рис. 23.

Горячее калибрование шестигранной стали в двухклетевых блоках трехвалковых клетей можно осуществлять по двум принципиальным схемам (рис. 25). По первой схеме (рис. 25, а) в каждой клетке обжимаются одновременно все грани профиля. Основная доля деформации относится к предчистовому калибру, конструктивно не отличающемуся от предчистового круглого калибра (см.

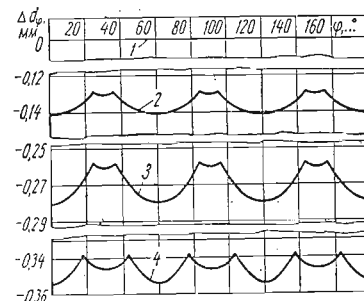


Рис. 23. Графики изменения диаметральных размеров горячекалиброванного круглого профиля по контуру сечения.

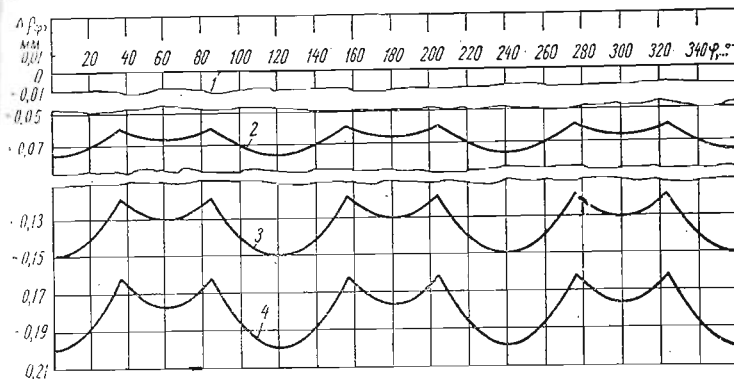


Рис. 24. Графики изменения радиальных размеров горячекалиброванного круглого профиля по контуру сечения.

рис. 12, а). Диаметр d_1 окружности, вписанной в готовый шестигранник, определяется уравнением (37), а в подкат — уравнением (38). По аналогии величина выпуска

$$\cos \beta = \frac{a_1}{a_0}. \quad (73)$$

Форма выпуска образуется, если провести прямую линию из вершины подката. Чистовой калибр имеет то же значение, что и для круглой стали.

По второй схеме (рис. 25, б) обе клетки блока имеют одинаковое назначение: деформируют последовательно три

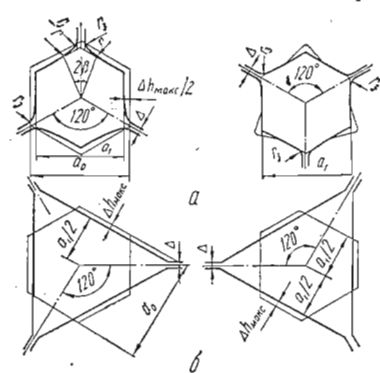


Рис. 25. Схемы калибровки валков при горячем калибровании шестигранного профиля:

а — система калибров шестигранник — шестигранник; б — система калибров трехгранник — трехгранник.

гранях профиля в треугольных калибрах с диаметром вписанной окружности a_1 . Преимущество первой схемы состоит в малой зависимости точности геометрических размеров и формы углов готового профиля от точности подката при достаточной жесткости трехвалковых клетей. Недостатком этой схемы является трудно выполнимое на практике требование обкатки валками чистовой клетки блока всех граней профиля без обжатия. При наличии обжатия могут образовываться выступы на поверхности металла на участках разъема валков чистовой клетки. Если же полной обкатки не будет, то на поверхности готового профиля частично сохраняются участки выступов, обусловленные выпусками предчистового калибра. Преимущество второй схемы состоит в обеспечении планшетности всех граней готового профиля и в простоте подготовки калибров трехвалковых клетей. Однако точность профиля в поперечном сечении при этом в значительной степени зависит от формы и точности подката, определяющих его положение относительно центра как в предчистовой, так и в чистовой клетке блока.

В первой схеме при равной и симметричной упругой деформации каждого валка в процессе прокатки шестигранный

профиль сохраняет правильную форму во всем диапазоне допустимых давлений металла на валки. При максимальном расчетном усилии $P_{\text{макс}}$, с которым металл давит на валок, профиль в горячем состоянии характеризуется диаметром вписанной окружности a_1 , а в свободном от металла состоянии каждый ручей калибра смещен относительно центра калибра на величину максимальной упругой деформации $\Delta_3 = \frac{P_{\text{макс}}}{c} + \Delta_3$ валка. Отсюда основное уравнение точности горячекалиброванной шестигранной стали

$$a = a_1 - \frac{\sqrt{3}}{c} (P_{\text{макс}} - P_1), \quad (74)$$

где a_1 — текущее значение диаметра вписанной в шестигранный профиль окружности; c — жесткость рабочего валка трехвалковой клетки; P_1 — текущее значение усилия, с которым металл давит на валки предчистовой трехвалковой клетки блока; $P_{\text{макс}}$ — максимальное расчетное усилие, с которым металл давит на валки предчистовой клетки блока.

Из уравнения (74) следует, что точность готового профиля проката обеспечивается только предчистовой клетью блока. Диаметр окружности, вписанной в ненагруженный предчистовой калибр,

$$a_{1к} = a_1 - \frac{\sqrt{3}}{c} P_{\text{макс}}, \quad (75)$$

и вписанной в чистовой калибр

$$a_{2к} = a_1 - \frac{\sqrt{3}}{c} P_{2\text{макс}}, \quad (76)$$

где $P_{2\text{макс}}$ — максимальное усилие, с которым металл давит на валки чистовой клетки блока.

Исходя из вышеуказанных условий, текущие значения диаметров окружностей, вписанных в предчистовой и чистовой калибры, должны быть равны между собой. Тогда по уравнению (74) необходимое условие для первой схемы

$$P_2 = P_1 - (P_{\text{макс}} - P_{2\text{макс}}), \quad (77)$$

где P_2 — текущее значение усилия, с которым металл давит на валки чистовой клетки блока.

По второй схеме точность шестигранного профиля определяется двумя клетями блока так же, как и для рассмотренного круглого профиля. Диаметр окружности, вписанной в максимально нагруженные предчистовой и чистовой

треугольные калибры, равен a_1 . В свободном состоянии калибров диаметры вписанных в них окружностей одинаковы и равны $a_1 - 2f_0$, где $f_0 = \frac{P_{\max}}{c} + \Delta_s$ — упругая деформация валка, соответствующая максимальному расчетному усилию $P_{\max}$, с которым металл давит на валки. Уравнение точности шестигранной стали по второй схеме

$$a = a_1 - \frac{1}{c} (2P_{\max} - P_1 - P_2), \quad (78)$$

где P_1 и P_2 — усилие противолежащих граней профиля, воздействующее на валки предчистовой и чистовой клетей блока.

Уравнение (78) характеризует не только продольную разнотолщинность профиля, но и разнотолщинность в данном сечении по трем противолежащим граням. При $P_1 = P_2 = P$ уравнение (78) принимает вид

$$a = a_1 - \frac{2}{c} (P_{\max} - P). \quad (79)$$

Из уравнений (74) и (79) видно, что при одинаковых отклонениях от максимальных расчетных давлений металла на валки жесткость первой схемы на 13,4% выше жесткости второй схемы. Величина радиусов закруглений и зазоров может быть определена по формулам (42) и (52).

ЖЕСТКОСТЬ ТРЕХВАЛКОВЫХ КЛЕТЕЙ

На точность размеров проката в продольном и поперечном направлениях влияет большое число параметров прокатки: температура, марка стали, размер исходной заготовки, износ калибров, работа привалковой арматуры, качество подготовки валков, технический уровень применяемого оборудования. Колебание величины усилия, с которым металл давит на валки, вызывает изменение абсолютного размера и формы калибров и, следовательно, размеров прокатываемого профиля. Характер этих изменений определяется жесткостью рабочих клетей, в особенности чистовых. Обычно зависимость размеров сечения профилей от условий прокатки характеризуют коэффициентом жесткости клетки

$$c = \frac{P}{f},$$

где P — усилие, с которым металл давит на валки, кН; f — упругая деформация рабочей клетки, мм.

Коэффициент жесткости клетки показывает, какое усилие необходимо приложить к валкам рабочей клетки, чтобы расстояние между образующими валков в определенной точке длины бочки изменилось на 1 мм.

На большинстве сорговых прокатных станов применяют клетки обычной конструкции со станинами открытого или

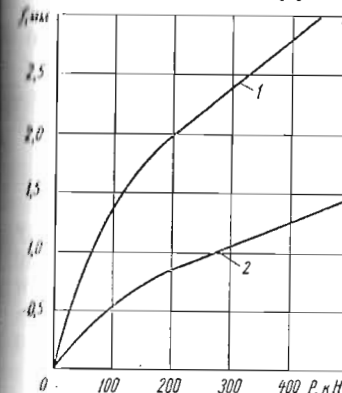


Рис. 26. Кривые деформации чистовых рабочих клетей: 1 — клеть стана 250 с подшипниками из текстолита; 2 — клеть стана 350 с подшипниками жидкостного трения.

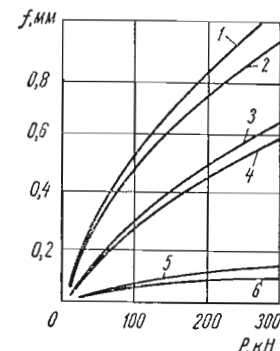


Рис. 27. Кривые деформации элементов рабочей клетки стана 350 с подшипниками жидкостного трения:

1 — рабочих валков; 2 — подшипников; 3 — станины; 4 — установочного клина; 5 — гайки нажимного винта; 6 — нажимного винта.

открытого типа и с различным соотношением длины бочки и диаметра валков, используя в качестве опор подшипники скольжения, качения или жидкостного трения. Теоретическим и экспериментальным исследованиям упругих деформаций сортовых клетей посвящены работы многих авторов, которые позволяют оценить возможности получения профилей высокой точности на существующем и вновь создаваемом оборудовании.

Суммарная упругая деформация клетки

$$f_{\text{сум}} = f_1 + f_2 + f_3 + f_4 + f_5 + f_6 + f_7,$$

где f_1 — деформация рабочих валков от действия поперечных сил и изгибающих моментов; f_2, f_3, f_4, f_5, f_6 — деформация

соответственно подушек, подшипников, стаканов, нажимных винтов и гаек; f_7 — деформация станины от действия изгибающих моментов, продольных и поперечных сил.

Рассмотрим результаты экспериментальных исследований жесткости чистовых рабочих клеток стана 350 [11, 32] со станинами закрытого типа с подшипниками жидкостного трения (рис. 26 и 27) и стана 250 со станинами открытого и закрытого типов с подшипниками скольжения из текстолита [11, 23, 68] и роликовыми коническими подшипниками (рис. 28).

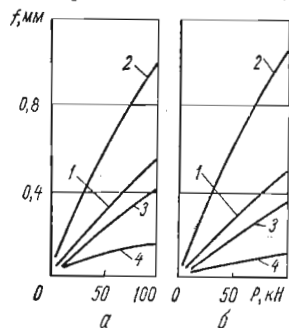


Рис. 28. Кривые деформации элементов рабочей клетки стана 250:

а — со станиной закрытого типа; б — со станиной открытого типа; 1 — рабочий валков; 2 — подшипников; 3 — станины; 4 — установочного клина.

меняемых подшипников в опорах валков. Одним из существенных недостатков клеток обычной конструкции является наличие криволинейных участков деформационной характеристики, когда увеличение зазора между образующими валков не пропорционально росту усилия. Для клеток различного исполнения криволинейные участки проявляются в диапазоне усилий до 200 кН. Непропорциональное изменение зазора между образующими валков особенно сказывается на точности размеров проката в чистовой группе клеток, где абсолютная величина усилий (табл. 3) и их колебание при изменении параметров прокатки может находиться в пределах криволинейного участка деформационной характеристики клетки [23, 68]. Это вызывает необходимость предварительного уменьшения зазора между валками и изменения высоты калибра при настройке относительно схемы калибровки, что приводит к искажению формы и

потере точности профиля в поперечном сечении даже при отсутствии искажений, которые вызываются непостоянством формирования горизонтального размера профиля при упрочнении металла в чистовом калибре.

По данным работы [68] общая деформация клетки окажет значительное влияние на поперечный профиль, особенно

Таблица 3

Усилие, с которым металл давит на валки чистовых клеток

Профиль проката	Марка стали	Усилие по длине рас- ката, кН		
		Перед- ний конец	Серед- на рас- ката	За- дний конец
Полоса размером, мм:				
25 × 12	Ст3	67	73	78
30 × 6	15	165	175	195
40 × 6	65Г	190	211	232
Периодический профиль № 14				
Круг диаметром, мм:	30ХГ2С	84	102	120
12	35	28	34	40
12	60С2А	46	56	66
15	Ст3	53	58	62
16	45	48	54	60
18	45Г2	48	52	56

при прокатке в круглых калибрах, где постоянный радиус нарезки ручья при упругих перемещениях вызовет потерю точности профиля. Для уменьшения влияния упругого перемещения валков на профиль проката необходимо вводить поправки в форму чистовых калибров. Упругие деформации отдельных деталей клетки [11, 68] позволяют выделить наиболее деформируемые узлы клетки (табл. 4), пути совершенствования конструкции и соотношения размеров деталей в клетях различного исполнения. Значительную часть деформации (40—60%) для большинства типов рабочих клеток составляет прогиб валков.

Если рассмотреть валок как балку равного поперечного сечения, то его прогиб под действием нагрузки можно определить по уравнению [6, 11]

$$f_0 = f_1 + f_2.$$

Стрела прогиба от действия изгибающих моментов

$$f_1 = \frac{P}{18,8ED_6^4} \left\{ 8l_1^3 - 4l_1l_2 + l_2^3 + 64l_3^2 \left[\left(\frac{D_6}{d_w} \right)^2 - 1 \right] \right\},$$

где D_6 — диаметр бочки валка; l_1 — расстояние между точками приложения реакций обоих подшипников; l_2 — ширина прокатываемой полосы; l_3 — расстояние от точки при-

Таблица 4
Упругая деформация деталей чистовой клетки *

Детали клетки	Деформация, мм, при усилиях на винт, кН					
	40	60	80	100	120	140
Стяжные болты	0,01	0,015	0,02	0,025	0,03	0,04
Стойки станины	0,0	0,010	0,01	0,015	0,02	0,02
Верхний винт, гайка, стакан	0,05	0,065	0,07	0,120	0,17	0,21
Подшипники	0,20	0,390	0,50	0,590	0,62	0,64
Рабочие валки с учетом поворота трещин и смятия овалов	0,10	0,200	0,31	0,450	0,56	0,63
Нижний винт, гайка, сферическая крышка	0,03	0,050	0,07	0,090	0,10	0,10

* При усилиях на винт 20 кН деформация деталей клетки принята равной нулю.

ложения равнодействующей реакции подшипника до края бочки; d_w — диаметр шейки.

Стрела прогиба от действия поперечных сил

$$f_2 = \frac{P}{G\pi D_6^2} \left\{ l_1 - \frac{l_2}{2} + 2l_3 \left[\left(\frac{D_6}{d_w} \right)^2 - 1 \right] \right\},$$

где G — модуль сдвига.

Из приведенных уравнений следует, что увеличение диаметра валка наиболее эффективно для уменьшения стрелы прогиба при постоянной величине остальных параметров, однако это требует существенной переделки клетей, привода и увеличения массы оборудования. Уменьшение длины бочки валка в два раза [68] позволяет снизить его деформацию в восемь раз. Отношение D_6/d_w не оказывает существенного влияния на жесткость клетки [72], и диаметры шеек валков выбирают в основном из условия их прочности.

Деформации подшипников жидкостного трения и роли-

ковых конических [11] (рис. 29) различаются тем, что первые имеют криволинейный участок при нагрузке до 60 кН, а вторые его практически не имеют. Поэтому при малых значениях давлений при прокатке профилей в чистовых клетях предпочтителен второй тип подшипников. Большая деформация этих подшипников объясняется несовершенством осевого крепления валка, допускающего смещения вдоль конических шеек валка, а также неравномерностью распределения нагрузок на ряды роликов подшипника при перекосах и неточности в сборке соответствующих узлов.

Основную долю деформаций остальных деталей клетки занимает деформация нажимного устройства [72], составляющая до 40% деформаций клетки без валков. Проведенные исследования позволили определить оптимальные соотношения размеров деталей и снизить де-

формацию нажимного устройства до 20% деформации клетки. Жесткость клетей обычной конструкции в направлении оси рабочих валков влияет на точность размеров профиля при прокатке. В клетях с подшипниками скольжения опора осуществляется через галтель текстолитового вкладыша с фиксированием подушки прижимными планками. Осевая жесткость рабочих клетей стана 270 с текстолитовыми вкладышами составляет 70 МН/м [38]. В клетях с подшипниками качения опора состоит из втулки, упорного подшипника, стакана и механизма регулировки. По данным [49] осевая жесткость клетки ПНК-320 составляет около 70 МН/м, что является недостатком клетей такого типа и требует тщательной настройки и постоянного контроля за совмещением ручьев калибра.

Исследования деформаций деталей и узлов рабочих клетей прокатных станов различного типа позволили определить основные направления в усовершенствовании конструкций клетей сортопрокатных станов. Созданы клетки повышенной жесткости различного исполнения, такие как бесстанинные, бесстанинные предварительно напряженные, моноблочные [15, 28, 34, 49, 50, 68].

Нерегулируемые трехвалковые клетки, применяемые в качестве калибрующих при прокатке круглой и шестигранной стали, помимо технологических преимуществ, обладают

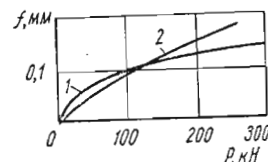


Рис. 29. Кривые деформации подшипников:
1 — жидкостного трения;
2 — роликовых конических.

рядом конструктивных особенностей, отличающих их от других типов клетей. Трехвалковые клетки содержат малое количество деталей, воспринимающих нагрузки при прокатке, в них отсутствуют нажимные устройства. Применение роликовых конических подшипников в качестве опор валков обеспечивает малую протяженность нелинейной деформационной характеристики клетки, что позволяет вести точную прокатку при небольших абсолютных значениях давлений. Они имеют более совершенное осевое крепление валка, когда механизм осевого крепления вращается вместе с валком, обеспечивая постоянство усилия осевой затяжки и отсутствие смещения валка в осевом направлении. Малое отношение длины бочки валка к диаметру (0,2—0,3), а также наличие одного калибра, образованного тремя валками, исключает изменение коэффициента жесткости по длине бочки валка и значительно сокращает деформацию от изгиба оси валка. Малая высота промежуточных деталей, передающих усилие от валка к станинам, большая площадь их контакта обеспечивают минимальные деформации этих деталей при нагружении.

Трехвалковые клетки обладают важной особенностью, которая выражается во влиянии упругого перемещения валков, расположенных под углом 120° , на изменение абсолютного размера калибра, что выгодно отличает их от других типов клетей. Обычно при исследовании и анализе жесткости клетки под упругой деформацией f подразумевается увеличение зазора между двумя валками рабочей клетки под действием усилия P . Для сравнительного анализа клетей различного типа целесообразно принимать коэффициент жесткости рабочего валка:

$$c_b = \frac{P}{f_y},$$

где f_y — упругая деформация валкового узла.

Коэффициент жесткости валка c_b характеризуется величиной усилия, необходимого для перемещения поверхности валка перпендикулярно оси прокатки и оси валка на 1 мм за счет упругих деформаций оси валка, его опор, станины и т. п. Большое многообразие сортовых профилей и формы калибров и, соответственно, различный характер упругих перемещений линий контура калибра делает недостаточным оценку применяемой клетки указанными коэффициентами. Для рассматриваемых профилей (круг,

шестигранник) точность определяется изменением абсолютных размеров и овальности круглой стали или разности высот по различным граням шестигранной стали. Поэтому для оценки точности профиля при прокатке в различных типах клетей и формах калибров целесообразно рассматривать такие два показателя, как коэффициент жесткости калибра и коэффициент жесткости формы калибра.

Коэффициент жесткости калибра c_k характеризуется величиной усилия, необходимого для увеличения максимального значения основного размера в данном сечении (диаметр круглой стали при упругом перемещении валка или высотного размера для шестигранной стали) на 1 мм:

$$c_k = \frac{P}{f_d},$$

где f_d — изменение максимального значения основного размера калибра за счет упругих деформаций клетки.

Коэффициент жесткости формы калибра c_ϕ характеризуется величиной усилия, необходимого для увеличения разности между максимальным и минимальным значениями основного размера калибра за счет упругих деформаций элементов клетки:

$$c_\phi = \frac{P}{f_{\Delta d}},$$

где $f_{\Delta d}$ — изменение разности между максимальным и минимальным значениями размера калибра за счет упругой деформации элементов клетки (это овальность круглого калибра или максимальная разность высот шестигранного).

Для сравнительного анализа эффективности применения клетей различных типов при получении профилей высокой точности принимаем, что коэффициент жесткости валка одинаков для каждой из рассматриваемых клетей. Тогда максимальное изменение диаметра круглого калибра f_d в направлении оси x (рис. 30, а, б и в) в результате упругой деформации каждого валка на величину f_y составит для двух- и четырехвалковой клетей $f_d = 2f_y$, а для трехвалковой клетки — $f_d = 1,5f_y$. Коэффициент жесткости трехвалкового калибра c_k на 25% больше коэффициента жесткости двух- и четырехвалковых калибров.

Еще более существенное различие обнаруживается при определении овальности круглых калибров клетей различного типа. Для двухвалковой клетки диаметр круглого калибра

по разему валков d_r не изменяется во всем диапазоне упругих деформаций f_y вала. Изменение овальности круглого двухвалкового калибра

$$f_{\Delta d} = 2f_y.$$

Изменение овальности круглого трехвалкового калибра

$$f_{\Delta d} = f_{\Delta d \max} - f_{\Delta d \min} = 0,25f_y,$$

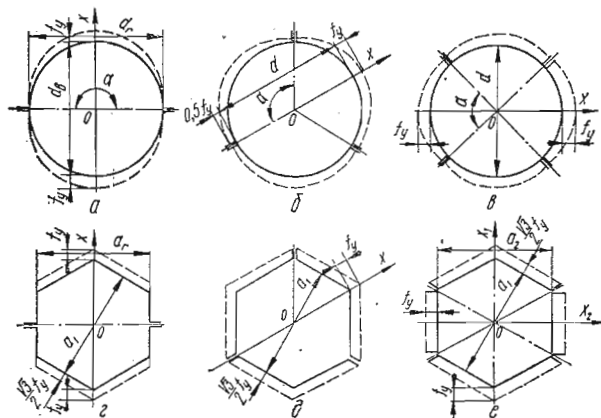


Рис. 30. Изменение формы круглого и шестигранного калибра двух-, трех- и четырехвалковых клетей.

где $f_{\Delta d \max}$ и $f_{\Delta d \min}$ — максимальное и минимальное изменение диаметра калибра.

Для четырехвалкового калибра (рис. 30, в)

$$f_{\Delta d} = 2f_y(1 - \sin 45^\circ) = 0,6f_y.$$

Таким образом, коэффициент жесткости формы для круглого трехвалкового калибра в восемь раз выше, чем для двухвалкового, и в 2,4 раза — чем для четырехвалкового.

Для шестигранной стали (рис. 30, г, д и е) коэффициент жесткости калибра для трех типов клетей относительно ребровых ручьев одинаков, а изменение диаметра вписанной окружности $f_d = \sqrt{3}f_y$. Коэффициент жесткости формы шестигранного калибра двухвалковой клетки

$$f_{\Delta d} = \sqrt{3}f_y,$$

трехвалковой

$$f_{\Delta d} = 0,$$

четырехвалковой

$$f_{\Delta d} = 2f_y.$$

Из приведенного сравнительного анализа коэффициентов жесткости калибров, а также технологических и конструктивных особенностей различных типов клетей следует, что при прокатке круглой и шестигранной стали трехвалковые клетки обеспечивают более высокие показатели по точности. Подобным образом, используя коэффициент жесткости клетки, вала, калибра и формы калибра, можно определить оптимальный тип рабочих клетей, обеспечивающих учет технологических особенностей и схем калибровки при прокатке различной сортовой стали. Применение трехвалковых нерегулируемых клетей в качестве калибрующих для обеспечения точности прокатки в пределах допускаемых отклонений на холоднокатаную сталь делает необходимым изучение и исследование упругих деформаций клетей. Знание коэффициента жесткости трехвалковых клетей необходимо как при разработке калибровок и технологии прокатки, так и при проектировании клетей.

Учитывая специфические особенности трехвалковых клетей, авторами принят экспериментальный метод исследования жесткости, а в качестве датчиков перемещения использован индикатор часового типа с точностью отсчета 0,001 мм. С помощью датчиков определяли деформацию каждого вала отдельно, что необходимо для расчета калибровки и для характеристики клетки. Нагружение валков производили с помощью затяжной скобы, а в качестве силоизмерительного прибора применяли динамометр сжатия ДОСМ 3—Б. Такой способ нагружения обеспечил точное фиксирование радиальной нагрузки на валок, исключил ошибки, возможные при изменении усилий с помощью месдоз, когда определение необходимых параметров связано с проведением дополнительных расчетов и тарировок упругих элементов.

Исследования упругих деформаций трехвалковых клетей проводили на клетки модели I и клетки VУ-69 ЭЗТМ. В клетях с симметричным расположением опор валков измеряли упругие деформации отдельных деталей клетки и суммарные упругие деформации. На станине клетки укрепляли индикаторы часового типа по специально разработанной схеме (рис. 31). Индикатором I измеряли упругую деформацию опорной втулки и подшипника, индикатором II —

суммарную деформацию подшипникового узла, включающего опорную втулку, стакан и подшипник. Растяжение станины фиксировали индикатором 10, а индикаторами 3, 6 и 9 измеряли деформацию f_y каждого валка. Деформацию сжатия поперечины станины фиксировали индикаторами

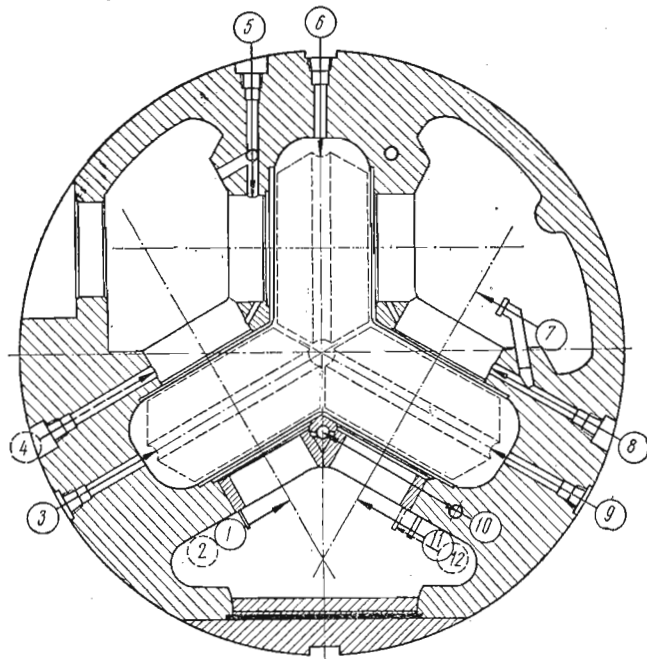


Рис. 31. Схема расположения датчиков для измерения деформаций элементов клетки.

4, 5, 8, 12, а индикатором 7 — деформацию подшипникового узла со шлицевой частью оси. Деформацию собственно подшипника определяли с помощью индикатора 2, который устанавливали на опорном стакане с упором передвижной головки во внутреннюю обойму подшипника. Индикаторы 3, 6 и 9 укрепляли непосредственно на станине клетки с упором в среднюю часть ручья калибра, перпендикулярно оси валка. Подвижные ножки индикаторов 1, 11, 7 и 2 упирались в закрепленные неподвижно и отцентрированные подшипники для исключения ошибок измерения от поворота валка при некоторой несимметричности нагружения затяжных скоб.

Для трехвалковых клетей с несимметричным расположением опор (см. рис. 3) жесткость определяли по результатам измерения суммарной деформации f_y рабочих валков. Деформацию в этом случае измеряли нутромером типа ИИ 50-100 с индикатором часового типа с точностью отсчета

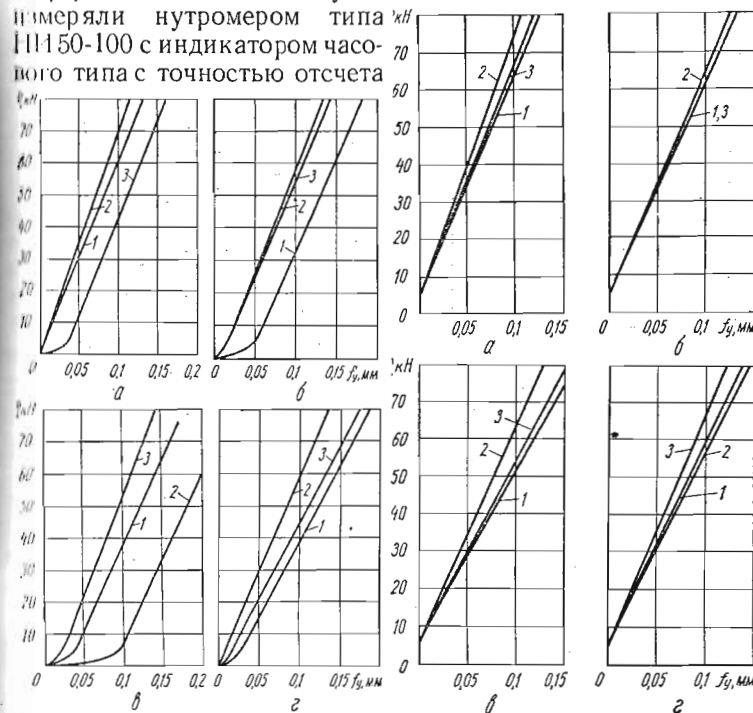


Рис. 32. Кривые деформации рабочих валков трехвалковой клетки с несимметричным расположением опор после прокатки:
а — 94 т металла; б — 4100 т; в — 6000 т; г — 6700 т; 1, 2, 3 — номера валков.

Рис. 33. Характеристики жесткости валков трехвалковой клетки после предварительного нагружения усилием 5 кН после прокатки:
а — 94 т металла; б — 4100 т; в — 6700 т; г — 5000 т; 1, 2, 3 — номера валков.

$\pm 0,001$ мм. Нутромер устанавливали между плоскостью проема станины и средней частью ручья валка, нагружали каждый валок отдельно. На рис. 32 показаны кривые упругих деформаций валков клетей с несимметричным расположением опор после различного времени эксплуатации и, соответственно, партий прокатанного металла. Одна из зависимостей (рис. 32, в) получена для клетки после двух ремонтов, остальные клетки ремонту не подвергались. Результаты

экспериментального исследования показывают, что трехвалковые клетки характеризуются малой протяженностью криволинейного участка деформационной линии, которая практически не изменилась после прокатки указанного количества металла и соответствует усилиям, не превышающим 5 кН, обеспечивая точную прокатку стали при малых абсолютных значениях давления металла на валки.

Таблица 5
Упругая деформация деталей трехвалковой клетки

Детали	Деформация, мм, при усилиях на валок, кН					Величина деформации элементов клетки, %
	30	40	50	60	70	
Ось валка, втулка, валок	0,036	0,043	0,056	0,069	0,081	61,0
Опорная втулка, подшипник, опорный стакан	0,014	0,022	0,030	0,038	0,046	32,5
Станина	0,002	0,005	0,006	0,007	0,008	6,5

Различие в перемещении валков одной клетки составляет 0,04 ... 0,09 мм при усилии на валок 50 кН. Из характеристики деформации валков трехвалковых клеток после предварительного нагружения усилием 5 кН видно (рис. 33), что разность перемещений валков при таком предварительном нагружении составляет всего 0,0025 ... 0,02 мм.

Нелинейный участок в основном обусловлен шлицевым соединением оси с шестернями и втулкой валка, что относится к недостаткам трехвалковых клеток, и при длительной их эксплуатации может привести к значительной разнице неупругих деформаций валков одной клетки. Некачественная сборка шлицевого соединения приводит к разности перемещений до 0,1 мм. Для сокращения нелинейного участка деформационной характеристики клеток необходимо повысить точность изготовления и сборки шлицевого соединения и контролировать его износ по мере эксплуатации. К недостаткам клеток такого типа следует отнести несимметричное расположение опор валка относительно приложенной нагрузки, что определяет различные условия работы и деформацию подшипников, а также

шлицевое соединение валка с осью, определяющее перемещение валка относительно оси при некачественной сборке. Опытами установлено, что радиальное перемещение валка относительно оси составляет 0,01 ... 0,015 мм.

Результаты экспериментального исследования упругих деформаций клеток с симметричным расположением опор представлены в табл. 5 и на рис. 34. Основную долю деформации трехвалковой клетки составляет деформация валковой системы, включающая валок, втулку и ось, причем на ось валка приходится большая часть этой деформации при весьма малом изгибе валка и втулки. Деформация подшипниковых узлов составляет свыше 30% суммарной деформации. Экспериментальное определение деформации деталей подшипникового узла, которую измеряли индикаторами 1, 9 и 12 (см. рис. 31), показало, что при нагрузках 30—50 кН малая высота и большая поверхность контакта опорной втулки и стакана, передающих нагрузку от оси валка к станинам, обеспечивают минимальное упругое их сжатие, деформация же собственно подшипника составляет 90—95% деформации этого узла. Для рассматриваемых клеток нелинейный участок деформационной линии рабочего валка заканчивается при нагрузках 25—30 кН, что значительно больше, чем для клеток с несимметричным расположением опор оси валка. Большая протяженность этого участка обусловлена длительной эксплуатацией клетки, ослаблением и износом шлицевых соединений, посадочных мест подшипников и втулок валков. Это увеличило диапазон нагрузок, при которых происходит выбор зазоров, и, главным образом, контактную деформацию в местах соприкосновения деталей клетки. Последнее подтверждается разностью углов наклона прямолинейных участков упругих линий и несимметричным перемещением рабочих валков клетки, достигающим 0,1 ... 0,12 мм, причем 80% этой величины находится в диапазоне нагрузок 0 ... 10 кН, что определяется качеством сборки клетки и подгонки ее деталей. Одна из

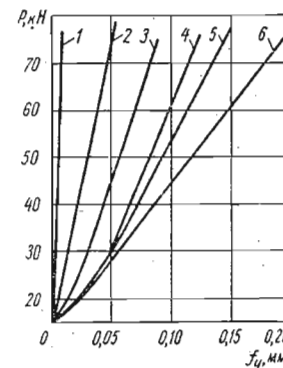


Рис. 34. Кривые деформации элементов трехвалковой клетки:

1 — станины; 2 — втулки, стакана и подшипника; 3 — ось, втулки и валка; 4, 5, 6 — валкового узла.

причин несимметричной деформации рабочих валков состоит в применении в одной клетке осей с одно- и двухсторонней шлицевой частью (рис. 3 и 34) и меньшим коэффициентом жесткости последней. Различный характер соединения осей с опорами иногда приводит к наклону оси в вертикальной плоскости, что замерено индикатором 8 (рис. 31), и искажению формы калибра при прокатке.

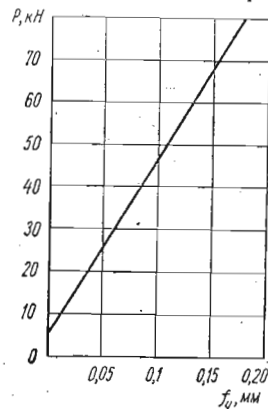


Рис. 35. Характеристика жесткости круглого калибра трехвалковой клетки с несимметричным расположением опор валка.

калибра за счет упругих деформаций рассчитывали, исходя из условия $f_d = 1,5f_y$. На рис. 35 показано изменение максимального значения основного размера круглого калибра для клеток с несимметричным расположением опор. Зависимость $f_d = f(P)$ получена с учетом предварительного нагружения клетки усилием 5 кН. Коэффициенты жесткости круглого калибра для трехвалковых клеток с симметричным и несимметричным расположением опор валков составляют соответственно 460—500 МН/м и 300—320 МН/м. Коэффициенты жесткости формы калибра, определенные по формуле $c_k = P/f_{\Delta d}$ для обоих типов трехвалковых клеток, составляют 2600—2800 МН/м и 2200—2400 МН/м. Таким образом, рабочая клетка с несимметричным расположением опор валков имеет существенное преимущество и является более совершенной конструкцией моноблочной трехвалковой клетки. Это определяется улучшенной конструкцией опор вал-

ков, увеличением диаметра осей, применением более мощных подшипников.

Для сравнительной характеристики конструкций двух- и трехвалковых клеток из упругой характеристики деформации клетки с несимметричным расположением опор валка

Таблица 6

Параметры рабочих клеток сортовых станков

Тип клетки	Параметры		
	c_k , МН/м	ω , м/МН	c_k/U_k , МН/м
Чистовая клетка стана 350 ЧМЗ, 420 × 800 мм, $U_k = 12$ т [32]	300	0,0021	2 500
Чистовая клетка стана 250 ДМЗ, 250 × 700 мм, $U_k = 4$ т [23]	110—120	0,00425	2 800
Сортовая клетка 320 Чепельского комбината, длина бочки 820 мм [38]	300	0,0033	—
Чистовая клетка стана 450 Ижевского металлургического завода $U_k = 18$ т [38]	1000	0,001	5 600
Клетка ПНК 320 ВНИИметмаша 300 × 400 мм, $U_k = 5,4$ т [28]	1300	0,00077	24 100
Трехвалковая клетка ВУ-69, 330 × 110 мм, $U_k = 1,2$ т	460—500	0,0024	40 000

определили податливость клетки ω как величину, обратную коэффициенту жесткости калибра. Перепаду усилия ΔP соответствует максимальное изменение размера калибра Δf_d , тогда

$$\omega = \frac{\Delta f_d}{\Delta P} = \frac{1}{c_k}.$$

Расчетная величина абсолютного значения податливости клетки составляет 0,0024 м/МН. Изменения основного размера калибра в абсолютных единицах находили из опытных данных (рис. 35) и условия $f_d = 1,5f_y$ по уравнению

$$f_d = 0,024(P - 0,5).$$

В табл. 6 приведены параметры клеток различного исполнения по коэффициенту жесткости, податливости и коэффициенту $k = \frac{c}{u_k}$, характеризующему металлоемкость клетки на единицу ее коэффициента жесткости. Коэффициент жесткости c_k трехвалковой клетки в два-три раза меньше, чем у предварительно напряженных клеток, и в полтора—два раза выше, чем у двухвалковых клеток обычной конструкции. Коэффициент податливости трехвалковой клетки в три раза больше, чем у ПНК, и занимает по этому показателю среднее положение между напряженными клетями 450 и 250. Однако при соответствующих показателях c_k и ω металлоемкость трехвалковой клетки в 2—10 раз меньше, чем у двухвалковых клеток различной конструкции. Результаты экспериментального исследования упругих деформаций трехвалковых клеток позволяют определять необходимые параметры для расчета калибровок и повышения коэффициентов жесткости с целью достижения более высоких показателей точности при горячем калибровании.

ФОРМОИЗМЕНЕНИЕ И НЕРАВНОМЕРНОСТЬ ДЕФОРМАЦИИ МЕТАЛЛА

Как известно [18], степень деформации неоднородно деформированного тела, в отличие от степени деформации однородно деформированного, принято называть степенью формоизменения, или просто формоизменением. Горячее калибрование металла в блоках трехвалковых клеток, как и большинство случаев прокатки в калибрах, относится к разряду неоднородного деформирования. В этом случае особенно важно уметь заранее определить направления и области запрещенного и свободного формоизменения, а также величину и знак деформаций в этих направлениях. При всех технологически допустимых режимах обжатия в предчистовом калибре блока (см. рис. 12, а) основную область деформации составляет запрещенное формоизменение, определяемое рабочей поверхностью валков клетки. Область же свободного формоизменения находится лишь на участках разъема валков и составляет малую величину по сравнению с первой. Однако величина и направление этого свободного формоизменения оказывает большое влияние на качество поверхности горячекалиброванного металла. Уширение металла на участках свободного формоизменения

при максимально допустимом расчетном обжатии $\Delta h_{\max}$ приводит к затеканию металла в зазор между валками, т. е. за пределы выпусков и закруглений на валках, обусловленных конфигурацией калибра, что при прокатке в чистой клетке блока может вызвать образование закатов на поверхности металла. Утяжка же металла на этих участках является резервом возможного увеличения обжатия в предчистовом калибре и гарантией качественной поверхности готового профиля.

С точки зрения формоизменения калибруемого металла чистой калибр значительно отличается от предчистового: основную область деформации составляет свободное формоизменение. Область запрещенного формоизменения соответствуют (см. рис. 21) участки EF , AB и CD . Характер формоизменения металла на участках AF , BC и DE во многом определяет точность размеров сечения готовой стали и качество ее поверхности. Уширение на этих участках при достаточной его величине может привести к затеканию металла в зазоры между валками чистой клетки блока, а утяжка будет уменьшать диаметральные размеры в сечении готовой стали и увеличивать ее овальность. Отсутствие же этих деформаций обеспечивает, без учета влияния других факторов, соответствие получаемой стали по форме и размерам расчетным данным.

Для определения величины деформации на указанных участках применена методика контролируемого продольного перемещения измерительного инструмента. Исследования проведены на свинцовых недокатах, полученных в предчистовой и чистой трехвалковых клетях калибрующего блока после прокатки с различными обжатиями круглой заготовки. Для каждого обжатия было изготовлено три—пять свинцовых круглых образцов длиной по 100—150 мм каждый. Образцы при прокатке последовательно останавливали в предчистовой и чистой клетях блока с получением отпечатков двух очагов деформации на одном образце при наличии здесь же участка исходной заготовки и готового профиля. Полученные недокаты закрепляли

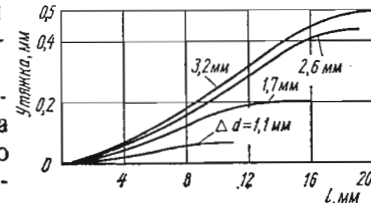


Рис. 36. График нарастающей утяжки металла по очагу деформации в предчистовом калибре блока для круглого профиля диаметром 38 мм.

участком, соответствующим исходной заготовке, в кулачковом шпинделе токарного станка в строго горизонтальном положении. На суппорте этого же станка в специальном штативе был установлен индикатор с часовым механизмом. Ножку индикатора устанавливали перпендикулярно поверхности недоката на участке, соответствующем исходной заготовке, а затем вращением шпинделя шарик наконечника индикатора совмещали с образующей круглой заготовкой, вдоль которой исследовался характер деформации. После установки нулевых отметок движением суппорта индикатор перемещали вдоль соответствующей образующей, фиксируя абсолютную величину деформации металла в зоне очага деформации. Таким методом было исследовано свободное формоизменение металла на участках разъема валков предчистовой (см. рис. 12 точку В)

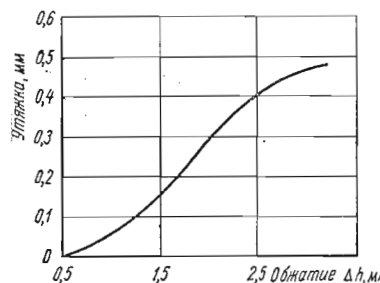


Рис. 37. Кривая зависимости утяжки металла от обжатия на участке свободного формоизменения в предчистовом круглом калибре блока.

и чистовой клетей блока при прокатке круглых образцов диаметром 22, 38, 40 и 50 мм с обжатием 0,5—3,2 мм в предчистовой клетке. Установлено, что для предчистового калибра характерна утяжка металла на этих участках.

На рис. 36 показаны кривые нарастающей утяжки вдоль очагов деформации при прокатке круглого образца диаметром 38 мм с обжатием $\Delta d = 1; 1... 3,2$ мм, а на рис. 37 — кривая зависимости величины утяжки от абсолютного обжатия металла для этого же сечения, построенная по опытными данным. Интенсивность утяжки наибольшая для средней части очага деформации с некоторым снижением в начале и конце очага. Характер же зависимости величины утяжки от обжатия свидетельствует о том, что примерно до обжатия 0,7 мм (относительное обжатие 1,8%) рост утяжки происходит медленно, затем интенсивно нарастает до обжатия 2 мм (относительное обжатие 5,2%) с последующим снижением этой интенсивности. Близкая качественная картина получена для круглых образцов других размеров, однако было обнаружено влияние на величину утяжки металла формы калибра на участках выпусков. Этот вопрос требует дальнейшего уточнения.

При исследовании свободного формоизменения на участках, соответствующих разъему валков чистового калибра блока (см. рис. 21), заметных радиальных деформаций не обнаружено. Таким образом, свободное формоизменение металла при горячем калибровании в блоках трехвалковых клетей не оказывает влияния на качество готовой продукции, а изложенная выше теория расчета и взаимодействия

калибров блока не требует корректировки для учета деформации металла.

Для изучения неравномерности деформации металла

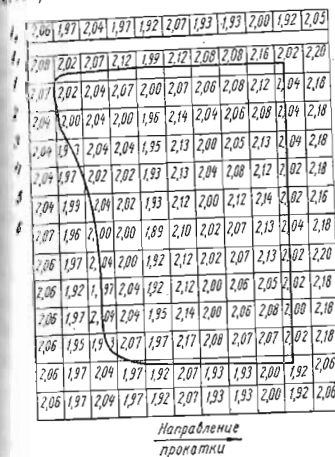


Рис. 38. Размеры ячеек координатной сетки до и после прокатки.

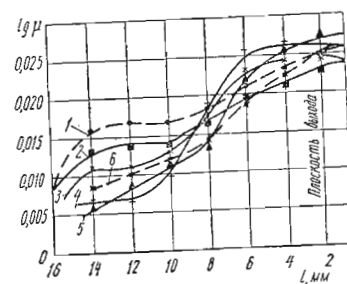


Рис. 39. График нарастающей вытяжки на поверхности круглого образца при прокатке в предчистовом калибре блока.

при горячем калибровании в круглых калибрах трехвалковых клетей был использован метод координатных сеток, нанесенных на контактную поверхность свинцовых образцов [53]. Прокатку проводили в предчистовой клетке калибрующего блока с диаметром калибра 38 мм так, чтобы получить недокат с очагом деформации в пределах координатной сетки. Было прокатано три образца со средним обжатием 1,14 мм, после которого сетка на поверхности образцов была отчетливо видна. На рис. 38 показана координатная сетка с продольными размерами ячеек до (l_0) и после (l_1) прокатки одного из образцов с указанием геометрического очага деформации. По этим данным построен (рис. 39) график нарастающих коэффициентов вытяжки по средним величинам из замера трех образцов для элементарных ячеек, расположенных на контактной

поверхности. Величину коэффициентов вытяжки определяли по формуле

$$\lg \mu = \lg \frac{l_1}{l_0}.$$

Всего построено шесть кривых (рис. 39), номера которых соответствуют номерам продольных линий координатной сетки (рис. 38). Параметр l/d_1 очага деформации для исследуемых образцов соответствовал 0,34, где l — длина дуги захвата. Коэффициент вытяжки в начале очага деформации интенсивно нарастает (за исключением кривой 4), принимая максимальные значения на участках, расположенных ближе к разъему валков (кривые 1—3). На расстоянии 2 мм от входа в очаг деформации (для кривых 1 и 2) нарастание коэффициента вытяжки прекращается на длине, примерно равной 4 мм, или 0,35 l , т. е. имеет место продольное прилипание металла к валкам в зоне, смещенной к плоскости входа. Для кривой 3 величина зоны продольного прилипания в два раза меньше и также смещена к плоскости входа металла в геометрический очаг деформации, и для кривой 4 коэффициент вытяжки в начале очага деформации постоянен на длине, примерно равной 0,25 l . На кривых 5 и 6, т. е. в центре ручья, продольное прилипание отсутствует.

На продольных участках на расстоянии 10—12 мм от плоскости выхода металла из валков продолжается нарастание коэффициента вытяжки с образованием развитой зоны скольжения металла в направлении прокатки. Наиболее интенсивный рост коэффициента вытяжки характерен для кривых 3, 4 и 5 с постепенным выравниванием значений этого коэффициента по мере приближения к выходу металла из валков. Результаты исследования показывают, что в отличие от прокатки полосок на гладкой бочке [53], при горячем калибровании круглой стали в трехвалковых клетях имеет место неравномерность нарастающих коэффициентов вытяжки на контактной поверхности по ширине ручья предчистового калибра блока. Например, в начале очага деформации коэффициент вытяжки для кривой 1 в три раза больше, чем для кривой 5.

ПЛОЩАДЬ ПОВЕРХНОСТИ КОНТАКТА МЕТАЛЛА С ВАЛКАМИ

Контактную поверхность металла с валками в круглых калибрах двух- и трехвалковых клетей определяют графически и аналитически; наиболее точные результаты дает

аналитический метод. Задачу для случая редуцирования труб в круглых калибрах решали П. Т. Емельяненко и Ю. М. Матвеев [25], А. А. Шевченко [70], И. А. Фомичев и А. Н. Кириченко [57] и др. С развитием многовалковой прокатки сплошных тел эту задачу при прокатке в различных вытяжных калибрах решали В. Н. Выдрин с сотрудниками [13], А. П. Чекмарев, Г. П. Борисенко, А. А. Горбанев [66], М. П. Кашнелсон [33]. Аналитическое определение величины контактной поверхности можно получить при решении интеграла вида

$$F_k = \int_a^b f(y) dy,$$

где $f(y)$ — функция, описывающая линию пересечения поверхности заготовки с поверхностью калибра; a , b — пределы интегрирования.

Решение этого выражения с достаточной для практических расчетов точностью возможно получить [55] с помощью неравенства В. Я. Буняковского [12].

Рассмотрим вывод уравнений для расчета F_k в случае прокатки по системе круг — круг в предчистовом трехвалковом калибре. Расчетную схему (рис. 40) удобно рассматривать как шестую часть поперечного сечения калибра и заготовки в силу симметричности схемы деформации. Ширину контакта можно без большой погрешности принять постоянной, равной $2b = r_1 \sqrt{3}$ без учета зазора между валками. Уравнение поверхности являющейся третьей частью окружности калибра и образованной вращением кривой LN вокруг оси Oy , в общем виде можно записать [58]

$$f(\sqrt{z^2 + x^2}, y) = 0. \quad (80)$$

Уравнение кривой вращения в плоскости zOy

$$(R_0 - Z)^2 + Y^2 = r_1^2, \quad (81)$$

где R_0 — идеальный радиус валков клетки.

Возьмем на кривой LN точку $P(O, Y, Z)$, которая при вращении вокруг оси Oy описывает окружность, лежащую

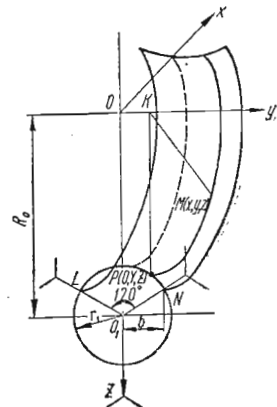


Рис. 40. Схема определения площади контактной поверхности при прокатке круглого профиля в предчистовом калибре блока.

в плоскости $y = Y$ с центром в точке K и с радиусом $R = Z$ ($Z > 0$). Уравнение такой окружности

$$\begin{cases} z^2 + x^2 = Z^2; \\ y = Y. \end{cases} \quad (82)$$

Этому уравнению удовлетворяет любая точка $M(x, y, z)$, лежащая на этой окружности. Координаты точки P удовлетворяют уравнению (81) кривой $LN - f(Z, Y)$. Исключая из уравнений (81) и (82) играющие вспомогательную роль координаты Z и Y точки P , находим искомое уравнение калибра, так как ему должны удовлетворять координаты любой точки M этой поверхности.

Из уравнения (81)

$$Y = \sqrt{r_1^2 - (R_0 - Z)^2}. \quad (83)$$

Так как $y = Y$, следовательно,

$$y = \sqrt{r_1^2 - (R_0 - Z)^2}, \quad (84)$$

откуда

$$Z = R_0 - \sqrt{r_1^2 - y^2}. \quad (85)$$

Подставляя выражение (85) в (82), получаем уравнение поверхности круглого калибра:

$$x^2 + y^2 + z^2 + 2R_0 \sqrt{r_1^2 - y^2} - R_0^2 - r_1^2 = 0. \quad (86)$$

Уравнение поверхности круглой заготовки

$$(R_0 - z)^2 + y^2 = r_0^2, \quad (87)$$

где r_0 — радиус заготовки перед калибрующей клетью.

Решая совместно уравнения (86) и (87), получаем функциональную зависимость линии, ограничивающей площадь контакта заготовки с валком:

$$x^2 = 2R_0 \sqrt{r_0^2 - y^2} - 2R_0 \sqrt{r_1^2 - y^2} + r_1^2 - r_0^2. \quad (88)$$

Для определения площади горизонтальной проекции контактной поверхности необходимо проинтегрировать выражение (88):

$$F_k = 2 \int_0^b \sqrt{2R_0 \sqrt{r_0^2 - y^2} - 2R_0 \sqrt{r_1^2 - y^2} + r_1^2 - r_0^2} dy. \quad (89)$$

Так как интеграл не берется в конечном виде, воспользуемся для его решения неравенством В. Я. Буняковского:

$$\left(\frac{F_k}{2}\right)^2 \leq \int_0^b (1)^2 dy \int_0^b f(y) dy. \quad (90)$$

Подставляя в выражение (90) вместо функции $f(y)$ ее значение из уравнения (88), получаем

$$\frac{F_k}{2} = \sqrt{b \int_0^b 2R_0 \sqrt{r_0^2 - y^2} - 2R_0 \sqrt{r_1^2 - y^2} + r_1^2 - r_0^2 dy}. \quad (91)$$

После решения выражения (91) получаем формулу для определения площади горизонтальной проекции контактной поверхности металла с валком

$$F_k = 2 \left\{ \frac{\sqrt{3}}{2} r_1 \left[2R_0 \left(\frac{\sqrt{3}}{4} r_1 \sqrt{r_0^2 - \frac{3}{4} r_1^2} + \frac{r_0^2}{2} \arcsin \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{r_1}{r_0} - 0,74 r_1^2 \right) - \frac{\sqrt{3}}{2} r_1 (r_0^2 - r_1^2) \right] \right\}^{1/2}. \quad (92)$$

Так как формула (92) достаточно громоздка, рассмотрим упрощенную схему очага деформации (рис. 41) для расчета площади контакта металла с валками. Принимая, что очаг деформации образован приращением вокруг оси прокатки Ox части дуги LN окружности валка радиусом R , равным радиусу валка по дну калибра. Плоскость Oy является плоскостью выхода металла из валков. Применяя методику, аналогично изложенной выше, находим уравнение поверхности вращения

$$x^2 + y^2 + z^2 - 2R_0 \sqrt{R^2 - x^2} - R_0^2 - R^2 = 0. \quad (93)$$

Поверхность контакта, относящаяся к одному валку трехвалковой клетки, определяется углом SOT , равным 120° (рис. 41), с граничными условиями по кривым SS_1 и TT_1 , уравнение которых

$$z = y \operatorname{tg} 30 = \frac{\sqrt{3}}{3} y. \quad (94)$$

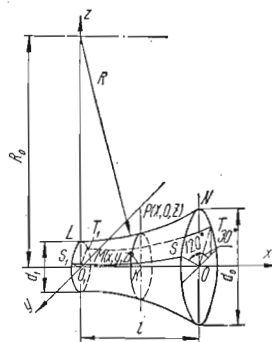


Рис. 41. Упрощенная схема очага деформации.

Подставив значение z в уравнение (92), получаем

$$x^2 + \frac{4}{3} y^2 - 2R_0 \sqrt{R^2 - x^2} - R_0^2 - R^2 = 0. \quad (96)$$

Площадь проекции контактной поверхности

$$F_k = 2 \int_0^b y dx \text{ при } y > 0. \quad (97)$$

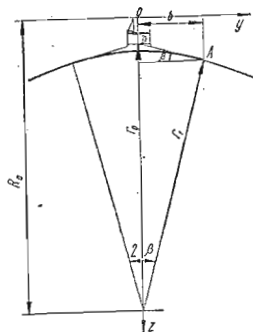


Рис. 42. Схема определения площади контактной поверхности при прокатке круглого профиля в чистовом калибре блока.

Решая совместно уравнения (96) и (95), получаем

$$F_k = \sqrt{3} \left(R_0 l - \frac{R^2}{2} \arcsin \frac{l}{R} - \frac{l}{2} \sqrt{R^2 - l^2} \right), \quad (97)$$

где $l = \sqrt{R \Delta h}$; $\Delta h = d_0 - d_1$.

Рассмотрим вывод уравнения для расчета величины F_k применительно к чистовому круглому калибру блока трехвалковых клеток. Уравнение (86) поверхности калибра в этом случае преобразуется:

$$x^2 + y^2 + z^2 + 2R_0 \sqrt{r_1^2 - y^2} - R_0^2 - r_1^2 = 0. \quad (98)$$

Для решения задачи можно с достаточной степенью точности для практических расчетов принять упрощенную схему деформации (рис. 42), согласно которой уравнение поверхности заготовки

$$y = \frac{r_0 - (R_0 - z)}{\operatorname{tg} \beta},$$

откуда

$$z = y \operatorname{tg} \beta - (r_0 - R_0). \quad (99)$$

Решая систему уравнений (98) и (99), получаем уравнение линии, ограничивающей площадь контакта заготовки с валком:

$$x^2 = 2R_0 r_0 + 2(r_0 - R_0) y \operatorname{tg} \beta - y^2 (1 + \operatorname{tg}^2 \beta) - 2R_0 \sqrt{r_1^2 - y^2} + r_1^2 - R_0^2. \quad (100)$$

После интегрирования выражения (100) в пределах от 0 до $b = r_1 \sin \beta$ (рис. 42) получаем формулу для определения

горизонтальной проекции контактной поверхности

$$F_k = 2 \left\{ r_1^2 \sin^2 \beta \left[(2R_0 r_0 + r_1^2 - R_0^2) - (R_0 - r_0) r_1 \sin \beta \operatorname{tg} \beta - \frac{1 + \operatorname{tg}^2 \beta}{3} r_1^2 \sin^2 \beta - R_0 \left(r_1 \cos \beta + \frac{r_1 \beta}{\sin \beta} \right) \right] \right\}^{1/2}. \quad (101)$$

Полученное выражение можно несколько упростить, пренебрегая членом $\frac{1 + \operatorname{tg}^2 \beta}{3} r_1^2 \sin^2 \beta$ как величиной малого порядка и при малых значениях углов принимая $\sin \beta \approx \beta$:

$$F_k = 2 \left\{ r_1^2 \sin^2 \beta \left[(2R_0 r_0 + r_1^2 - R_0^2) - (R_0 - r_0) r_1 \sin \beta \operatorname{tg} \beta - 2R_0 r_1 \cos^2 \frac{\beta}{2} \right] \right\}^{1/2}. \quad (102)$$

Для определения площади контакта металла с валком при горячем калибровании шестигранной стали в предчистовом калибре по системе шестигранник—шестигранник находим уравнение поверхности заготовки (рис. 43):

$$z = r_0 - y \operatorname{tg} \beta_1, \quad (103)$$

где r_0 — радиус описанной окружности шестигранной заготовки; $\beta_1 = 30^\circ$ — угол наклона стороны шестигранной заготовки к оси oy .

Уравнение поверхности калибра может быть получено из совместного решения двух уравнений. Каждое поперечное сечение вала плоскостью, параллельной плоскости zox , ограничено окружностью с центром в точке K и с радиусом R_y :

$$R_y^2 = (R_0 - z)^2 + x^2. \quad (104)$$

Так как радиус вала R_y переменный по ширине калибра, воспользуемся функцией вида $R_y = R_y(y)$:

$$R_y = R + CD, \quad (105)$$

где $R = R_0 - r_1$ — радиус по дну калибра; r_1 — радиус описанной окружности калибра.

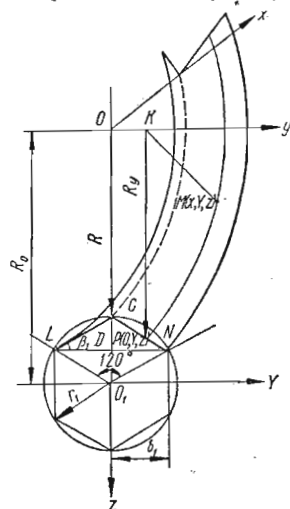


Рис. 43. Схема для определения площади контактной поверхности при прокатке шестигранного профиля в чистовом калибре блока по системе калибров шестигранник — шестигранник.

Величину CD определяем из треугольника CDN (рис. 43):

$$CD = DN \operatorname{tg} \beta_1 = y \operatorname{tg} \beta_1. \quad (106)$$

Подставляя выражение (106) в уравнение (105), получаем

$$R_y = R + y \operatorname{tg} \beta_1. \quad (107)$$

Решая совместно выражения (104) и (107), получаем уравнение формы калибра:

$$x^2 = \left(R + \frac{\sqrt{3}}{3} y \right)^2 - (R_0 - z)^2. \quad (108)$$

Из выражений (103) и (108) находим уравнение линии, ограничивающей горизонтальную проекцию контактной поверхности:

$$x^2 = \left(R + \frac{\sqrt{3}}{3} y \right)^2 - \left(R_0 - r_0 + \frac{\sqrt{3}}{3} y \right)^2. \quad (109)$$

Для определения площади F_k горизонтальной проекции контактной поверхности необходимо проинтегрировать выражение (109):

$$F_k = 2 \int_0^{b_1} \sqrt{\left(R + \frac{\sqrt{3}}{3} y \right)^2 - \left(R_0 - r_0 + \frac{\sqrt{3}}{3} y \right)^2} dy,$$

где $b_1 = \frac{\sqrt{3}}{2} r_1$ (рис. 43).

После несложных преобразований

$$F_k = 2 \int_0^{b_1} \sqrt{y(R - R_0 - r_0) 2 \frac{\sqrt{3}}{3} + [R^2 - (R_0 - r_0)^2]} dy.$$

Это табличный интеграл, после решения которого получаем формулу для определения площади горизонтальной проекции контактной поверхности:

$$F_k = \frac{2}{\sqrt{3}(R - R_0 + r_0)} \left(\sqrt{[r_1(R_0 + r_0) + R^2 - (R_0 - r_0)^2]} - \sqrt{[R^2 - (R_0 - r_0)^2]} \right).$$

Для сравнения расчетных величин контакта металла с валками с экспериментальными данными круглые свинцовые образцы прокатывали в круглых трехвалковых калибрах с получением недокатов. Исследования проведены в калибрах диаметром 11, 22, 38, 45 и 50 мм. Переднюю границу очага деформации отделяли от плоскости входа (по дну ручья валка) отрезком, равным расчетной дуге захвата:

$$l = \sqrt{(R_0 - r_1)(d_0 - d_1)}.$$

Таблица 7
Значения площади горизонтальной проекции поверхности контакта металла с валком

d_1 , мм	d_0 , мм	Опытное значение F_k , мм ²	Расчетное значение, мм ²		Относительные отклонения, %	
			F_{k1} по формуле (92)	F_{k2} по формуле (97)	$\frac{\Delta F_{k1}}{F_k} 100$	$\frac{\Delta F_{k2}}{F_k} 100$
50,60	52,00	647	682	618	+5,40	-4,43
50,65	53,00	851	888	815	+4,37	-4,25
45,00	47,80	865	858	794	-0,81	-8,2
37,75	38,90	440	469	428	+6,60	-2,72
37,78	41,00	763	781	733	+2,22	-3,95
21,90	23,00	259	271	251	+4,23	-3,08
21,92	24,00	359	372	352	+3,62	-1,94
21,95	25,00	475	449	434	-5,25	-8,60
11,15	12,85	178	172	167	-3,37	-6,30

Очаг деформации фотографировали, а полученные значения площади контакта после планиметрирования изменяли на величину масштаба, определенного путем сравнения действительных размеров с размерами на фотографии. Сравнение опытных и расчетных значений площади контакта металла с валком (табл. 7) показало их близкую сходимость.

На электронной вычислительной машине «Минск-22» выполнили расчеты по полученным теоретическим формулам и построили кривые, ограничивающие проекцию поверхности контактов в предчистовом и чистовом калибрах (рис. 44). В результате математической обработки кривых получены более простые и удобные для расчетов уравнения площади поверхности контакта металла с валками для

предчистового пропуски:

$$F_k = 0,96d_1l, \quad (110)$$

для чистового пропуски

$$F_k = \frac{r_1}{r_0} \sqrt{r_0^2 - r_1^2} \cdot l. \quad (111)$$

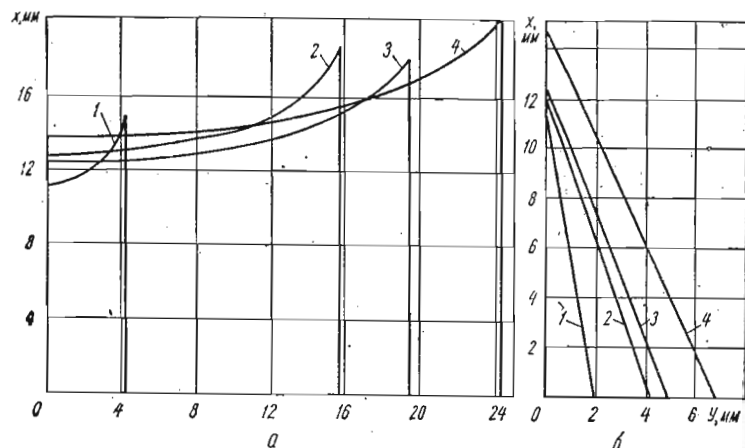


Рис. 44. Расчетные кривые, ограничивающие поверхность контакта металла с валком:

a — предчистовой калибр; б — чистовой; 1 — для круглой стали диаметром 10 мм; 2 — 36 мм; 3 — 45 мм; 4 — 56 мм.

Величина F_k , определенная по формулам (110) и (111), отличается от точного значения площади контакта не более чем на 3%.

УДЕЛЬНОЕ ДАВЛЕНИЕ МЕТАЛЛА НА ВАЛКИ

Основным параметром прокатки, определяющим оптимальный технологический процесс, надежность и долговечность работы оборудования блока, является давление металла на валки, которое при определенных термомеханических параметрах обрабатываемого материала во многом зависит от напряженного состояния металла при прокатке в калибре. Известные формулы для расчета среднего удельного давления при многовалковой прокатке [52, 55, 65, 74] получены на основании метода Кармана — Целикова, который базируется на некоторых допущениях.

Процесс горячего калибрования простых профилей в калибрующих блоках предполагает деформацию металла с относительно небольшими степенями деформации, равными 1–10%. При таком режиме деформации горячекалиброванной круглой стали параметр очага деформации, принимаемый в виде l/d_1 , изменяется в диапазоне 0,25...2,28, т. е. когда формулы для расчета удельного давления, получаемые методом Кармана — Целикова, приближенно отражают

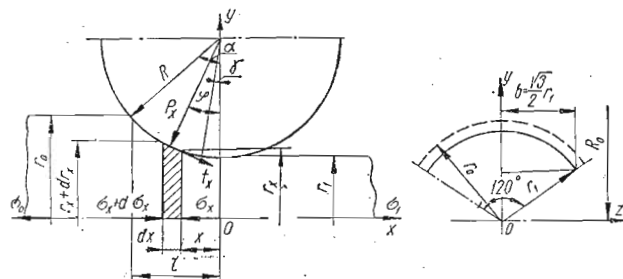


Рис. 45. Схема элементарных сил, действующих на калибруемый металл в зоне отставания.

основные закономерности процесса прокатки толстых полос [54]. Поэтому для случаев прокатки, когда параметр l/h_{cp} близок к единице, вводят коэффициент n''_{σ} , получаемый опытным путем [54], а удельные давления рассчитывают по формуле

$$p_{cp} = (1 \dots 1,15) \sigma_s n''_{\sigma},$$

где 1...1,5 — коэффициент Лоде, учитывающий влияние среднего главного нормального напряжения на предел текучести σ_s ; n''_{σ} — коэффициент, учитывающий влияние внешних зон на величину среднего удельного давления.

Для определения аналитическим путем удельных давлений при калибровании в круглых калибрах трехвалковых клетей, когда $l/d_1 > 1$, воспользуемся методом, разработанным А. И. Целиковым [60], принимая дополнительные допущения: любое поперечное сечение очага деформации, перпендикулярное оси прокатки, представляет круг; так как разность окружных скоростей по контуру калибра (ручья) невелика и составляет 0,7—13% для круглой стали диаметром 6–70 мм, то распределение удельного давления по ширине трехвалкового калибра усредняем, считая его постоянным.

Рассмотрим условие равновесия элементарного объема, выделенного в зоне отставания (рис. 45), ограниченного поверхностями трех валков и двумя плоскостями, перпендикулярными направлению прокатки и расположенными на расстоянии dx друг от друга. На выделенный элемент с правой и левой стороны действуют силы

$$\sigma_x \pi r_x^2 \text{ и } (\sigma_x + d\sigma_x) \pi (r_x + dr_x)^2,$$

где σ_x и $(\sigma_x + d\sigma_x)$ — средние нормальные напряжения сжатия; r_x и $(r_x + dr_x)$ — радиусы сечений.

Проекцию контактной поверхности выделенного объема определяем как произведение элементарной длины дуги окружности валка $\frac{dx}{\cos \varphi}$ на текущее значение ширины y .

$$dF = y \frac{dx}{\cos \varphi}.$$

Горизонтальные проекции сил, действующих со стороны валков на выделенный элемент в зоне отставания,

$$-3p_x \sin \varphi \cdot y \frac{dx}{\cos \varphi};$$

$$3\tau_x \cos \varphi \frac{2\pi r_x}{3} \cdot \frac{dx}{\cos \varphi},$$

где p_x — удельное давление валков на металл; φ — угол между касательной к дуге выделенного элемента и горизонтальной плоскостью; τ — касательное напряжение от сил трения на контактной поверхности.

Условие равновесия сил, действующих на выделенный элемент,

$$\Sigma X = (\sigma_x + d\sigma_x)(r_x + dr_x)^2 - \sigma_x r_x^2 - 3p_x \operatorname{tg} \varphi y dx + 2\tau_x r_x dx = 0.$$

Пренебрегая бесконечно малыми величинами высшего порядка, после преобразований получим

$$2\sigma_x r_x dr_x + d\sigma_x r_x^2 - \frac{3}{\pi} p_x y \operatorname{tg} \varphi dx + 2\tau_x r_x dx = 0. \quad (112)$$

Учитывая форму поверхности контакта металла с валком, без большой погрешности ширину очага деформации принимаем постоянной и равной

$$y = \sqrt{3} r_x = \sqrt{3} r_1.$$

Принимаем изменение касательных напряжений в зонах отставания и опережения по закону сухого трения с по-

стоянным коэффициентом трения, т. е.

$$\tau_x = \nu \bar{p}_x,$$

где ν — коэффициент трения между металлом и валком.

Заменяя дугу захвата хордой, выразим dx через $\frac{dr_x}{\operatorname{tg} \varphi}$ и, усредняя далее значение текущего угла φ , получим

$$\operatorname{tg} \varphi = \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = \frac{l}{D},$$

где $l = \sqrt{R \Delta h}$ — длина дуги захвата; R — радиус валка по дну калибра; $D = D_0 - d_1$ — идеальный диаметр валка; $\Delta h = d_0 - d_1$ — обжатие металла; d_0 — диаметр заготовки; d_1 — диаметр калиброванного круглого профиля.

Подставляя выражения dx , τ_x и $\operatorname{tg} \varphi$ в уравнение (112), после преобразования получим

$$\sigma_x dr_x + \frac{1}{2} d\sigma_x r_x - \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} p_x dr_x + p_x \nu \frac{D}{l} dr_x = 0.$$

Введя обозначение $1 - \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} + \nu \frac{D}{l} \cong \nu \frac{D}{l} = \delta$, с погрешностью, не превышающей 3—4%, окончательно находим

$$[\sigma_x - p_x(1 - \delta)] dr_x + \frac{1}{2} d\sigma_x r_x = 0. \quad (113)$$

Решаем полученное условие (113) с основным уравнением пластичности

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_s, \quad (114)$$

где $\sigma_1 = p_x (\cos \varphi + \nu \sin \varphi)$ — максимальное главное напряжение; $\sigma_3 = \sigma_x$ — минимальное главное напряжение; σ_s — предел текучести металла при данной степени, скорости и температуре деформации.

Принимая $\cos \varphi = 1$ (при $\varphi = 0 \dots \alpha$), запишем уравнение пластичности в виде

$$p_x - \sigma_x = \sigma_s, \quad (115)$$

откуда

$$dp_x = d\sigma_x. \quad (116)$$

Решив совместно уравнения (113)—(116), получим

$$2(p_x \delta - \sigma_s) dr_x = -dp_x r_x. \quad (117)$$

После разделения переменных, интегрирования выражения (117) и преобразования удельное давление для зоны

отставания будет описываться уравнением

$$p'_x = \frac{\sigma_s}{\delta} \left[\left(\frac{r_0}{r_x} \right)^{2\delta} (\delta - 1) + 1 \right]. \quad (118)$$

При решении аналогичной задачи получим удельное давление для зоны опережения

$$p''_x = \frac{\sigma_s}{\delta} \left[\left(\frac{r_x}{r_1} \right)^{2\delta} (\delta + 1) - 1 \right]. \quad (119)$$

При натяжении металла между клетями блока и чистовой клетью стана с учетом граничных условий при $x = l$ $p_x = \sigma_s - \sigma_0$, при $x = 0$ $p_x = \sigma_s - \sigma'$, где σ_0 и σ' — переднее и заднее натяжения.

После интегрирования и преобразований уравнения (117) с учетом натяжения удельное давление для зоны отставания

$$p'_x = \frac{\sigma_s}{\delta} \left[\left(\frac{r_0}{r_x} \right)^{2\delta} (\xi_0 \delta - 1) + 1 \right], \quad (120)$$

аналогично для зоны опережения

$$p''_x = \frac{\sigma_s}{\delta} \left[\left(\frac{r_x}{r_1} \right)^{2\delta} (\xi_1 \delta + 1) - 1 \right], \quad (121)$$

где $\xi_0 = 1 - \frac{\sigma_0}{\sigma_s}$; $\xi_1 = 1 - \frac{\sigma'}{\sigma_s}$.

Зная аналитический закон распределения удельного давления по дуге захвата и пренебрегая разностью вертикальных составляющих сил трения в зонах отставания и опережения, находим среднее удельное давление. Для этого просуммируем удельные давления на протяжении всей длины очага деформации и результат разделим на горизонтальную проекцию поверхности контакта металла с валком:

$$p_{cp} = \frac{y_{cp} \left(\int_{l_y}^l p'_x \frac{dx}{\cos \varphi} \cos \varphi + \int_0^{l_y} p''_x \frac{dx}{\cos \varphi} \cos \varphi \right)}{F_k},$$

где $y_{cp} = \frac{1}{l} \int_0^l f(x) dx$ — средняя ширина очага деформации.

Ранее установлено, что $y_{cp} = \sqrt{3} r_1$. Изменяя пределы интегрирования и устанавливая их для зоны отставания

от r_0 до r_n , а для зоны опережения от r_n до r_1 , получаем

$$p_{cp} = \frac{2\sqrt{3} r_1 \sigma_s}{\delta \Delta h F_k} \left(\int_{r_0}^{r_n} p'_x dr_x + \int_{r_n}^{r_1} p''_x dr_x \right). \quad (122)$$

Подставляя в уравнение (122) значение p'_x и p''_x из выражений (120) и (121), находим формулу для расчета среднего удельного давления металла на валки в трехвалковом калибре с учетом переднего и заднего натяжений при прокатке по системе калибров круг — круг:

$$p_{cp} = \frac{2\sqrt{3} r_1 \sigma_s}{\Delta h (4\delta^2 - 1) F_k} \left\{ 4r_n \left[(\xi_1 \delta + 1) \left(\frac{r_n}{r_1} \right)^{2\delta} - (2\delta + 1) \right] + r_0 (2\delta + 1) + r_1 (2\delta - 1) \right\}; \quad (123)$$

$$\delta = v \frac{D}{l}.$$

Положение критического сечения будет соответствовать точке пересечения кривых распределения удельных давлений в зонах отставания и опережения. Поэтому для определения $\frac{r_n}{r_1}$ совместно решаем уравнения (120) и (121), принимая $r_x = r_n$:

$$\left(\frac{r_0}{r_x} \right)^{2\delta} (\xi_0 \delta - 1) + 1 = \left(\frac{r_x}{r_1} \right)^{2\delta} (\xi_1 \delta + 1) - 1,$$

откуда

$$\left(\frac{r_n}{r_1} \right)^{2\delta} = \frac{1 + \sqrt{1 + (\xi_0 \delta - 1)(\xi_1 \delta + 1) \left(\frac{r_0}{r_1} \right)^{2\delta}}}{\xi_1 \delta + 1}. \quad (124)$$

В частном случае при отсутствии натяжения, т. е. при $\xi_0 = \xi_1 = 1$,

$$\left(\frac{r_n}{r_1} \right)^{2\delta} = \frac{1 + \sqrt{1 + (\delta^2 - 1) \left(\frac{r_0}{r_1} \right)^{2\delta}}}{\delta + 1}. \quad (125)$$

Положение критического сечения по уравнениям (124) и (125) дает возможность также решить некоторые задачи кинематики процесса прокатки и, в частности, опережения металла валков. Для облегчения при практических расчетах

по формулам (123) и (125) построены графики $\frac{r_n}{r_1} = f(\delta, \epsilon)$,

и $n'_\sigma = \frac{p_{cp}}{\sigma_s} = f(\delta, \epsilon)$ (рис. 46 и 47).

Уравнения, полученные для расчета удельных давлений при горячем калибровании круглой стали, можно обобщить

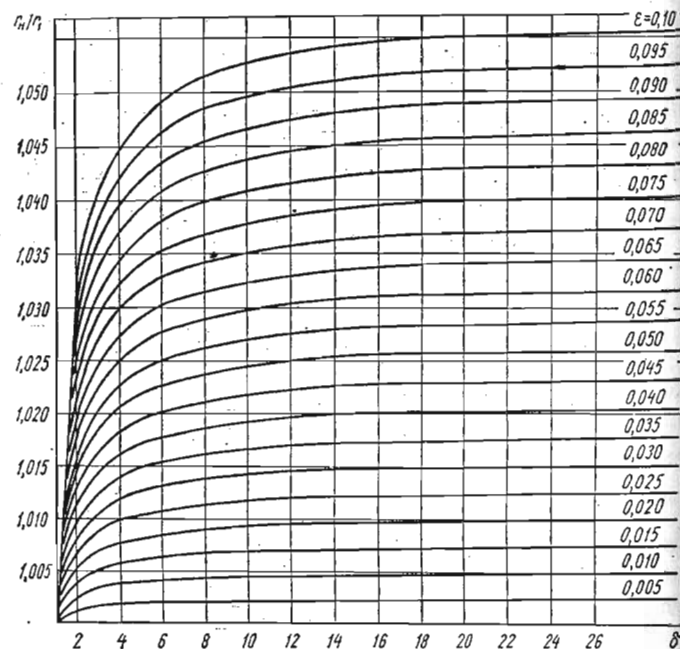


Рис. 46. Номограмма для определения радиуса круглого профиля в нейтральном сечении очага деформации.

для шестигранной стали. Исходный размер шестигранной заготовки

$$r_0 = \frac{r_{0вп} + r_{0оп}}{2},$$

где $r_{0вп}$, $r_{0оп}$ — радиусы вписанной и описанной окружности заготовки.

Конечный размер калиброванной стали

$$r_1 = \frac{r_{1вп} + r_{1оп}}{2},$$

где $r_{1вп}$, $r_{1оп}$ — радиусы вписанной и описанной окружности готового профиля.

При расчете удельного давления металла на валки необходимо знать величину истинного предела текучести, который определяется маркой стали, температурой металла, степенью и скоростью деформации при прокатке. Степень деформации при прокатке, в отличие от осадки,

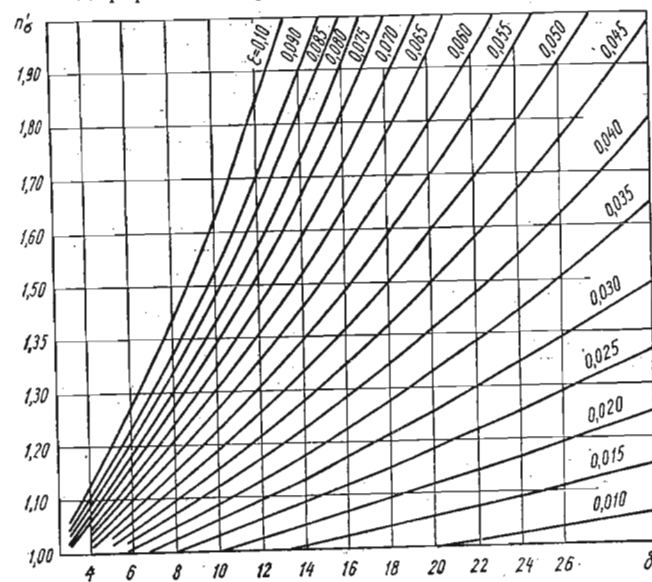


Рис. 47. Номограмма для определения коэффициента $n'_\sigma = p_{cp}/\sigma_s = f(\delta, \epsilon)$.

переменная по длине дуги захвата. Рассматривая третью часть поперечного сечения прокатываемой круглой стали в трехвалковом калибре, находим текущее относительное обжатие

$$\epsilon_x = \frac{F_0 - F_x}{F_0},$$

где $F_0 = \frac{\pi r_0^2}{3}$ — площадь поперечного сечения заготовки;

$F_x = \frac{\pi r_x^2}{3}$ — текущее значение площади поперечного сечения очага деформации.

Тогда

$$\epsilon_x = 1 - \frac{r_x^2}{r_0^2}. \quad (126)$$

Заменяя дугу захвата хордой, получаем выражение для текущего радиуса

$$r_x = \frac{\Delta r}{l} x + r_1,$$

где $\Delta r = r_0 - r_1$.

После подстановки выражения r_x в формулу (126) и преобразования, получаем

$$\varepsilon_x = 1 - \frac{\frac{\Delta r^2}{l^2} x^2 + \frac{2r_1 \Delta r}{l} x + r_1^2}{r_0^2}. \quad (127)$$

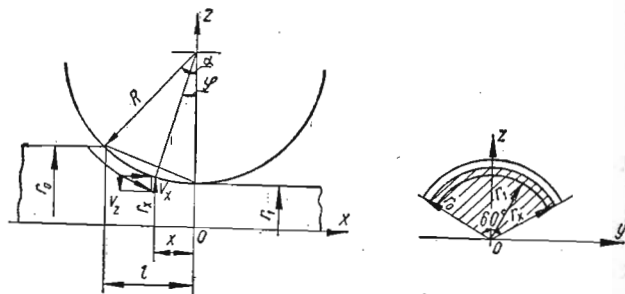


Рис. 48. Схема к определению скорости деформации.

Средняя по длине очага деформации относительная степень деформации

$$\varepsilon_{cp} = \frac{1}{l} \int_0^l \varepsilon_x dx. \quad (128)$$

Подставляя в выражение (128) значение ε_x из формулы (127), получаем

$$\varepsilon_{cp} = \frac{1}{3} \left(2 - \frac{r_1}{r_0} - \frac{r_1^2}{r_0^2} \right).$$

Используя методику, изложенную в работе [63], определяем текущее значение скорости деформации как отношение скорости изменения высоты полосы к текущей высоте (рис. 48):

$$u_x = \frac{v_z}{r_x}, \quad (129)$$

где v_z — скорость перемещения металла в вертикальном направлении; r_x — половина высоты полосы на расстоянии x от оси валков.

Принимая допущение о том, что высота полосы по ширине ручья изменяется незначительно, получаем

$$v_z = v_x \operatorname{tg} \varphi.$$

Из условия постоянства объема при плоской деформации

$$v_x = v_1 \frac{F_1}{F_x},$$

где v_1 — скорость металла при выходе из валков. Тогда

$$v_z = v_1 \frac{F_1}{F_x} \operatorname{tg} \varphi.$$

Подставляя это уравнение в выражение (129), получаем

$$u_x = v_1 r_1^2 \frac{\operatorname{tg} \varphi}{r_x^3}.$$

Средняя по длине очага деформации скорость деформации

$$u_{cp} = \frac{1}{l} \int_0^l u_x dx,$$

или

$$u_{cp} = \frac{v_1 r_1^2}{l} \int_0^l \frac{\operatorname{tg} \varphi}{r_x^3} dx. \quad (130)$$

Приближенно можно принять $\operatorname{tg} \varphi \cong \varphi = \frac{dr_x}{dx}$. Подставляя это выражение в уравнение (130) и изменяя пределы интегрирования, получаем

$$u_{cp} = \frac{v_1 r_1^2}{l} \int_{r_1}^{r_0} \frac{dr_x}{r_x^3},$$

откуда

$$u_{cp} = \frac{v_1 r_1^2}{l} \left(\frac{1}{r_1^2} - \frac{1}{r_0^2} \right),$$

или

$$u_{cp} = \frac{v_1}{2l} \left(1 - \frac{r_1^2}{r_0^2} \right).$$

СОПРОТИВЛЕНИЕ ДЕФОРМАЦИИ

В реальных процессах горячей обработки металлов давлением сопротивление деформации зависит не только от термомеханических параметров (температуры, степени и скорости деформации), а также и от того, по какому пути происходило развитие деформации во времени. При этом нет однозначной зависимости между напряжениями и деформациями [4, 26, 42, 69].

Пластическую деформацию металлов сопровождают такие явления, как наклеп и рекристаллизация, отдых и возврат, которые оказывают значительное влияние на уровень напряжений. Степень упрочнения и степень разупрочнения металла во время пропуска и во время пауз на прокатном стане различны. Процессы упрочнения и разупрочнения в термодинамическом отношении не равновесны, и от их соотношения зависит величина сопротивления деформации металла по клетям стана. Поэтому при определении сопротивления деформации необходимо учитывать путь развития деформации и величину деформации, начиная от первой клетки.

Таким образом, для правильного расчета основных энергосиловых параметров (давление металла на валки, натяжение, моменты прокатки и т. д.) процесса необходимо знать действительное значение сопротивления деформации, отвечающее реальным условиям процесса. Учесть эту особенность позволяют некоторые уравнения теории ползучести [4], разработанные применительно к обработке металлов давлением А. А. Поздеевым, В. И. Еремеевым [43, 44] и др.

Обобщенное уравнение теории старения для горячей пластической деформации можно записать в виде

$$\sigma = \varphi(\varepsilon) f(t). \quad (131)$$

Из этого выражения видно, что при горячей пластической деформации с конечными скоростями уровень напряжений определяется соотношением между процессами упрочнения и разупрочнения. Причем интенсивность их протекания существенно зависит от времени, в течение которого они развиваются, т. е. от скорости деформации. Как известно из экспериментальных данных [20, 31], сопротивление горячей пластической деформации возрастает с увеличением скорости деформации до некоторого предельного значения,

когда процесс деформации протекает практически мгновенно и поэтому не происходит разупрочнения металла. Функция $\varphi(\varepsilon)$ характеризует эту предельную кривую, которая хорошо аппроксимируется выражением [59]

$$\varphi(\varepsilon) = b - (b - a)e^{-B\varepsilon},$$

где a, b, B — постоянные, характерные для данного материала и температуры.

Функция $f(t)$ характеризует снижение сопротивления деформации вследствие разупрочнения. Для практических расчетов процесса прокатки уравнение (131) представим в виде [27]

$$\sigma_s = [b - (b - a)e^{-B\varepsilon}] [1 - A_1(1 - e^{-\lambda_1 t}) - A_2(1 - e^{-\lambda_2 t}) - A_3(1 - e^{-\lambda_3 t})], \quad (132)$$

где A_i, λ_i — параметры ползучести, характеризующие данную среду (марку стали) при заданной температуре; $\varepsilon = \ln \frac{h_0}{h}$ — степень деформации; t — время, отсчитываемое от начала процесса.

Таким образом, для определения сопротивления деформации необходимо знать параметры ползучести при заданной температуре и режим деформирования, т. е. время и степень деформации.

Для случая прокатки в реверсивной клетке стана время в i -м пропуске

$$t_i = \sum_{i=1}^n t'_i + \frac{1}{2} \sum_{i=2}^n (t_{m(i-1)} + t_{mi}) + \sum_{i=1}^n t_{n(i-1)},$$

где t'_i — время прохождения выделенного элемента полосы через очаг деформации; t_m — машинное время; t_n — время паузы между пропусками.

При прокатке в непрерывной группе прокатного стана

$$t_i = \sum_{i=1}^n t'_i + \sum_{i=1}^n t_k,$$

где t_k — время нахождения полосы между клетями.

Уравнение (132) должно с достаточной для практических расчетов точностью описывать экспериментальные данные по сопротивлению деформации, которые представляют обычно в виде кривых упрочнения (рис. 49) или в виде ско-

ростных зависимостей, т. е. для использования выражения (132) в практических расчетах необходимо знать величины параметров ползучести. Так как определение этих параметров сводится к решению системы трансцендентных уравнений, что требует большого объема вычислений, разработана инженерная методика определения параметров ползучести [27], в которой получены выражения для определения параметров уравнения (132). По методике, изложенной в работе [27], определены параметры ползучести для 2 марок стали с хорошей сходимость экспериментальных расчетных данных (рис. 49).

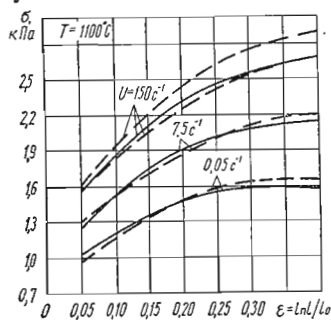


Рис. 49. Кривые упрочнения стали X18H12M2T.

четов разработана [51] номограмма (рис. 50), позволяющая существенно снизить объем вычислений при расчете энергосиловых параметров горячей обработки металлов, т. е. свести его к элементарным геометрическим построениям арифметическим операциям. Дело в том, что уравнение (132) представляет собой произведение функций

$$\Phi_1 = [a + (b - a)(1 - e^{-B\varepsilon})];$$

$$\Phi_2 = [1 - A_1(1 - e^{-\lambda_1 t}) - A_2(1 - e^{-\lambda_2 t}) - A_3(1 - e^{-\lambda_3 t})];$$

В каждую функцию Φ_1 и Φ_2 входят однотипные экспериментальные соотношения типа $y = c(1 - e^{-\tau})$, где $\tau = B\varepsilon$ или $\tau = \lambda_i t$ ($i = 1, 2, 3$). Поэтому для всех этих соотношений можно иметь одну номограмму умножения последующим сложением результатов при помощи номограмм, соответствующих данной процедуре, т. е. значения Φ_1 и Φ_2 можно найти по общей номограмме.

Очевидно, функциональную шкалу $(1 - e^{-\tau})$ необходимо строить для $0,01 < \tau < 5,0$. Параметры A_i ($i = 1, 2, 3$) изменяются в пределах $0,01 \dots 1$ (шкала С), а параметр

$(b - a) = 1 \dots 100$ (шкала D). Результаты умножения параметра A_i на $(1 - e^{-\lambda_i t})$ читаются на шкале E, а параметра $(b - a)$ на $(1 - e^{-B\varepsilon})$ — на шкале F. Параметр a изменяется в пределах $1 \dots 100$ (шкала G₁).

Определим функцию $\Phi_1 = [a + (b - a)(1 - e^{-B\varepsilon})]$.

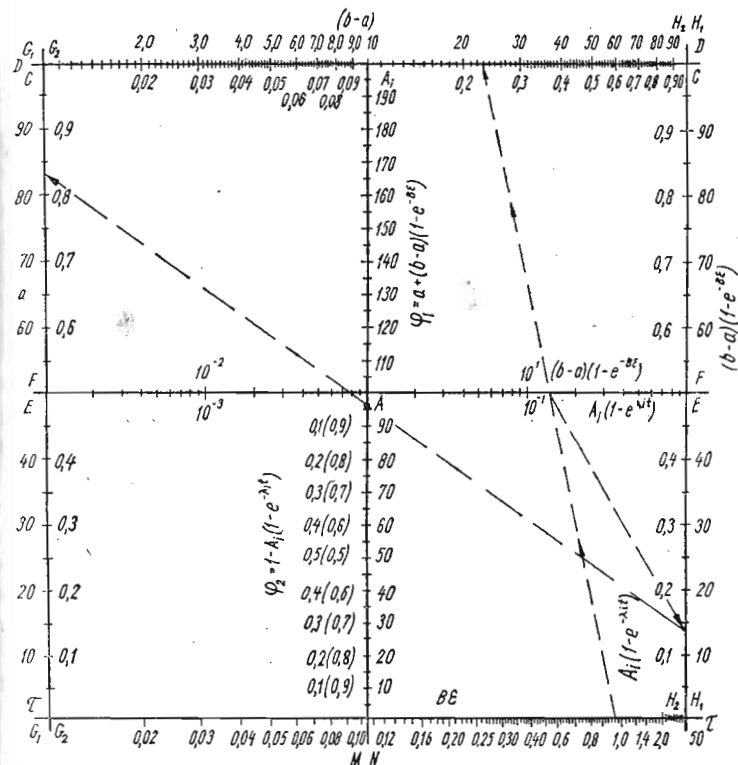


Рис. 50. Номограмма для определения функций Φ_1 и Φ_2 .

Для этого значение $B\varepsilon$ устанавливаем на шкале τ , а $(b - a)$ — на шкале D. Результат $(b - a)(1 - e^{-B\varepsilon})$ читаем на шкале F и переносим на шкалу H₁. Значения параметра a устанавливаем на шкале G₁, а окончательный результат для функции Φ_1 читаем на шкале N (точка A).

Определим функцию $\Phi_2 = [1 - A_i(1 - e^{-\lambda_i t})]$. Значение $\lambda_i t$ устанавливаем на шкале τ , а параметр A_i — на шкале C. Результат $A_i(1 - e^{-\lambda_i t})$ читаем на шкале E.

Расчетные параметры для определения

сопротивления деформации

Номер про-пуска	μ	$L, \text{ м}$	$\sigma_1, \text{ МПа}$	$l_i, \text{ мм}$	$t_i', \text{ с}$	$t_m, \text{ с}$
1	1,12	2,24	2,34	138	0,0585	0,95
2	1,15	2,57	2,36	138	0,0585	1,09

ε	$t_i', \text{ с}$	$B\varepsilon$	$\lambda_1 t_i'$	$\lambda_2 t_i'$	$\lambda_3 t_i'$	$\sigma_s, \text{ Па}$
0,157	0,0585	0,73	14,5	0,45	0,00084	16,7
0,182	3,14	1,58	780	24	0,045	17,5

Для определения величины $[1 - \sum A_i (1 - e^{-\lambda_i t_i'})]$ используем номограммы сложения: $G_2 - M - H_2$.

Для примера определим сопротивление деформации при прокатке заготовок $350 \times 350 \times 2000$ мм из стали X18H12M2T в реверсивной обжимной клети с валками диаметром 750 мм за два пропуска. Частота вращения валков составляет 60 об/мин, пауза между пропусками — 2 с, температура прокатки — 1100°C , обжатие по пропускам $\Delta h_1 = \Delta h_2 = 50$ мм. Параметры ползучести для стали X18H12M2T при температуре 1100°C имеют следующие значения: $A_1 = 0,197$, $A_2 = 0,183$, $A_3 = 0,250$, $\lambda_1 = 248 \text{ с}^{-1}$, $\lambda_2 = 7,65 \text{ с}^{-1}$, $\lambda_3 = 0,0143 \text{ с}^{-1}$, $a = 11,5 \text{ Па}$, $b = 33,2 \text{ Па}$, $B = 4,65$. Необходимые дополнительные расчетные величины сведены в табл. 8.

Определим функцию φ_1 для обоих пропусков: $B\varepsilon_1 = 0,73$, $B\varepsilon_2 = 1,58$, $(b - a) = 21,7 \text{ Па}$, $a = 11,5 \text{ Па}$. Значения $B\varepsilon_1 = 0,73$ устанавливаем на шкале τ , $(b - a) = 21,7$ — на шкале D . Результат $(b - a) (1 - e^{-B\varepsilon_1}) = 11,2$ читаем на шкале F и переносим на шкалу H_1 . Значение параметра $a = 11,5$ устанавливаем на шкале G_1 , а окончательный результат для функции $\varphi_1 = 22,7 \text{ Па}$ читаем на шкале N . Аналогично для второго пропуска $\varphi_1 = 290 \text{ Па}$.

Определим функцию φ_2 для обоих пропусков. Параметры $\lambda_1 t_i'$ для обоих пропусков имеют большие значения, как и параметр $\lambda_2 t_i'$ во втором пропуске (шкала построена до 5,0). Поэтому первое произведение для указанных пропусков принимает значения $A_1 (1 - e^{-\lambda_1 t_i'}) = A_1$ и $A_2 (1 - e^{-\lambda_2 t_i'}) = A_2$ соответственно. Произведение $\lambda_3 t_i'$ для первого пропуска очень мало, поэтому третий член суммы равен нулю, т. е. $A_3 (1 - e^{-\lambda_3 t_i'}) = 0$. Остается найти значение $A_2 (1 - e^{-\lambda_2 t_i'})$ для первого и $A_3 (1 - e^{-\lambda_3 t_i'})$ для второго пропуска.

Значение $\lambda_2 t_i'$ устанавливаем на шкале τ , а A_2 — на шкале C . Результат читаем на шкале E , величину $A_2 (1 - e^{-\lambda_2 t_i'})$ (первый пропуск) переносим на шкалу H_2 и складываем со значением A_2 , установленным на шкале G_2 . Результат сложения и его вычитание из единицы (значения в скобках) читаем на шкале M ($\varphi_2 = 0,735$). Аналогичные процедуры проводим при определении функции φ_2 для второго пропуска ($\varphi_2 = 0,619$). Перемножив функции φ_1 и φ_2 , получим величину сопротивления деформации для данного пропуска.

ДАВЛЕНИЕ МЕТАЛЛА НА ВАЛКИ И МОМЕНТ ПРОКАТКИ

Полное давление металла на валки [63]

$$P = p_{\text{ср}} F_K,$$

и среднее удельное давление

$$p_{\text{ср}} = n_\sigma \sigma_s,$$

где $n_\sigma = n'_\sigma n''_\sigma$ — коэффициент напряженного состояния; n'_σ — коэффициент влияния внешнего трения, который можно определить по формуле (123) или по графику (рис. 47); n''_σ — коэффициент влияния внешних зон, определяемый по экспериментальным данным; F_K — площадь контакта металла с валком [формулы (92) и (101)]; σ_s — сопротивление деформации [формула (132)].

Влияние внешних зон на давление металла при прокатке было исследовано А. И. Целиковым, В. В. Смирновым [62], В. Ф. Пушкаревым [47], Ф. Е. Долженковым [24], А. А. Динником [21], М. Я. Бровманом [9] и др. Исследованиями М. Я. Бровмана [9] установлено, что при прокатке в калибрах влияние внешних зон менее существенно, чем при прокатке на гладкой бочке.

В связи с отсутствием данных о влиянии внешних зон на величину давления при горячем калибровании в трехвалковых клетях, авторами проведены экспериментальные исследования по этому вопросу. Влияние внешних зон изучали по методике В. Ф. Пушкарева [47]. Были изготовлены специальные круглые свинцовые и алюминиевые образцы с проточками, передняя часть которых имела намного большую длину, чем задняя, и при прокатке соответствовала случаю дефор-

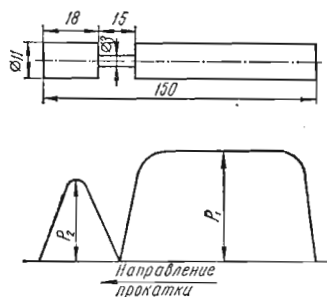


Рис. 51. Схема опытного образца и осциллограмма давления металла на валки при исследовании влияния внешних зон.

мации металла с внешними зонами, а вторая часть образца, соединенная с передней тонкой перемычкой, соответствовала длине очага деформации. Поперечное сечение обеих частей заготовки было одинаковое. Прокатку образцов осуществляли в промышленных трехвалковых клетях 330 мм с записью на осциллографе усилия прокатки. Значение n_σ определяли как частное от деления величины давления при прокатке первой и второй частей заготовки.

Схема опытного образца диаметром 11 мм и типовая осциллограмма давления металла на валки при прокатке в предчистовой клетки блока показаны на рис. 51. По результатам исследования построен график (рис. 52), позволяющий определять коэффициент n_σ влияния внешних зон в зависимости от отношения длины дуги контакта металла с валком к диаметру калибруемого круглого профиля при горячем калибровании в предчистовой клетки блока.

В результате обработки методами математической статистики экспериментальных данных получили эмпирическую формулу

$$n_\sigma = \left(\frac{l}{d_1}\right)^{-0,23}.$$

ми, передняя часть которых имела намного большую длину, чем задняя, и при прокатке соответствовала случаю дефор-

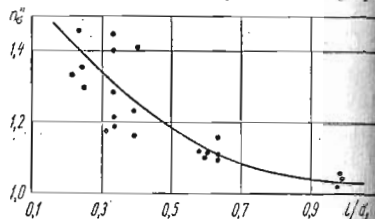


Рис. 52. График значений коэффициента $n_\sigma = f\left(\frac{l}{d_1}\right)$.

Полный момент прокатки в круглом калибре трехвалковой клетки

$$M = 3 \int_{\gamma}^{\alpha} \tau_x' R dF - 3 \int_0^{\gamma} \tau_x'' R dF,$$

где τ_x' и τ_x'' — элементарные силы трения в зоне отставания и опережения; γ — нейтральный угол; $dF = y \frac{dx}{\cos \varphi}$ — элементарная контактная площадь.

Так как $y = y_{cp} = \sqrt{3}r_1$, то по рис. 45

$$r_x = \frac{r_0 - r_1}{l} x + r_1.$$

откуда $dx = \frac{2l}{\Delta h} dr_x$.

Принимая $\cos \varphi = \cos \frac{\alpha}{2} \cong 1$ и $\tau_x = \nu p_x$, получаем

$$M = 3 \sqrt{3} r_1 R \nu \frac{2l}{\Delta h} \cdot \frac{\sigma_s}{\delta} \left\{ \int_{r_H}^{r_0} \left[(\delta - 1) \left(\frac{r_0}{r_x} \right)^{2\delta} + 1 \right] dr_x - \int_{r_1}^{r_H} \left[(\delta + 1) \left(\frac{r_x}{r_1} \right)^{2\delta} - 1 \right] dr_x \right\}.$$

Решая это уравнение, находим формулу для определения суммарного для трех валков момента прокатки

$$M = 6 \sqrt{3} r_1 R l \nu \frac{\sigma_s}{\Delta h (4\delta^2 - 1)} \left\{ r_0 (2\delta + 1) - r_1 (2\delta - 1) + \frac{2r_H}{\delta} \left[(\delta + 1) \left(\frac{r_H}{r_1} \right)^{2\delta} - (2\delta + 1) \right] \right\},$$

с учетом натяжения металла между клетями

$$M = 6 \sqrt{3} r_1 R l \nu \frac{\sigma_s}{\Delta h (4\delta^2 - 1)} \left\{ r_0 (2\delta + 1) - r_1 (2\delta - 1) + \frac{2r_H}{\delta} \left[(\xi_1 \delta + 1) \left(\frac{r_H}{r_1} \right)^{2\delta} - (2\delta + 1) \right] \right\}, \quad (133)$$

где $\frac{r_H}{r_1}$ — отношение, определяемое по формуле (125).

Коэффициент плеча приложения равнодействующей по А. И. Целикову [63]

$$\psi = \frac{\int_0^l p_x dx}{l \int_0^l p_x dx} \quad (134)$$

Находим выражения (см. рис. 45) $x = \frac{l}{\Delta r} (r_x - r_1)$ и $dx = \frac{l}{\Delta r} dr_x$. Подставляя их, а также уравнения (118) и (119) в формулу (134), получаем

$$\psi = \frac{d_1}{\Delta h} \left[\frac{A}{r_1(B+K)} - 1 \right],$$

$$\text{где } A = \frac{r_n^2}{\delta - 1} \left[\left(\frac{r_1}{r_n} \right)^{2\delta} - 1 \right]; B = \frac{4r_n}{4\delta^2 - 1} \left[(\delta + 1) \left(\frac{r_1}{r_n} \right)^{2\delta} - (2\delta + 1) \right]; K = \frac{r_0(2\delta + 1) + r_1(2\delta - 1)}{4\delta^2 - 1}.$$

В общем случае мощность прокатки [63] определяется по формуле

$$N = M \frac{v_1}{(1+S)R} - \sigma_0 F_0 v_0 + \sigma' F_1 v_1, \quad (135)$$

где M — момент, необходимый для вращения валков при прокатке с натяжением, определяемый по формуле (133); R — радиус валка по дну калибра; S — опережение; σ_0 — натяжение на входе и выходе очага деформации; F_0 — площадь сечения полосы до и после прокатки; $v_0 = \frac{v_1}{\mu}$, $v_1 = \frac{\pi D_k n}{60}$ — скорость металла при прокатке на входе и выходе очага деформации; D_k — катающий диаметр; $\mu = \frac{F_0}{F_1}$ — коэффициент вытяжки.

Таким образом, имея необходимые данные, можно рассчитать мощность прокатки по выражению (135).

Для оценки фактических величин давления металла на валки и моментов прокатки были проведены исследования в полупромышленных и промышленных условиях на трехвалковых клетях стана ДонНИИчермета (рис. 53) и калибрующего блока стана 350-1 ММЗ. Основное оборудование

стана включает пять трехвалковых клеток 330 мм конструкции ЭЗТМ. Каждая клетка имеет индивидуальный привод от электродвигателя 3 типа ДП-62 постоянного тока мощностью 46 кВт. Привод трех клеток осуществлен через редукторы 4, остальные клетки имеют безредукторный привод. Вспомогательное оборудование стана состоит из дисковой пилы 6 для горячей и холодной резки металла, карманов 5 для готового проката и приемного рольганга 9. Рабочие клетки снабжены привалковой арматурой. Основное и вспомогательное оборудование стана установлено на станине и пяти рамах, укрепленных на общем фундаменте, в котором предусмотрен канал для слива воды и отстойник для окалины. В комплект стана входят пять рабочих и пять запасных трехвалковых клеток, перевалка которых производится с помощью кран-балки 1 грузоподъемностью 30 кН. Нагрев металла до необходимой температуры при прокатке осуществляется в электрической нагревательной печи 11

типа ОКБ-210. Схема питания и управления электроприводом стана включает пять тиристорных управляемых агрегатов 10 типа ТА-90-460 мощностью 90 кВт каждый, шкаф питания 7 и пульт управления 2. Электрическая схема позволяет осуществлять плавную регулировку частоты вращения валов двигателей в пределах 0...860 об/мин.

Для замера давления металла на валки использовали кольцевую мессдозу [3], которую установили в узле подшипниковой опоры оси валка. При исследовании крутящих моментов применяли способ измерения с использованием проволочных тензодатчиков, наклеенных на цилиндрическую поверхность вала клетки. Сигналы тензодатчиков

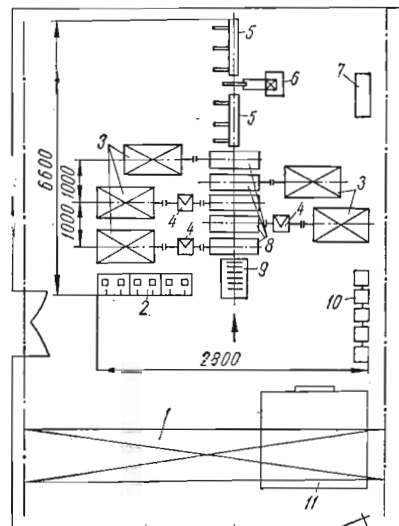


Рис. 53. Опытно-промышленный пятиклетевой блок трехвалковых клеток.

во время прокатки записывали на осциллографическую ленту.

Режимы деформации металла, указанные в табл. 9, могут быть использованы при расчетах на прочность глав-

Таблица 9

Режимы деформации металла при калибровании в трехвалковых клетях

Материал	Температура металла перед прокаткой, °С	Диаметр калибруемого круга, мм	Абсолютное обжатие, мм	Степень деформации, %	Коэффициент вытяжки	Давление металла на валки, кН	Момент прокатки, кН·м	Коэффициент плеча равнодействующей
Круглый профиль диаметром 11 мм								
Алюминий	20	10,95	1,75	14,2	1,20	26,2	0,628	0,474
Медь	20	10,90	1,00	8,4	1,07	29,0	0,364	0,330
Латунь	20	10,90	1,10	9,2	1,06	41,0	0,456	0,275
Сталь 40ХН	970	10,90	0,30	2,7	1,02	12,5	0,105	0,394
Сталь 40Х	1100	10,95	1,05	9,2	1,13	20,5	0,390	0,471
Сталь 45	950	10,90	0,30	2,7	1,01	10,5	0,085	0,403
Сталь 60С2	1050	10,98	1,02	9,2	1,10	27,6	0,593	0,537
Сталь 15	1030	10,95	1,05	9,2	1,12	23,5	0,400	0,421
Ст 3	910	10,95	1,05	9,2	1,20	21,0	0,263	0,320
Круглый профиль диаметром 22 мм								
Сталь 55С2	920	21,78	1,52	6,9	1,11	53,0	1,320	0,530
Сталь 40Х	995	21,77	1,53	6,9	1,11	40,0	0,870	0,460
12ХНЗА	1000	21,78	1,52	6,9	1,10	38,0	0,800	0,472
Сталь 40Х	1050	21,70	0,80	3,6	1,03	15,3	0,296	0,583
Сталь 20	1040	21,70	0,80	3,6	1,03	16,0	0,332	0,625
Сталь 45	1100	21,70	0,80	3,6	1,03	15,6	0,306	0,595
Сталь 45	930	21,70	0,80	3,6	1,03	17,5	0,350	0,605
Ст 3	1040	21,80	2,50	10,7	1,20	48,6	1,620	0,555
Круглый профиль диаметром 36 мм								
Ст 3	910	36,33	2,17	5,63	1,10	73,5	3,04	0,756
Сталь 45	920	36,16	1,14	3,06	1,04	33,3	0,70	0,595
Сталь 45	935	36,20	1,40	3,74	1,07	49,1	1,79	0,835
Сталь 45	930	36,20	1,90	5,00	1,09	57,4	1,98	0,690
Сталь 45	890	36,20	2,40	6,30	1,10	78,6	2,89	0,655

ной линии калибрующего блока. Фактические значения давлений при прокатке в ряде случаев близки к допускаемым, а значения крутящих моментов значительно ниже допускаемых для существующих трехвалковых клетей типа ВУ-69, предназначенных для работы в условиях больших натяжений при редуцировании труб.

Рис. 54. График экспериментальных значений величины

$$\psi = f\left(\frac{l}{d_1}\right).$$

Одновременные замеры полного давления металла на валки и момента прокатки позволили определить величину коэффициента ψ плеча равнодействующей из условия $M = 3P\psi l$. Откуда

$$\psi = \frac{M}{3Pl},$$

где P и M — давление и момент прокатки, определенные экспериментально; l — длина дуги захвата.

Экспериментальные значения величины ψ , представленные в функции l/d_1 , показаны на рис. 54.

КАТАЮЩИЙ ДИАМЕТР

Скорость выхода металла из валков при прокатке в калибрах определяется величиной катающего диаметра или радиуса. Известно несколько способов расчета величины R_k при двухвалковой прокатке [5, 8]. Для определения скорости выхода металла из валков в круглом трехвалковом калибре воспользуемся методом [67], который основан на предположении, что искомая величина равна частному от деления площади эпюры окружных скоростей точек калибра на его ширину:

$$v_1 = \frac{1}{b} \int_0^b v_x dx.$$

Окружная скорость в любой точке поверхности ручья (рис. 55)

$$v_x = \frac{\pi R_x n}{30}, \quad (136)$$

где n — частота вращения валков, об/мин.

Переменный радиус валка на круглой части калибра

$$R_x = R_0 - y = R_0 - \sqrt{r_1^2 - x^2}, \quad (137)$$

где R_0 — идеальный радиус валка; r_1 — радиус калибра.

На рассматриваемом участке ручья площадь эпюры скоростей

$$F_{\Sigma 1} = 2 \int_0^{r_1 \sin \varphi} v_x dx. \quad (138)$$

После решения выражения (138) с учетом уравнений (136) и (137) получаем

$$F_{\Sigma 1} = \frac{\pi n}{30} r_1 \left\{ D_0 \sin \varphi - r_1 \left[\sin \varphi \cos \varphi + \left(\frac{\pi}{3} - \beta \right) \right] \right\},$$

где $\varphi = 60 - \beta$; $\beta = \arccos \frac{r_1}{r_0}$ — угол выпуска калибра.

Площадь эпюры скоростей на участках калибра с прямолинейными выпусками определяется как площадь двух трапеций:

$$F_{\Sigma 2} = (v_2 + v_3) (b - r_1 \cos \alpha).$$

После подстановки значений

$$v_2 = \frac{\pi n}{30} (R_0 - r_1 \sin \alpha), \quad v_3 =$$

$$= \frac{\pi n}{30} \left(R_0 - \frac{r_1}{2 \cos \beta} \right), \text{ получаем}$$

$$F_{\Sigma 2} = \frac{\pi n}{30} r_1 \left[D_0 - r_1 \left(\sin \alpha + \frac{1}{2 \cos \beta} \right) \right] \left(\frac{\sqrt{3}}{2 \cos \beta} - \cos \alpha \right).$$

Просуммировав значения площадей эпюр скоростей, определяем среднее значение окружной скорости

$$v_{\text{ср}} = \frac{F_{\Sigma 1} + F_{\Sigma 2}}{2b} = \frac{\pi n}{30 \sqrt{3}} \left(D_0 \frac{\sqrt{3}}{2} - H r_1 \right),$$

где

$$H = \left(\frac{\pi}{3} - \beta \right) \cos \beta + \frac{\sqrt{3}}{2} \left[\sin (30 + \beta) + \frac{1}{2 \cos \beta} \right] - \frac{\cos (30 - \beta)}{2}.$$

Средний радиус валка

$$R_{\text{ср}} = R_0 - \frac{H}{\sqrt{3}} r_1,$$

или

$$R_{\text{ср}} = R_0 - W r_1, \quad (139)$$

где $W = \frac{H}{\sqrt{3}}$ — величина, характеризующая угол выпуска калибра. Для практических расчетов можно принять $R_k \cong R_{\text{ср}}$.

Таким образом, определяя величину $R_{\text{ср}}$ в зависимости от формы калибра из выражения (139), можно получить

Таблица 10

Значения катающих диаметров

Диаметр круглой стали, мм	L, мм	n, об/мин	t, с	W	D _к , мм		δ, %
					опыт- ные данные	рас- чет- ные	
38	1720	600	0,18	0,846	302	298	1,3
40	1720	600	0,18	0,846	302	296	3,5
50	1720	600	0,19	0,847	286	288	0,7

значение катающего радиуса. Величина W изменяется в пределах 0,840...0,847 для круглой стали диаметром 10—30 мм и 0,844...0,848 диаметром 32—56 мм.

Для проверки формулы (139) катающий диаметр определяли по формуле

$$D_k = \frac{60L}{\pi n t},$$

где L — расстояние между клетями калибрующего блока; t — время прохождения переднего конца полосы межклетевого промежутка. Результаты проверки приведены в табл. 10.

НЕЙТРАЛЬНЫЙ УГОЛ И ОПЕРЕЖЕНИЕ

При определении опережения металла валков и нейтрального угла в случае прокатки круглой стали в круглом калибре трехвалковой клетки принимаем, что скорость продольного течения металла по высоте его сечения постоянна, значение коэффициента трения постоянно вдоль дуги захвата, ширина очага деформации вдоль линии дуги захвата не изменяется и любое сечение в очаге деформации,

перпендикулярное оси прокатки, представляет круг. Величину нейтрального угла можно найти, если известно положение нейтрального сечения, которое определяется из решения уравнений (118), (119) и (124).

Из рис. 56 искомая величина

$$\sin \gamma = \frac{r_n - r_1}{R \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}.$$

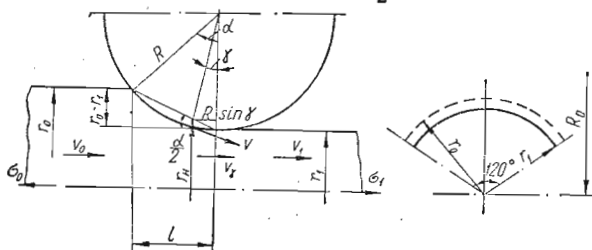


Рис. 56. Схема к определению опережения металлом валков и нейтрального угла в круглом калибре.

Принимая $\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = \frac{\Delta h}{2l}$, после несложных преобразований получаем

$$\sin \gamma = \frac{2r_1}{\sqrt{R\Delta h}} \left(\frac{r_n}{r_1} - 1 \right).$$

Учитывая, что для малых значений углов $\sin \gamma \approx \gamma$, находим выражение для определения нейтрального угла, по виду совпадающее с выражением А. И. Целикова [63] и отличающееся формулой для расчета отношения r_n/r_1 :

$$\gamma = \frac{d_1}{l} \left(\frac{r_n}{r_1} - 1 \right). \quad (140)$$

Отношение $\frac{r_n}{r_1}$, характеризующее положение нейтрального сечения, рассчитываем по формуле (124) или определяем по графику (см. рис. 46).

При определении скоростного режима прокатки для непрерывного процесса, а также при определении крутящих моментов прокатки и усилий, возникающих в полосе между клетями, важно знать величину опережения, которая определяется по формуле

$$S = \left(\frac{v_1}{v} - 1 \right), \quad (141)$$

где v_1 и v — скорость полосы на выходе из валков и окружающая скорость валков.

Из условия постоянства секундных объемов металла при прокатке

$$v_1 F_1 = v_n F_n \cos \gamma,$$

где F_1 и F_n — площади сечения полосы на выходе металла из валков и в нейтральном сечении; v_1 и v_n — соответствующие скорости металла.

По рис. 56 $r_n = r_1 + R(1 - \cos \gamma)$. Отсюда находим

$$v_1 = \frac{v}{F_1} F_n \cos \gamma = \frac{v[r_1 + R(1 - \cos \gamma)^2] \cos \gamma}{r_1^2}. \quad (142)$$

Подставляя уравнение (142) в выражение (141), принимая $1 - \cos \gamma \approx \frac{\gamma^2}{2}$, $\cos \gamma = 1$ и пренебрегая четвертыми степенями угла γ , получаем

$$S = \gamma^2 \left(\frac{R}{r_1} - 0,5 \right).$$

Зная значения угла γ по выражению (140), находим

$$S = \frac{2r_1^2}{R(r_0 - r_1)} \left(\frac{r_n}{r_1} - 1 \right)^2 \left(\frac{R}{r_1} - 0,5 \right). \quad (143)$$

При прокатке круглой стали небольшого диаметра, когда отношение $\frac{R}{r_1}$ велико, уравнение (143) можно упростить:

$$S = \frac{2d_1}{\Delta h} \left(\frac{r_n}{r_1} - 1 \right)^2. \quad (144)$$

Таким образом, формулы (143) и (144) получены для расчета опережения с учетом неравномерного распределения удельных давлений по дуге захвата и с учетом натяжения.

Экспериментальное определение величины опережения проводили методом керновых отпечатков. Влияние температуры учитывали по формуле

$$l_1 = l_0(1 + \alpha_T t),$$

где l_1 и l_0 — расстояние между отметками на полосе в горячем и холодном состоянии; α_T — коэффициент температурного расширения; t — температура металла при прокатке.

Отклонение экспериментальной величины опережения от расчетной по формуле (143) составило примерно 10%, что позволяет использовать полученное выражение для инженерных расчетов.

Глава IV

ТЕХНОЛОГИЯ И ПРАКТИКА РАБОТЫ КАЛИБРУЮЩИХ БЛОКОВ

РЕЖИМ ОБЖАТИЯ

Для наиболее эффективной работы калибрующего блока по повышению точности сортовой стали необходим правильный выбор режима обжатия металла, который должен обеспечивать следующие основные условия: обжатие металла в первой клетке калибрующего блока по всему рабочему периметру калибра; минимальную разность давлений металла на валки в каждой клетке блока в одном сечении раската для сокращения разности упругих перемещений валков трехвалковой клетки.

Для определения оптимального режима деформации круглой стали в блоке трехвалковых клетей проведем анализ геометрических размеров подката для блока, применяемых форм и размеров чистовых двухвалковых калибров и технического уровня оборудования чистовой линии стана. Прокатка круглой стали на двухвалковых станах с различным расположением клетей при постоянно изменяющихся параметрах процесса вызывает колебание размеров сечения проката в продольном и поперечном направлениях. Некоторые возможные на практике виды дефектов поперечного сечения круглой стали (рис. 57) позволяют оценить необходимую степень деформации в трехвалковых клетях и ее соответствие указанным основным условиям.

Искажение сечения круглой стали в процессе прокатки обусловлено:

1) переполнением металлом чистового калибра вследствие повышенной высоты овала в предчистовой клетке (рис. 57, а и б);

2) неправильной настройкой привалковой арматуры, смещенной относительно центра калибра вдоль оси валков (рис. 57, в, г, д, з и к) или повернутой на некоторый угол вокруг оси прокатки (рис. 57, ж и л);

3) незаполнением металлом калибра чистовой клетки вследствие недостаточной высоты овала в предчистовой калибре (рис. 57, в, г, д, ж и к);

4) осевым смещением валков (рис. 57, е и з) при настройке стана или в процессе прокатки;

5) местной выработкой чистового калибра (рис. 57, и) на участке «плеч» при прокатке «тупого» овала;

6) местной выработкой дна чистового калибра (рис. 57, л), обусловленной прокаткой овала в предчистовой клетке с переполнением калибра.

Большинство перечисленных дефектов принципиально присущи и шестигранной стали.

Небольшое переполнение металлом чистового круглого калибра (рис. 57, а и б) без образования острых углов, а также увеличение размера d_2 по дну ручьев калибра (рис. 57, л) устраняется, как показал опыт, в калибрующем блоке без образования поверхностных дефектов. Следствием остальных видов дефектов является уменьшение диаметра d_2 на участках сечения, соответствующих разьему валков чистовой клетки. Если диаметр d_1 круглых калибров клетей калибрующего блока принять равным диаметру d_0 круглого калибра чистовой клетки прокатного стана, то после горячего калибрования раската овальность круглой стали будет соответствовать овальности после обычной прокатки, превышающей в два — пять раз допускаемые отклонения на калиброванную сталь. Для того, чтобы овальность круглой стали соответствовала техническим возможностям клетей блока и высоким требованиям к точности размеров сечения калиброванной стали, необходимым условием является превышение диаметра круглого калибра чистовой клетки стана над диаметром калибра предчистовой клетки блока, равное $\Delta h_{\min} = d_0 - d_2$. Это обеспечивает обжатие металла валками трехвалковой клетки по всему периметру калибруемой стали, т. е. первое необходимое условие.

Величина $(d_0 - d_2)$ не может быть определена однозначно для всех типов прокатных станов и размеров поперечных

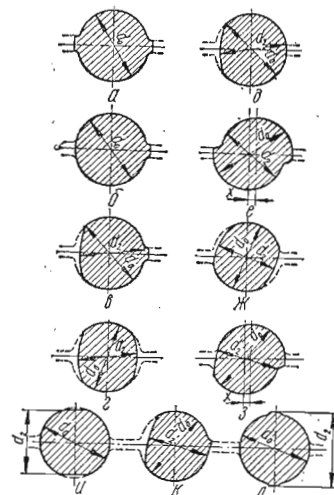


Рис. 57. Дефекты поперечного сечения круглой стали, образованные в процессе прокатки.

сечений профилей и зависит от конструкции чистовой группы клетей, материала валков и их калибровки, надежности работы привалковой арматуры, качественного нагрева заготовки, точности настройки рабочих клетей стана, количества марок стали, прокатываемых в партии металла, квалификации обслуживающего персонала. Современные рабочие клетки с более точной настройкой валков, особенно в осевом направлении, и надежной их фиксацией, в частности объемно-напряженные клетки, обеспечивают минимальное осевое смещение валков. Высокая износостойкость

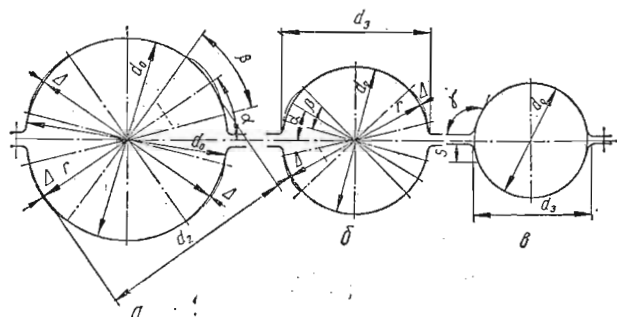


Рис. 58. Круглые калибры чистовых клетей стана:
а — трехрадиусные; б — двухрадиусные; в — однорадиусные.

материала валков снижает местную выработку чистового круглого калибра в процессе прокатки партии металла, а определенное приближение формы предчистового овала к кругу с минимальным уширением в чистовом калибре создает предпосылки к снижению разности $(d_0 - d_2)$. Стабильность и правильный выбор температурного режима во многом определяют овальность подката для калибрующего блока. Точность настройки привалковой арматуры и надежное удержание от сваливания овала в чистовом круглом калибре сводит к минимуму дефекты, показанные на рис. 57, в, д, ж, з и к.

Для шестигранной стали минимальное обжатие по его граням, т. е. величина превышения диаметра вписанной окружности в чистовой калибр прокатного стана над диаметром вписанной окружности в калибр клетки калибрующего блока, также определяется существующей на данном стане фактической разнотолщи́нностью в одном сечении раската готового профиля. Фактическая разнотолщи́нность профиля в одном сечении $(d_0 - d_2)$ во многом определяется

формой чистового, например, круглого или шестигранного калибра стана. На рис. 58 показаны применяемые однорадиусные с выпусками, двух- и трехрадиусные круглые калибры для средне- и мелкосортных станов. Их использование обусловлено характером износа ручья калибра при длительной эксплуатации и величиной поперечной деформации в зависимости от размеров прокатываемого профиля и марки стали.

Таблица 11
Исходные параметры круглых двухвалковых калибров *

Диаметр круглой стали, мм	$\alpha_d, ^\circ$	$\beta_d, ^\circ$	Δ , мм	r , мм	$(d_0 - d_2)$, мм	$(d_2 - d_0)$, мм
Трехрадиусных						
58	35	40	0,2—0,25	29—34	0,4—0,5	—
Двухрадиусных						
45	30	30	0,15	24,7—27,9	—	0,3
Однорадиусных						
36	30	—	—	—	—	0,2—0,25
32	30	—	—	—	—	0,45—0,5
25	30	—	—	—	—	0,55
18	30	—	—	—	—	0,3—0,35

* По данным ММЗ и СМЗ.

Соотношение применяемых на практике размеров круглых калибров (табл. 11) показывает, что при расточке калибров (рис. 58, а и б) закладывается поперечная разнотолщи́нность профиля $(d_0 - d_2)$, которую нельзя существенно уменьшить настройкой чистовой клетки при прокатке. В процессе работы стана разность диаметров калибра уменьшается от неравномерного износа калибров до $d_2 \approx d_0$ и $d_1 > d_0$. Овальность калибра при прокатке круглой стали диаметром 32—56 мм из конструкционных марок в условиях ММЗ достигает 0,5 мм и более, что ухудшает работу трехвалковых клетей блока, вызывая увеличение необходимых обжатий и неравномерность нагрузки на валки предчистовой трехвалковой клетки. Прокатка качественных и высокоуглеродистых сталей диаметром 11—32 мм на однорадиусных круглых калибрах с выпусками в условиях СМЗ ведется с овальностью 0,3—0,55 мм.

Чистовые круглые калибры позволяют несколько изменить конструктивную овальность величиной уширения в направлении диаметра d_3 . Местная выработка по диаметру d_2 в этих калибрах и появляющаяся разница ($d_2 - d_0$) легко устраняются калибрующим блоком без образования дефектов на поверхности раската. Поэтому однорядные калибры с выпусками для чистовых клетей стана предпочтительнее для работы с калибрующим блоком и не только по

Таблица 12

Овальность круглой стали при обычной прокатке

Диаметр круглой стали или вписанной окружности шестигранной стали, мм	Количество прокатанного металла, т	Поле овальности, мм	Среднестатистические значения овальности, мм	Диаметр круглой стали или вписанной окружности шестигранной стали, мм	Количество прокатанного металла, т	Поле овальности, мм	Среднестатистические значения овальности, мм
Стан 350-1 ММЗ				Стан 320 СМЗ			
56	700	0,205—0,505	0,355	30	115	0,55—0,80	0,68
52	1040	0,050—0,455	0,355	25 *	46	0,30—0,60	0,50
50	1240	0,250—0,850	0,450	23	92	0,25—0,55	0,40
38	500	0,105—0,805	0,450	19 *	63	0,35—0,65	0,50
36	828	0,105—0,605	0,355	17	36	0,30—0,55	0,40
34	424	0,255—0,705	0,455	16	24	0,205—0,55	0,30
32	1400	0,105—0,705	0,405	12	51	0,25—0,50	0,40

* Шестигранная сталь.

условию регулировки овальности калибра, но и потому что они обеспечивают постоянство радиуса круглого калибра на участке в 240° , тогда как другие типы калибров только на участке $120—140^\circ$, что вызывает неравномерное нагружение контура трехвалкового предчистового калибра. Для сокращения участка с переменным радиусом необходимо уменьшить угол выпуска круглого калибра до $5—10^\circ$. Практически появление различных дефектов сечения овальности профиля зависит от сочетания конкретных условий. Поэтому знание фактической поперечной разнотолщинности круглого подката для калибрующих клетей позволит более правильно выбрать необходимое минимальное обжатие в предчистовой клетке блока.

Экспериментальное исследование точности поперечных размеров круглой и шестигранной стали (табл. 12) проводили на станах с шахматным и линейным расположением клетей. Пробы отбирали от середины раската через равные промежутки времени с измерением максимального и минимального диаметра в одном сечении. Из представленных результатов следует, что количество прокатанного металла в пределах исследованных партий не оказывало существенного влияния на поле овальности ввиду промежуточных подстроек чистовых клетей, а среднестатистические значения овальности для круглой стали исследуемых станов не имеют существенного отличия от поперечной разнотолщинности шестигранной стали. Исследование овальности в различных сечениях по длине раската показало, что изменение размеров сечения в основном происходит в направлении диаметров d_3 и d_2 (рис. 58). Колебание разности между максимальным и минимальным значениями диаметра в пределах $0,2...0,45$ мм по длине одного раската вызывает неодинаковые усилия работы предчистовой трехвалковой клетки особенно при изменении положения осей овальности вдоль раската. Максимальная овальность сечения (до 1,2 мм) проявляется на переднем и заднем концах раската на участках длиной 400—600 мм.

На основании анализа дефектов поперечного сечения при прокатке круглой и шестигранной стали, форм чистовых калибров и фактической поперечной разнотолщинности проката при работе калибрующих блоков в условиях станов 350 и 320 приняты однорядные калибры чистовых клетей станов с диаметром $d_0 = d_1 + (0,4...0,45)$, где d_1 — диаметр круглого калибра предчистовой трехвалковой клетки блока. Принятые калибры обеспечивают контроль геометрии подката по всему контуру в трехвалковых клетях при расчете диаметра d_1 на получение поля допускаемого отклонения после горячего калибрования $+0,0... -0,20$ мм. Уменьшение значения диаметра d_1 при постоянной величине d_0 позволяет получать любое необходимое поле с гарантированным контролем подката контуром трехвалкового калибра. Исследование влияния размеров и форм чистовых двухвалковых калибров на точность размеров круглой стали после горячего калибрования показало, что изменение калибровки чистовой двухвалковой клетки позволило исключить появление овальности свыше 0,20 мм. Однако изменение формы и абсолютного размера чистового калибра

не исключает влияния других переменных параметров на поперечную разнотолщинность горячекалиброванной стали, вызывающих различное давление металла на валки в одном сечении раската и несимметричное перемещение их в трехвалковой клети. Чем меньше фактическая овальность подката на стане, тем ниже овальность горячекалиброванной стали, обусловленная равномерным нагружением валков. Это необходимо учитывать при расчете режимов обжатия в существующих клетях блока и при разработке технологии горячего калибрования.

Кроме минимального $\Delta h_{\min}$, необходимо задавать и максимальное обжатие подката в калибрующих клетях, которое является исходным при расчете и построении калибров блока, а также при расчете, проектировании и выборе калибрующих клеток, системы их привода и станины блока. Естественно, чем ниже максимальное расчетное обжатие, тем на меньшие нагрузки должны быть рассчитаны калибрующие клетки, а следовательно, тем они проще, легче, дешевле. Максимальное расчетное обжатие металла в клетях блока определяется, прежде всего, конструктивными и технологическими параметрами чистовой группы клеток прокатного стана — жесткостью рабочих клеток, калибровкой валков, температурным режимом прокатки, величиной износа чистового калибра. Обобщающей характеристикой этих параметров, технического уровня и возможностей оборудования стана в получении точного проката может служить поле колебания размеров сечения подката, поступающего в клети калибрующего блока. В соответствии с ГОСТ 2590—71 поле колебания размеров можно выбрать в зависимости от прокатки подката по высокой, повышенной или обычной точности.

В табл. 13 приведены расчетные значения минимальных и максимальных обжатий круглой стали в клетях калибрующего блока, где величина максимального расчетного обжатия в два раза выше минимального: $\Delta h_{\max} = 2\Delta h_{\min}$. Увеличение значения максимального обжатия не приводит к дополнительному повышению точности проката, но ухудшает условия работы клеток блока ввиду роста давления металла на валки, увеличения износа трехвалковых калибров и сокращения срока службы комплекта клеток.

Режим обжатий в чистовой клети калибрующего блока отличается от режима обжатий в предчистовой тем, что чис-

товой калибр обкатывает металл в основном на участках технологических выпусков предчистового калибра с выполнением основных требований, позволяющих получать точный прокат. Обжатие металла осуществляется на участке 2 β (см. рис. 21) с максимальным значением $\Delta h_{\max}$ в направлении линии разъема валков с учетом утяжки в этом направлении в предчистовом калибре. Тогда

$$\Delta h_{\max} = r_0 - \Delta h_y - r_1,$$

где r_0 — максимальный радиус подката; Δh_y — величина утяжки.

Таблица 13
Расчетные обжатия при горячем калибровании круглой стали

Диаметр круглой стали, мм	Минимальное обжатие, мм, при точности прокатки подката			Максимальное обжатие, мм, при точности прокатки проката		
	высокой	повышен- ной	обычной	высокой	повышен- ной	обычной
5—9	0,15	0,35	0,4	0,3	0,7	0,8
10—19	0,2	0,3	0,4	0,4	0,6	0,8
20—25	0,25	0,35	0,45	0,5	0,7	0,9
26—48	0,35	0,45	0,55	0,7	0,9	1,1
50—58	0,5	0,6	0,7	1,0	1,2	1,4
60—78	0,6	0,7	0,8	1,2	1,4	1,6
80—95	0,7	0,8	0,9	1,4	1,6	1,8

В соответствии с теорией горячего калибрования, когда диаметр чистового трехвалкового калибра больше предчистового, а пересечение контуров калибра определяется по уравнению (66), можно найти угловые координаты пересечения контуров калибров и обжимаемую часть профиля в чистовой клети. Изменение величины обжатия в предчистовой клети приводит к росту $\Delta h_{\max}$ и угла φ_0 (см. рис. 21) с увеличением обжимаемой поверхности. Увеличение обжатия по линии выпуска происходит за счет упругого перемещения контура ручья в предчистовой клети блока, однако эти перемещения почти в два раза меньше, чем в направлении оси x , и поэтому создают незначительное приращение обжатия. Наличие утяжки и малого приращения обжатия по линии выпуска, а также принятые соотношения диаметров калибров обеспечивают надежную работу чистового калибра во всем диапазоне расчетных обжатий подката в предчистовой клети блока.

СКОРОСТНОЙ И ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМЫ

Знание фактического температурного режима прокатки на стане при работе с калибрующим блоком позволяет правильно рассчитать параметры горячего калибрования, учитывать особенности теплового режима при расчете форм и размеров трехвалковых калибров для обеспечения максимальной эффективности в повышении точности прокатки. Исследование температурного режима проводили в условиях стана 350-1 в течение прокатки партий металла с определением характера распределения температуры по длине раскатов. Круглую сталь диаметром

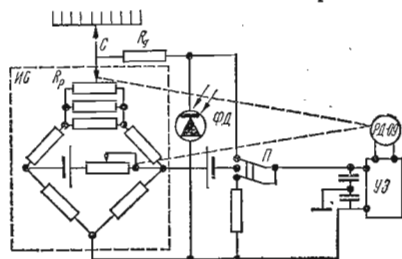


Рис. 59. Принципиальная схема пирометра для измерения температуры металла:

ИС — измерительная схема электронного потенциометра; R_p — реохорд; C — указатель; R_d — добавочный резистор; $\Phi Д$ — фотодиод; $П$ — переключатель.

32—38 мм прокатывали из квадратной заготовки 106×106 мм длиной 4,9 м, а сталь диаметром 40—56 мм — из заготовки 125×125 мм. Температуру металла при прокатке измеряли фотоэлектрическим пирометром (рис. 59), датчик температуры которого, укрепленный на специальном кронштейне, визировали на прокатываемую полосу на выходе из чистовой клетки калибрующего блока. Экспериментальное исследование температуры по длине раската показало (рис. 60), что характерным является прокатка с повышенной на $15\text{--}25^\circ\text{C}$ температурой средней части полосы. Последнее объясняется не только режимом нагрева заготовок в печи, но и схемой прокатки на стане. Диаметр и марка прокатываемой стали не оказывают существенного влияния на разность температур (табл. 14) между серединой и концом раската. Абсолютное поле колебаний температуры середины и конца раскатов в течение прокатки партий металла более чем в три раза выше разности между ними и в среднем составляет 70°C . Максималь-

ное значение поля колебаний температуры раската достигает 100°C при нарушении темпа прокатки из-за возможных поддержек в работе стана. Колебание температуры раскатов (табл. 15, рис. 61) от максимального до минимального значения составляет $45\text{--}90^\circ\text{C}$, что в основном объясняется недостаточной производительностью методических нагревательных печей и остановками стана на подогрев заготовок. Это приводит к колебаниям температуры металла во

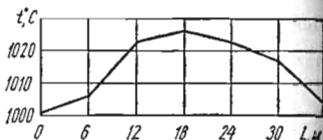


Рис. 60. Кривая изменения температуры по длине раската при прокатке круглой стали Ст 3сп диаметром 50 мм.

днее значение поля колебаний температуры раската достигает 100°C при нарушении темпа прокатки из-за возможных поддержек в работе стана. Колебание температуры раскатов (табл. 15, рис. 61) от максимального до минимального значения составляет $45\text{--}90^\circ\text{C}$, что в основном объясняется недостаточной производительностью методических нагревательных печей и остановками стана на подогрев заготовок. Это приводит к колебаниям температуры металла во

Таблица 14

Результаты статистической обработки замеров температуры

Диаметр круглой стали, мм	Марка стали	Температура, $^\circ\text{C}$			Средне-квадратичное отклонение температуры	Температурный перепад, $^\circ\text{C}$
		минимальная	максимальная	средняя		
36	Ст 3сп	930 *	1020	988	16,4	90
		900	1000	966	18,4	100
		960	1015	990	10,4	55
38	Сталь 45	940	995	976	10,3	55
		955	1020	992	12,4	65
		945	1000	975	14,0	55
40	Сталь 35	965	1050	1013	16,6	85
		950	1015	995	12,2	65
		995	1040	1015	9,9	45
40	Сталь 50Г	975	1030	1010	11,0	55
		935	1035	991	25,8	100
		930	1020	985	24,4	20

* В числителе приведена температура задней части раскатов, в знаменателе — средней части раскатов.

времени и потере точности прокатываемой стали. Разность средних значений температур при прокатке круглой стали различного диаметра не превышает 30°C . Некоторое выравнивание температур по профилям достигается скоростным режимом прокатки, составляющим для чистовой клетки стана 8—10 м/с. Температура начальной и конечной части раскатов в течение прокатки отличается большими колебаниями, чем температура средней части. Такой температурный режим несколько усложняет контроль профиля на стане, так как меньшие размеры его будут лежать в середине раската, а отбор проб осуществляется от конца раската.

Учет разности размеров профиля можно производить через влияние изменения температуры на сопротивление деформации металла при прокатке. Принимая экспоненциальную зависимость σ_s от температуры в виде [29]

$$\sigma_s = ae^{\kappa T} = ae^{\kappa \left(1 - \frac{T}{T_n}\right)},$$

Таблица 15

Результаты статистической обработки замеров температуры в партии прокатываемого металла

Диаметр круглой стали, мм	Марка стали	Температура, °C			Среднестатистическое отклонение температуры	Температурный перепад, °C
		минимальная	максимальная	средняя		
36	Ст 3сп	920	1001	971	17,3	81
38	Сталь 40	948	1008	983	11,8	60
38	Сталь 45	958	1005	982	9,7	47
40	Сталь 35	968	1027	1001	12,5	59
40	Сталь 50Г	988	1032	1011	10,0	44
50	Ст 3сп	933	1023	988	23,6	90

находим

$$\Delta\sigma = \frac{\sigma_s'' - \sigma_s'}{\sigma_s'} = \frac{\sigma_s''}{\sigma_s'} - 1 = \frac{ae^{\kappa \left(1 - \frac{T_2}{T_n}\right)}}{ae^{\kappa \left(1 - \frac{T_1}{T_n}\right)}} - 1 = e^{\kappa \frac{T_2 - T_1}{T_n}} - 1.$$

Разлагая экспоненту в ряд, получаем

$$\Delta\sigma = \kappa \frac{\Delta T}{T_n},$$

где T_n — температура плавления стали.

Параметр κ зависит от скорости деформации и по данным М. А. Зайкова [29] равен $\kappa = 4,94 - 0,31 \ln U$. По известному значению $\Delta\sigma$ и уравнению [123] можно определить величину приращения давления, используя зависимости (70) — (71), найти приращение диаметра прокатываемой стали при общем перепаде температуры в партии металла.

Скоростной режим работы калибрующего блока определяется его расположением в технологическом потоке прокатного стана и условием деформации металла в трехвалковых клетях. При последовательном расположении блока

(стан 350-1 ММЗ) скорость прокатки в предчистовой трехвалковой клетке определяется скоростью движения раската перед заходом в валки. Определенную скорость раскату сообщает отводящий рольганг стана в зависимости от

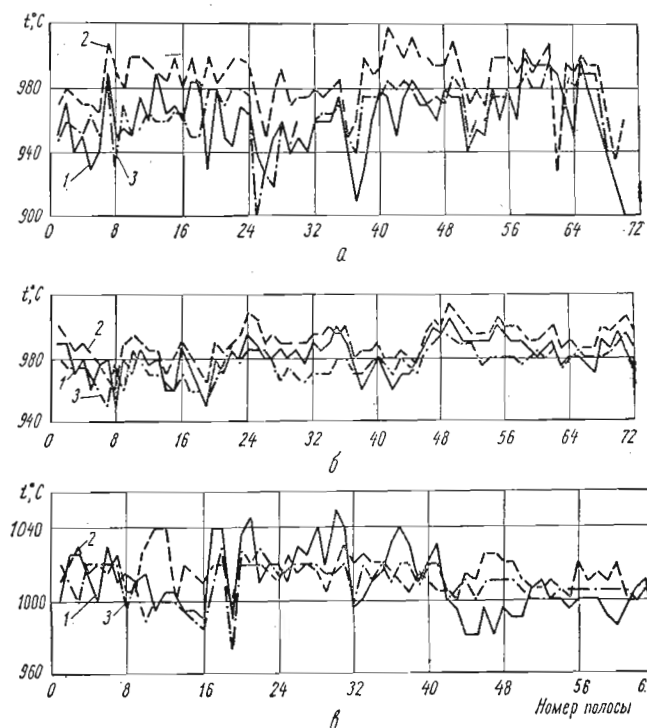


Рис. 61. Графики температурного режима прокатки круглой стали:

а — диаметром 36 мм, Ст 3сп; б — диаметром 38 мм, сталь 45; в — диаметром 40 мм, сталь 50Г; 1 — передний конец; 2 — середина раската; 3 — задний конец.

массы и длины заготовки при постоянной частоте вращения роликов рольганга. Для снижения динамических нагрузок в линии привода трехвалковых клетей и опрокидывающего момента, действующего на станину блока, а также рационального расположения раскатов на холодильнике после их выброса чистой калибрующей клетью скорость прокатки в предчистовой трехвалковой клетке принимают на 0,5 м/с больше скорости движения подката.

При непрерывном расположении блока (стан 320 СМЭ) скорость прокатки в предчистовой трехвалковой клети определяется катающим диаметром валков чистовой клети стана и частотой их вращения с учетом возможных колебаний в зависимости от прокатываемого сортамента и числа одновременно находящихся в клетях стана раскатов, приводимых от одного двигателя. Исходя из прежних условий и с целью предотвращения образования петли, частоту вращения валков предчистовой клети блока принимают на 8 об/мин больше частоты вращения валков чистовой клети стана, что в пересчете на равные катающие диаметры составляет 34,2 об/мин для двигателя привода трехвалковой клети при передаточном отношении 4,27 редуктора.

Рассогласование частоты между чистовой и предчистовой клетями блока принимают в пределах 10...15 об/мин; что исключает проскальзывание валков по поверхности металла при нормальной загрузке главных приводов и стабильном процессе прокатки. Исследования в промышленных условиях прокатки круглой стали диаметром 32—52 мм в калибрующем блоке трехвалковых клетей показали, что рассогласование частоты вращения валков клетей блока до 70 об/мин практически не отражается на изменении размеров поперечного сечения готового проката в пределах точности замеров. Это объясняется, прежде всего, тем, что формирование точного профиля клетями блока происходит без уширения металла, на участках которого в максимальной степени отражается влияние натяжения.

ИЗНОС КАЛИБРОВ ТРЕХВАЛКОВЫХ КЛЕТЕЙ

Одним из факторов, определяющих абсолютные размеры круглой стали и его овальность в процессе прокатки, является износ чистового калибра. Общий износ складывается из равномерного и местного износа валков по контуру калибра. Равномерный износ для проката простой формы в некоторой степени компенсируется периодической настройкой чистового калибра стана, тогда как местный износ практически полностью переходит на готовую продукцию. Характер и степень износа валков заданного материала определяется параметрами и технологией прокатки (схемой калибровки, формой чистового и предчистового калибра, разностью окружных скоростей точек контура калибра,

температурой и удельными давлениями при прокатке, работой валковой арматуры и т. п.), часть из которых переменна в процессе прокатки. Наибольший износ круглого двухвалкового калибра наблюдается в точках контура, лежащих примерно под углом 45° к горизонтальной оси калибра, а минимальный — у разьема валков, что в основном объясняется схемой калибровки овал — круг и неравномерным распределением удельных давлений по контуру калибра в чистовой клети. Разница износа по контуру чистового калибра достигает 0,3—0,35 мм при длительной его эксплуатации. Это вынуждает изменять форму чистового калибра для увеличения срока службы и обеспечения требований стандартов по размерам готового профиля.

Применение нерегулируемых трехвалковых клетей в калибрующих блоках обладает преимуществом в обеспечении высокой точности сечения при прокатке. Однако наличие одного калибра в таких клетях требует максимального сокращения влияния износа калибров на точность при горячем калибровании, так как количество прокатанного металла непосредственно зависит от характера и абсолютного износа трехвалковых калибров. Этого можно достичь применением износостойких валков и оптимальным режимом деформации в калибрующих клетях. Сравнительный анализ параметров процесса прокатки, влияющих на износ, показал, что применяемая схема калибровки круг — круг при горячем калибровании создает условия для более равномерного износа калибра по контуру за счет сокращения неравномерности деформации по ширине калибра по сравнению с прокаткой по системе овал — круг. Разность окружных скоростей по периметру ручья круглых калибров для клетей с различным количеством валков можно определить по формуле

$$\Delta v = \frac{\pi d n}{60} \left(1 - \cos \frac{\alpha_a}{2} \right),$$

где n — частота вращения валков; d — диаметр круглого калибра; α_a — угол между осями зазоров одного валка.

При $\alpha_a = 180$ и 120° (двух- и трехвалковые калибры) выражение в скобках равно 1,0 и 0,5, т. е. разность окружных скоростей при равенстве диаметров прокатываемой стали в два раза выше для двухвалкового калибра. Если принять, что удельное давление металла на валки равномерно распределяется по периметру калибра, то в точках, где скорость валка и полосы одинаковы, износ валков будет

минимальный. По мере удаления от этих точек к вершине или буртам калибра скольжение металла относительно валка изменяется в большей степени для двухвалкового калибра и увеличивает износ его поверхности.

Сокращения абсолютного износа калибров можно достичь уменьшением удельного давления при прокатке в чистовых калибрах. В трехвалковом калибре при более равномерном распределении обжатия по периметру калибра и меньших абсолютных его значениях удельные давления меньше, чем в чистовой клетке при обычной прокатке, где большая неравномерность деформации с максимальным значением обжатия в вершине калибра неблагоприятна с точки зрения износа калибра.

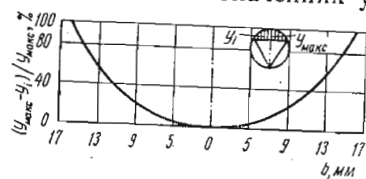


Рис. 62. Кривая износа ручья валка трехвалковой клетки.

Экспериментальное исследование износа круглых калибров трехвалковых клеток проводили с помощью свинцовых образцов, которые прокатывали в клетях после различного срока эксплуатации. Диаметр свинцового образца выбирали из условия переполнения калибра. После прокатки очередной партии металла в исследуемой клетке диаметр образца увеличивали на 0,15—0,20 мм для обеспечения одинаковых условий деформации элементов клетки при обжатии образца. За базовую плоскость измерения размеров образца принимали плоскость, проходящую через линию разреза трехвалкового калибра. Сегмент, ограниченный прямой, проведенной через точки пересечения осей разреза и контура калибра, разбивали на равные участки. Измерение высоты сегмента по ширине ручья калибра производили на микроскопе МИ-1 с точностью $\pm 0,01$ мм. Результаты измерения, выраженные в относительных единицах, характеризовали износ трехвалкового калибра (рис. 62).

В период исследования валки клетей блока были изготовлены из отбеленного чугуна с твердостью поверхности 68—70 единиц по Шору и глубиной отбеленного слоя до 30 мм. Установлен практически равномерный износ ручья одного валка и отсутствие существенной разницы в характере износа трех ручьев калибра. Это объясняется тем, что ориентация подката, поступающего в предчистовую клетку калибрующего блока, меняется за счет его поворота на отводящем рольганге за чистовой клетью стана. Поэтому

несимметричность нагружения валков трехвалковой клетки, вызванная овальностью круглого подката, носит переменный характер относительно контура калибра. При условии непрерывной прокатки между чистовой клетью стана и калибрующим блоком характер износа предчистового трехвалкового калибра изменяется, что подтверждается исследованием в условиях стана 320. Диапазон колебаний горизонтального размера и размера под углом 45° к горизонтальной оси двухвалкового калибра создает определенным образом ориентированную несимметричность нагружения трехвалковой клетки, вызывая местный износ калибра. Абсолютное значение разности износа по контуру составляет 0,05—0,1 мм, что значительно меньше, чем в двухвалковом калибре. Однако такое расположение блока позволяет управлять характером износа его калибров, формой подката по результатам измерения готовой стали.

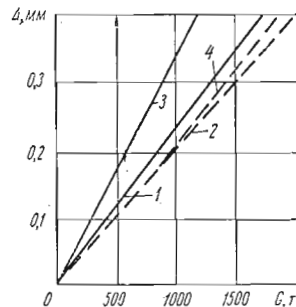


Рис. 63. Кривые зависимости износа калибров от количества прокатанного металла:

1 и 3 — предчистовый калибр блока (диаметр прокатываемого металла 38 и 36 мм соответственно); 2 и 4 — чистовой калибр блока.

Абсолютная величина износа калибров, измеренная по диаметру свинцовых образцов, составила 0,22—0,3 мм (рис. 63) на 1000 т проката. Сравнение поля отклонений абсолютных размеров круглой горячекалиброванной стали и износа калибров трехвалковых клетей подтверждает основную роль износа калибров в обеспечении необходимого поля допускаемых отклонений при прокатке большой партии металла, который обуславливает 80—90% поля, получаемого при горячем калибровании. Установлен опережающий износ предчистового калибра блока, выполняющего основную часть деформации в системе двух калибров. Сравнение расчетного изменения диаметра горячекалиброванной стали с экспериментальными данными точности прокатанного металла показывает (рис. 64) соизмеримость этих данных, что подтверждает не только основную роль износа валков клетей блока в увеличении размера металла, но и точность экспериментальных данных двух методов измерения.

Диаметральные размеры круглых калибров трехвалковых клетей в различных точках контура калибра после

прокатки партии металла, которые не удается в полной мере определить на свинцовых образцах, замеряли с помощью нутромера индикаторного типа НИ-18-50. Контур калибра для замеров (рис. 65) размечали с помощью специального

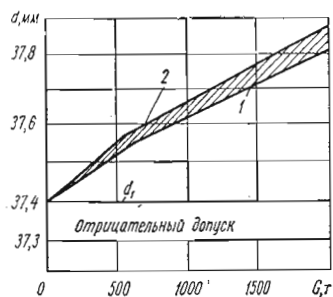


Рис. 64. График зависимости размеров круглой стали диаметром 38 мм от износа калибров клеток блока:

1 — предчистовой калибр; 2 — чистовой.

шаблона. Место разметки на периметре вала фиксировали керновыми отметками на поверхности одного из буртов, что устраняло влияние биения валков на точность измерений.

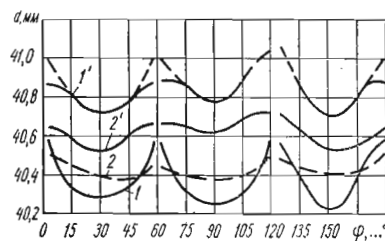


Рис. 66. График изменения диаметральных размеров по контуру калибра:

1, 2 — размеры по контуру предчистового и чистового калибров при их нарезке; 1', 2' — то же, после прокатки.

ем его у предчистового калибра. При этом, если в исходном состоянии размер предчистового калибра меньше чистового на 0,05—0,1 мм, то после прокатки партии металла он превышает его на 0,1—0,2 мм,

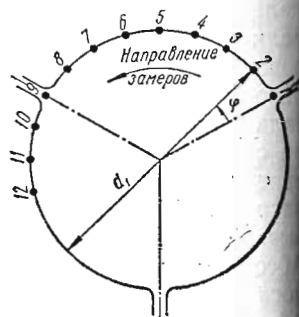


Рис. 65. Схема измерения диаметральных размеров по контуру круглого калибра.

Для точной установки в исходное состояние разметки и первоначальных замеров валика фиксировали относительно станины клетки. Экспериментальное исследование диаметральных размеров предчистового и чистового калибров блока (рис. 66) с соответствующей формой и соотношением размеров показало, что рост размеров калибра практически равномерный по контуру с опережающим значени-

Обжатие металла, поступающего в чистовой калибр трехвалковой клетки, осуществляется на участке ϕ_0 (см. рис. 21) для третьей части калибра. Остальная часть контура чистового калибра включается в работу при изменении упругой деформации предчистовой и чистовой клеток блока в результате опережающего роста размера предчистового калибра при прокатке. Это несколько снижает рост диаметральных размеров профиля на этих участках по сравнению с участками свободного формоизменения в чистовом калибре блока, приводя к выравниванию разности диаметров против расчетных в исходном состоянии. Последнее подтверждается изменением характера кривой 2 на участках 0...15 и 45—60° контура калибра (рис. 66). Разность в изменениях размеров по исследуемым точкам не превышала 0,03—0,04 мм при длительной эксплуатации калибров.

Абсолютный износ и характер изменения диаметральных размеров предчистового калибра непосредственно зависит от абсолютных размеров и разности диаметров в сечении круглого подката, поступающего в калибрующий блок. Несоответствие минимального режима обжатий при прокатке его расчетному значению приводит к тому, что на участке выпусков (кривые 1 и 1') не осуществляется достаточный контроль периметра сечения подката (величина выпуска больше d_0 подката). Последнее приводит к меньшей нагрузке этого участка контура и соответственно меньшему изменению диаметральных размеров в этом направлении. Несоответствие режима обжатий отражает и овальность подката, что приводит к опережающему росту размеров на участке 15—30° и выравниванию диаметральных размеров по расчетному контуру, абсолютная разность которых для исследованных калибров не превышала 0,1—0,12 мм после прокатки 1500 т металла. Изменение режимов обжатия металла в блоке исключает неравномерность изменения диаметров по контуру (кривая 1) предчистового калибра. Контроль в чистовом калибре получивших некоторое искажение в предчистовом калибре участков профиля позволяет получить готовую сталь высокой точности. Величина абсолютного износа калибра, в основном определяющая по величине отклонений размеров проката при горячем калибровании, обеспечивает увеличение срока службы двухвалкового чистового калибра более чем в два раза. Применение материала валков с большей износостойкостью позволит

значительно повысить точность проката и время эксплуатации калибрующего блока в период одной постановки его в линию прокатного стана.

ТОЧНОСТЬ РАЗМЕРОВ ГОРЯЧЕКАЛИБРОВАННОЙ СТАЛИ

Исследование точности размеров сечения круглой стали проводили при прокатке по обычной технологии и с применением калибрующих блоков. Анализировали комплекс параметров процесса, определяющих точность круглой стали и позволяющих более полно оценить эффективность горячего калибрования:

а) распределение абсолютных размеров и их разности двух взаимно перпендикулярных плоскостях поперечного сечения (диаметр профиля, расположенный параллельно и перпендикулярно оси вращения вала чистовой клетки стана) по длине раската;

б) характер изменения размеров сечения на концевых участках раската;

в) коэффициент загрузки поля допускаемого отклонения в зависимости от времени эксплуатации калибров;

г) абсолютные размеры и овальность в четырех характерных точках круглого сечения в зависимости от времени непрерывной эксплуатации калибра;

д) поле отклонений абсолютных размеров и овальности поперечного сечения круглой стали.

Диаметр горячекалиброванной круглой стали и диаметр вписанной окружности шестигранной стали в начале прокатки партии металла определяются размером калибров трехвалковых клеток и могут рассчитываться в зависимости от требований потребителя металла либо от других технических или экономических соображений. При исследовании процесса горячего калибрования диаметры калибров трехвалковых клеток изменяли для получения металла с различными отклонениями от номинальных размеров в пределах поля допускаемого отклонения (ГОСТ 2590—71), что позволило определить возможности процесса по обеспечению задаваемой точности размеров сечения. Экспериментальное исследование абсолютных размеров и овальности профилей по длине раската проводили при прокатке круглой стали диаметром 32—48 мм по обычной технологии и после горячего калибрования. Образцы для замеров отбирали

при установившемся температурно-скоростном режиме прокатки в начале, середине и конце прокатываемой партии металла.

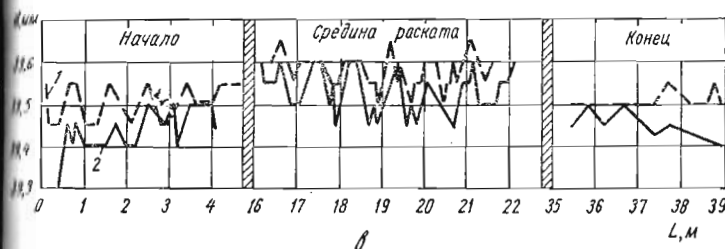
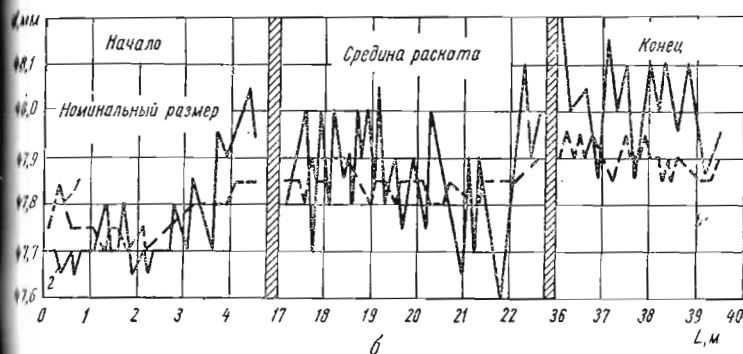
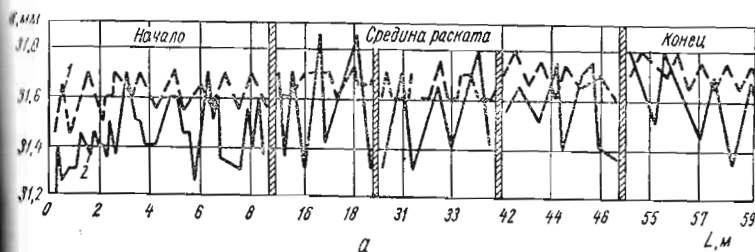


Рис. 67. Графики изменения размеров сечения по длине раската: а, б — горячекатаной стали диаметром 32 и 48 мм; в — горячекалиброванной стали диаметром 40 мм; 1, 2 — диаметральный размеры круглой стали, соответствующие дну и развѣму калибра чистовой клетки стана.

Из анализа результатов замеров (рис. 67) следует, что колебание размера обычной горячекатаной стали в вертикальной плоскости имеет циклический характер, обусловлен-

ный биением рабочих валков чистовой двухвалковой клетки, составляющим 0,1—0,15 мм. Биение рабочих валков приводит к потере 14% поля допускаемых отклонений размеров по обычной точности и 20% — высокой точности (ГОСТ 2590—71). Большие колебания размера в начале раската (рис. 67, а), достигающие 0,2 мм, можно объяснить, помимо биения валков, затухающими крутильными колебаниями в системе привода стана, которые возникают в момент захвата раската валками предчистовой и чистовой клетки стана. Абсолютное значение диаметра в вертикальной плоскости увеличивается к концу раската на 0,1—0,2 мм, что обусловлено перепадом температуры, малой жесткостью чистовой клетки, колебаниями размеров предчистового овала. Величина высоты чистового калибра при настройке клетки изменяется относительно расчетной от профиля к профилю на 0,2—0,35 мм, что не позволяет вести прокатку в узком поле допускаемых отклонений, и составляет 27% обычной и 43% высокой точности по стандартам на прокатку круглой стали диаметром 32—56 мм.

Колебания размеров поперечного сечения в горизонтальной плоскости, соответствующей разьему двухвалкового калибра, в два-три раза больше вертикального и составляют на длине одного раската 0,3—0,6 мм. Нестабильное формирование горизонтального размера сечения, даже на одном раскате, зависящее от целого ряда переменных параметров прокатки, делает его одним из основных при определении достижимого поля допускаемых отклонений сечений проката на стане. В зависимости от условий формирования горизонтального размера (режима обжатий, соотношения осей предчистового овального профиля, работы арматуры и клетки) совмещение средних абсолютных значений вертикального и горизонтального диаметра практически трудно осуществить, поэтому даже на длине одного раската (рис. 67, а и б) горизонтальный диаметр то больше, то меньше размера, соответствующего настроенной высоте калибра.

Колебание диаметральных размеров профиля по длине раската при прокатке в калибрующем блоке (рис. 67, в) позволяет оценить выравнивающую способность трехвалковых клеток при работе с подкатом круглого сечения с геометрическими соотношениями размеров, представленными на рис. 67, а и б. Колебания вертикального размера горячекалиброванной стали (ориентация положения раската

сохранена относительно двухвалкового чистового калибра) имеют также циклический характер, который можно объяснить качеством подготовки валков трехвалковой клетки, не исключающим биения валков в пределах 0,03...0,1 мм, а также сохранением наследственных колебаний размеров

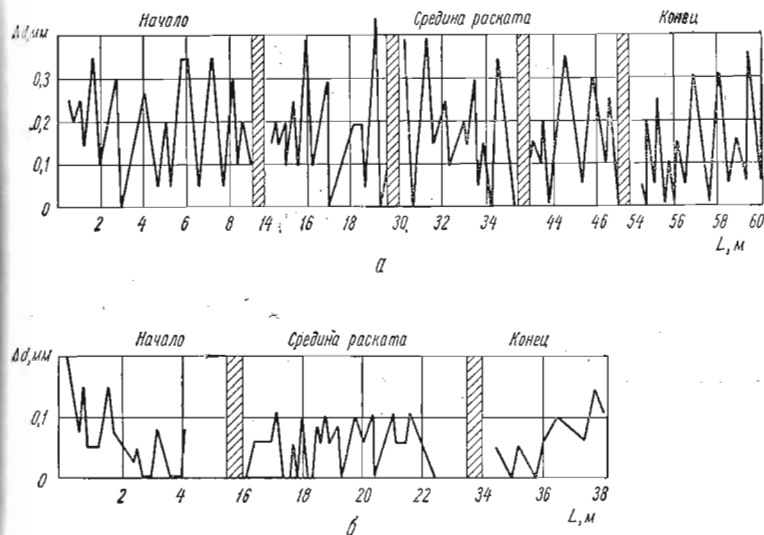


Рис. 68. Графики изменения направленной овальности профиля по длине раската:

а — горячекатаной стали диаметром 32 мм; б — горячекалиброванной стали диаметром 40 мм.

подката при существующей жесткости трехвалковых клеток. Колебание вертикального размера сечения не превышает 0,05—0,1 мм при длине раската 40—60 м с максимальным отклонением в средней или конечной части раската в зависимости от условий прокатки. Эффективность работы блока (рис. 67, в) особенно проявляется в выравнивании колебаний горизонтального размера подката, уменьшая их в три — пять раз. Это позволяет достичь совмещения средних абсолютных значений вертикального и горизонтального диаметра сечения, трудно достижимого при прокатке на двухвалковой клетки. Среднее значение колебаний горизонтального размера сечения, составляющего 0,05—0,1 мм, соизмеримо с колебаниями вертикального размера с примерно совпадающей циклическостью, которая отсутствует при двухвалковой прокатке.

Повышение точности изготовления валков, снижение их радиального биения до 0,01—0,03 мм при нарезке калибров трехвалковых клетей на специальных расточных и шлифовальных станках позволит значительно сократить потери точности в одинаковой степени для двух размеров сечения.

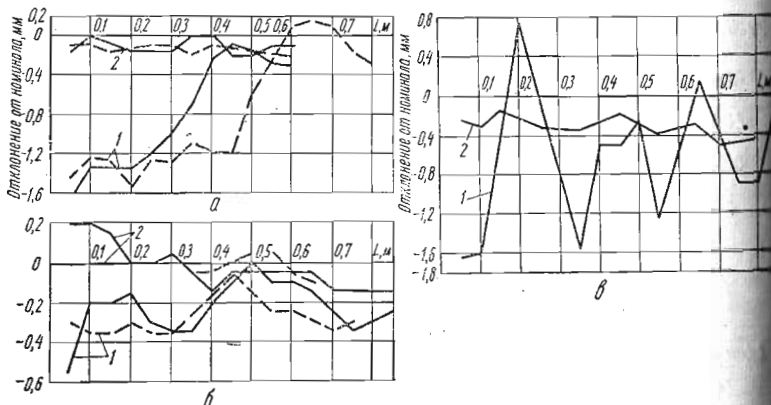


Рис. 69. Графики отклонения размеров профиля на концах раската
а, б — начало и конец раската круглой стали диаметром 35 мм (сплошная линия) и 36 мм (штриховая линия); в — начало раската профиля диаметром 56 мм; 1 — размер по разьему чистового калибра стана; 2 — размер по дну калибра.

Разность между значениями вертикального и горизонтального диаметального размера круглой стали ($\Delta d_1 = d_v - d_h$) по длине раската (рис. 68) при прокатке по обычной технологии колеблется в пределах 0,05...0,5 мм, тогда как при горячем калибровании — 0...0,1 мм, что подтверждает выравнивающую способность блока по горизонтальному диаметальному размеру.

Экспериментальное исследование размеров круглой стали в двух взаимно перпендикулярных плоскостях в начале и конце раската проводили при обычной прокатке круглой стали диаметром 32—56 мм с отбором проб через равные промежутки времени работы стана (30 мин) и с фиксированием количества прокатанного металла. Из результатов замеров (рис. 69) следует, что вертикальный размер сечения, определяемый настройкой калибра и динамическими нагрузками в момент захвата металла валками, лежит близко к номинальному значению диаметра прокатываемой стали (рис. 69, а) с постепенным уменьшением его, при затухающих колебаниях с амплитудой в пределах 0,2 мм, на участке раската длиной 0,5—0,8 м. Горизонтальный размер после захвата металла валками интенсивно нарастает на участке раската длиной 0,5—0,6 м. На участке длиной 0,35—0,4 м он выходит за максимальное отрицательное допустимое отклонение при прокатке круглой стали обычной точности, что обуславливает соответствующую обрезь переднего конца.

Колебание горизонтального размера, одной из основных причин которого являются крутильные колебания в системе привода чистовых клетей стана, особенно проявляется при прокатке круглой стали диаметром 45—56 мм, характеризующейся большими значениями динамических нагрузок (рис. 69, в). Это вызывает чередующиеся незаполнения или переполнения чистового калибра металлом, превышающие положительное допустимое отклонение с появлением «уса». Затухание колебаний горизонтального диаметра происходит на участке длиной 0,7—0,9 м. Несоответствие диаметра допустимым отклонениям на участке длиной 0,55—0,6 м в полтора раза больше, чем при прокатке круглой стали меньшего диаметра. Максимальная разница Δd_1 между вертикальным и горизонтальным диаметрами достигает 1,6 мм, что в три раза выше допустимого при прокатке по обычной точности.

Величина вертикального диаметального размера в конце раската находится выше его номинального значения на участке 0,5—0,6 м с максимальным отклонением до 0,2—0,3 мм на длине 100 мм от конца раската. Циклическое колебание отклонения размера от номинала соответствует амплитуде, равной 0,05 мм. Горизонтальный диаметр с номинальным значением на длине 100 мм от конца раската увеличивается на участке длиной 0,4—0,5 м с овальностью в два раза меньшей, чем для переднего конца, что позволяет делать технологическую обрезь 0,1—0,15 м при 0,35—0,6 м на переднем конце раската.

Расчетный диаметр круглого трехвалкового калибра, обеспечивающий прокатку стали в поле допустимых отклонений по высокой точности, режим обжатия металла в предчистовой клети блока, обусловленный в значительной степени ее прочностью, не позволяют контролировать поступающий подкат по всему периметру в начале раската на участке длиной 0,3—0,8 м. Полного контроля поверхности в начале раската можно достичь дополнительным увеличением

Точность размеров

горячекатаной стали

Диаметр круглой стали, мм	Количество прокатанного металла, т	Отклонения размеров поперечного сечения					
		1	2	3	4	5	6
56	650	-0,85 -0,15	+0,20 -0,25	-0,75 +0,15	-0,55 +0,15	-0,4 +0,05	-0,3 +0,2
53	1219	-0,3 +0,08	-0,3 -0,05	-0,5 +0,00	-1,0 -0,3	+0,08 +0,32	-0,3 -0,5
50	1230	-0,5 -0,05	-0,45 -0,05	-0,6 -0,05	-0,7 +0,2	-0,6 +0,1	-0,5 +0,15
48	600	-0,1 +0,25	-0,6 -0,05	-0,5 -0,15	-0,5 -0,05	-0,3 +0,1	-0,4 +0,05
36	1200	-0,5 +0,3	-0,25 +0,25	-0,4 -0,2	-0,4 +0,1	-0,5 +0,1	-0,25 +0,1
35	1023	-0,5 -0,1	-0,4 +0,1	-0,3 +0,1	-0,25 +0,2	-0,2 +0,2	-0,35 +0,2
34	424	-0,55 +0,15	-0,35 +0,05	-0,3 +0,2	-0,4 +0,15	-0,5 +0,05	-
32	1200	-0,35 +0,20	-0,32 +0,25	-0,3 +0,1	-0,25 +0,1	-0,25 +0,25	-0,25 +0,25

от номинального, мм, при времени работы стана, ч

7	8	9	10	11	12	13	14
-0,35 +0,15	-0,5 +0,1	-	-	-	-	-	-
-0,3 +0,04	-0,4 +0,12	-0,2 +0,16	-0,4 +0,2	-0,25 +0,25	-0,25 +0,15	-0,55 +0,1	-
-0,4 +0,4	-0,65 +0,2	-0,6 +0,25	-0,5 +0,1	-0,5 +0,25	-0,45 +0,05	-0,6 +0,1	-
-	-	-	-	-	-	-	-
-0,5 +0,1	-0,5 +0,2	-0,5 +0,2	-0,3 +0,1	-0,35 +0,15	-0,4 +0,1	-	-
-0,55 +0,15	-0,5 +0,1	-0,45 +0,00	-0,4 +0,1	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-
-0,4 +0,2	-0,4 +0,1	-0,4 -0,1	-0,35 +0,15	-0,45 +0,25	-0,50 +0,1	-0,35 +0,1	-0,30 +0,15

обжатия на 1—1,5 мм. Это приведет к возрастанию нагрузки на трехвалковую клеть, которая превысит допускаемые для применяемого типа клетей, увеличит износ подшипников и других деталей клетки, уменьшит цикл работы комплекта трехвалковых клетей в блоке ввиду интенсивного износа нерегулируемых калибров. Увеличение угла выпуска предчистового калибра для дополнительного обжатия приводит к росту угла φ_0 (см. рис. 21) пересечения контуров калибров и поверхности профиля, обжимаемого чистовым калибром, сокращая срок эксплуатации калибров и возможность получения проката высокой точности.

Обжатие металла клетями калибрующего блока позволяет сократить разность Δd_1 в начале и конце раската в пол-

тора—два раза, исключая появление размеров, превышающих номинальный для прокатываемой стали, что обеспечивает сокращение суммарной обрезки раската в два—четыре раза.

Экспериментальное исследование изменения абсолютных размеров и овальности круглой стали в зависимости от времени работы и количества прокатанного металла проводили на стане 350-1 при прокатке по обычной технологии и с применением горячего калибрования. Пробы отбирали через равные промежутки времени по три—четыре штуки со середины раската. При прокатке по обычной технологии замеры производили в четырех направлениях: вертикальном, горизонтальном и два под углом 45° к горизонтальной оси

Диаметр круглой ста- ли, мм	Количество прокатанного металла, т	Отклонение размеров поперечного сечения						
		1	2	3	4	5	6	7
45	800	-0,50 -0,35	-0,45 -0,20	-0,35 -0,20	-0,45 -0,20	-0,40 -0,20	-0,40 -0,15	-0,30 -0,10
42	1600	-0,55 -0,30	-0,40 -0,25	-0,35 -0,25	-0,40 -0,20	-0,30 -0,15	-0,25 -0,10	-0,25 -0,10
40	1200	-0,60 -0,40	-0,50 -0,35	-0,50 -0,30	-0,60 -0,30	-0,40 -0,25	-0,40 -0,20	-0,35 -0,15
38	1400	-0,50 -0,25	-0,45 -0,25	-0,45 -0,30	-0,40 -0,30	-0,40 -0,30	-0,40 -0,30	-0,40 -0,25
36	1700	-0,60 -0,55	-0,55 -0,50	-0,60 -0,55	-0,60 -0,55	-0,55 -0,50	-0,55 -0,50	-0,50 -0,35
32	1600	-0,35 -0,05	-0,35 -0,05	-0,35 +0,05	-0,40 -0,20	-0,40 -0,20	-0,40 -0,20	-0,40 -0,20

чистового двухвалкового калибра. Положение диаметральных размеров определяли вращением исследуемого образца вокруг его оси внутри фиксированного размера микрометра с кратностью 0,05 мм. Оценку результатов измерения (табл. 16) проводили по двум показателям: полю колебания абсолютных размеров сечения и овальности, а также коэффициенту загрузки допускаемого отклонения в зависимости от времени работы калибра. Последний выражается формулой

$$k = \frac{q_i}{q_{\max}},$$

где q_i — текущее отклонение от номинала; $q_{\max}$ — максимально допускаемое отклонение в положительной или отрицательной части поля допускаемых отклонений.

Изменение параметров процесса прокатки, влияющих на точность круглой стали, вызывает изменение отклонения размеров от номинала в пределах 0,35—1,0 мм (табл. 16) в течение времени работы одного чистового калибра при общем поле колебаний 0,75—1,32 мм. Нестабильность условий получения профиля приводит к частой смене положения поля

от номинального, мм, при времени работы стана, ч								
8	9	10	11	12	13	14	15	16
-0,30 -0,05	—	—	—	—	—	—	—	—
-0,20 -0,05	-0,20 -0,05	-0,25 -0,05	-0,20 -0,10	—	—	—	—	—
-0,30 -0,15	-0,30 -0,10	-0,25 -0,10	-0,25 -0,15	—	—	—	—	—
-0,40 -0,20	-0,25 -0,10	-0,25 -0,10	-0,30 -0,15	-0,25 -0,10	—	—	—	—
-0,50 -0,35	-0,50 -0,40	-0,40 -0,25	-0,40 -0,25	-0,35 -0,15	-0,30 -0,15	-0,30 -0,15	-0,30 -0,15	-0,25 -0,10
-0,30 -0,15	-0,35 -0,17	-0,40 -0,20	-0,40 -0,10	-0,35 -0,10	-0,35 -0,05	-0,25 +0,00	-0,20 +0,05	-0,20 +0,10

колебаний размеров относительно положительной и отрицательной части допускаемых отклонений, вызывая необходимость постоянного контроля геометрии профиля и промежуточных настроек чистовой линии стана. Это приводит к тому, что прокатка профиля с установленным в данный момент режимом обжатия осуществляется в течение малого промежутка времени (5—10 мин).

Поле отклонения абсолютных размеров сечения в течение 1 ч работы чистового двухвалкового калибра составляет в среднем 0,53 мм, что соответствует примерно 50% поля допускаемого отклонения. Прокатка круглой стали диаметром 32—56 мм в течение всего времени работы одного чистового калибра практически ведется с использованием большей части положительного поля. Поле отклонений размеров сечения в течение каждого часа работы при прокатке круглой стали различного диаметра находилось примерно на одном уровне и мало зависело от времени эксплуатации калибров, что достигалось промежуточными настройками чистовых клетей стана при несколько большем значении общего поля (0,85—1,32 мм) за время работы калибра для круглой стали диаметром 48—56 мм.

Процесс горячего калибрования круглой стали в блоках нерегулируемых трехвалковых клетей типа ВУ-69 позволяет получать при изменении параметров прокатки отклонение размеров сечения от нормального (табл. 17) в пределах 0,1—0,25 мм с постепенным их смещением в

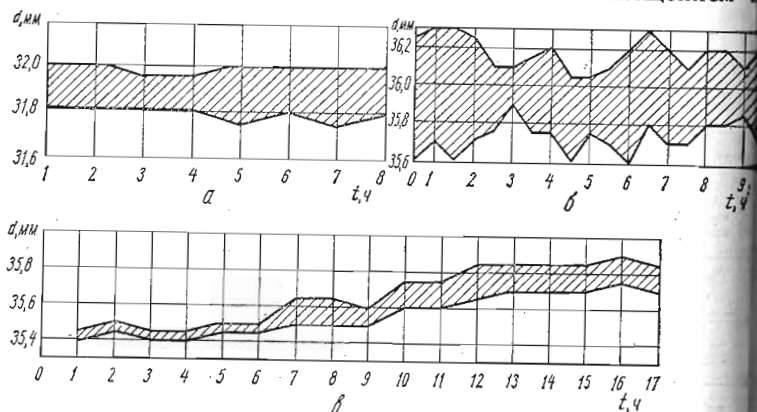


Рис. 70. Графики изменения размеров профиля в зависимости от времени работы стана:

а — при прокатке 800 т горячекалиброванной стали диаметром 32 мм; б — 900 т горячекатаной стали диаметром 36 мм; в — 1700 т горячекалиброванной стали диаметром 36 мм.

направлении увеличения диаметра прокатываемой стали ввиду износа калибров клетей блока. Такое узкое поле отклонений размеров сечения позволяет вести прокатку с гарантированными размерами в течение всего времени эксплуатации калибра чистовой клети стана и блока. Общее поле колебаний размера сечения зависит от длительности прокатки, расчетного диаметра d_1 трехвалкового калибра и составляет 0,4—0,5 мм на 15—17 ч работы со средней производительностью 94 т/ч и практически мало изменяется при прокатке круглой стали диаметром 32—56 мм. Стабильное получение размеров сечения в узком диапазоне отклонений позволяет управлять процессом горячего калибрования подготовкой трехвалковых клетей с определенным диаметром калибра и обеспечивать прокатку в поле допускаемых отклонений по требованию заказчика. Например, различное смещение исходного диаметра трехвалковых калибров в сторону уменьшения от номинального горячего размера металла позволило провести прокатку круглой

стали (рис. 70) в поле отклонения размеров $+0,0 \dots -0,25$ мм и $+0,0 \dots -0,6$ мм при соответствующем времени эксплуатации блока.

Работа калибрующего блока позволяет исключить положительную часть допускаемых отклонений в течение всего

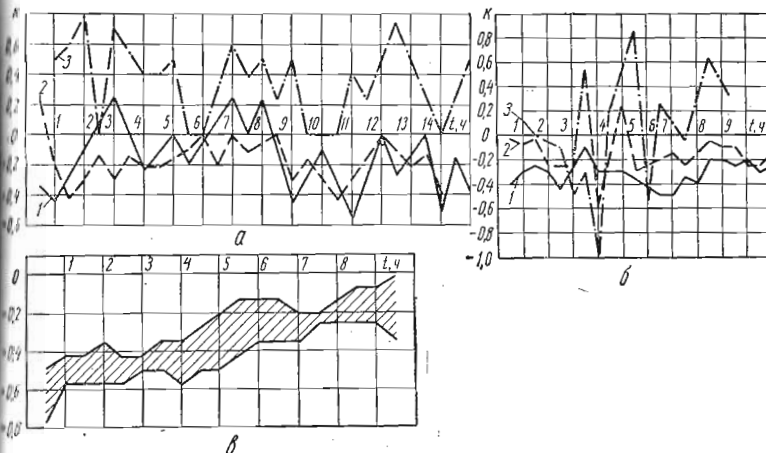


Рис. 71. Графики изменения коэффициента загрузки поля допускаемых размеров в процессе прокатки:

а, б — горячекатаной стали диаметром 32 и 53 мм; 1, 2, 3 — диаметральные размеры, соответствующие разьему, дну чистового калибра стана и под углом 45°; в — горячекалиброванной стали диаметром 42 мм (максимальный и минимальный размер в сечении).

времени прокатки партии металла. Поле отклонения абсолютных размеров сечения в течение 1 ч работы независимо от диаметра калибруемой стали в среднем составляет 0,17 мм, что в три раза меньше, чем при прокатке на обычной двухвалковой клети (рис. 70, б), где отклонение размеров в течение 1 ч достигает 0,6 мм. Практически постоянное и однозначное поле отклонения размеров горячекалиброванной стали в течение работы блока свидетельствует о том, что сокращение поля отклонения размеров в основном зависит от качества подготовки калибров трехвалковых клетей и обеспечения обжатия профиля по всему контуру предчистового трехвалкового калибра, которое во многом определяет поле отклонения размеров 0,2...0,25 мм.

Коэффициент загрузки допускаемого отклонения размеров сечения при обычной прокатке рассчитывали для четырех характерных направлений, определяющих точность прокатки круглой стали (рис. 71, а и б). На основании

Овальность горяче-

катаной стали

Диаметр круглой ста- ли, мм	Количество прокатанного металла, т	Овальность поперечного сечения				
		1	2	3	4	5
56	650	0,2—0,5	0,25—0,5	0,25—0,7	0,25—0,45	0,3—0,4
53	1219	0,35—0,5	0,2—0,65	0,25—0,5	0,65—0,8	0,4—0,7
50	1230	0,25—0,45	0,4—0,6	0,4—0,65	0,35—0,6	0,45—0,6
48	600	0,2—0,35	0,2—0,5	0,35—0,55	0,3—0,5	0,25—0,55
36	1200	0,2—0,45	0,18—0,5	0,1—0,4	0,3—0,6	0,2—0,6
35	1023	0,25—0,4	0,15—0,5	0,3—0,4	0,35—0,45	0,25—0,45
34	424	0,4—0,7	0,35—0,7	0,4—0,6	0,25—0,6	0,35—0,55
32	1200	0,37—0,67	0,3—0,5	0,25—0,6	0,15—0,46	0,25—0,57

Примечание. Овальность поперечного сечения профиля при длительности работы стана оставляет 0,3—0,7, 0,25—0,55 и 0,3—0,6 мм, при 14 ч для стали диаметром 32 мм —

экспериментальных и расчетных данных можно отметить, что при прокатке наиболее нестабильны горизонтальный диаметральный размер сечения и размер под углом 45° к горизонтальной оси двухвалкового калибра. Колебание коэффициента загрузки для вертикального диаметра в течение работы одного калибра составляет 5—60% отрицательной и положительной части допускаемого отклонения. В зависимости от настройки чистовых клетей стана происходит (рис. 71, а и б) загрузка в большей мере той или иной части поля допускаемых отклонений, при этом коэффициент загрузки по любому из диаметральных направлений не имеет какой-либо закономерности от времени и количества прокатанного металла. Большие колебания коэффициента загрузки допускаемого отклонения при прокатке затрудняют стабильное получение профилей высокой точности и требуют дополнительных затрат времени и настроек клетей для обеспечения требований к геометрии проката. Основная часть круглой стали за время работы калибра прокатывалась с 90% загрузкой отрицательной и 60—65% положительной части поля допускаемых отклонений.

профиля, мм, при времени работы стана, ч

6	7	8	9	10	11	12
0,25—0,35	0,2—0,5	0,2—0,45	—	—	—	—
0,25—0,55	0,3—0,7	0,25—0,45	0,35—0,50	0,4—0,5	0,3—0,65	0,25—0,55
0,55—0,75	0,55—1,05	0,3—0,55	0,35—0,4	0,35—0,65	0,4—0,6	0,35—0,65
0,35—0,6	—	—	—	—	—	—
0,25—0,45	0,25—0,5	0,35—0,65	0,35—0,4	0,3—0,65	0,25—0,7	0,25—0,65
0,25—0,5	0,25—0,65	0,25—0,5	0,25—0,5	0,3—0,6	—	—
—	—	—	—	—	—	—
0,15—0,42	0,25—0,45	0,3—0,7	0,2—0,5	0,3—0,6	0,3—0,5	0,25—0,55

ти рабочего стана 13 ч для круглой стали диаметром 53,50 и 32 мм соответственно 0,35—0,55 мм.

Недостатки процесса прокатки на двухвалковом стане, которые определены по коэффициенту загрузки допускаемого отклонения для различных диаметров круглой стали, устраняются при работе стана с калибрующим блоком, позволяющим благодаря его выравнивающей способности не только достичь $k = 0$ для положительной части допускаемого отклонения, но и в два-три раза сократить его колебание за время работы стана. Диаметр калибра трехвалковых клетей принимали таким, чтобы значение k соответствовало максимальному использованию отрицательной части требуемого допускаемого отклонения, а колебание его в течение 1 ч работы не превышало 10—30% (рис. 71, в); это обеспечивало стабильное получение размеров сечения при длительной эксплуатации блока. При горячем калибровании происходит равномерное уменьшение коэффициента k с увеличением времени работы трехвалковых клетей, которое отсутствует при двухвалковой прокатке.

Экспериментальное исследование овальности, как разности между максимальным и минимальным диаметральный размером в одном сечении проката, при обычной прокатке

Овальность горячека-

Диаметр круглой ста- ли, мм	Количество прокатанного металла, т	Овальность поперечного сечения профиля,						
		1	2	3	4	5	6	7
45	800	0,1— 0,2	0,1— 0,2	0,05— 0,15	0,05— 0,20	0,1— 0,25	0,1—0,2	0,05—0,2
42	1600	0,1— 0,2	0,1— 0,15	0,05— 0,1	0,1— 0,15	0,15— 0,17	0,12—0,25	0,08—0,15
40	1200	0,1— 0,2	0,1— 0,15	0,1— 0,15	0,15— 0,2	0,15— 0,25	0,1—0,2	0,05—0,2
38	1400	0,1— 0,2	0,1— 0,2	0,1— 0,2	0,1— 0,15	0,05— 0,1	0,05—0,1	0,05—0,15
36	1700	0,05— 0,1	0,1— 0,15	0,05— 0,2	0,1— 0,2	0,1— 0,2	0,05—0,15	0,1—0,2
32	1600	0,05— 0,15	0,1— 0,15	0,1— 0,2	0,05— 0,15	0,1— 0,15	0,1—0,2	0,1—0,2

и с применением процесса горячего калибрования (табл. 18 и 19, рис. 72) показало, что минимальное значение овальности профиля этих двух процессов составляет соответствен-

но 0,2—0,25 и 0,05—0,1 мм, при максимальных значениях — 0,7—0,8 и 0,2—0,25 мм. Максимальные значения овальности в течение каждого часа работы характеризуются недостаточной стабильностью при более плавном изменении

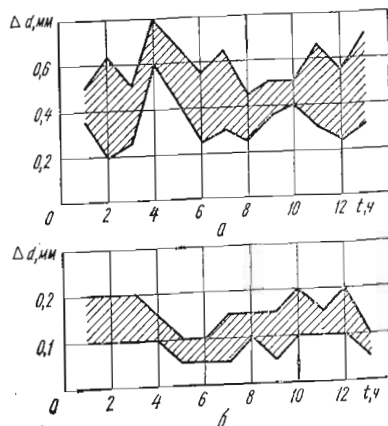


Рис. 72. Графики зависимости овальности профиля от длительности прокатки:

а — при прокатке 1200 т горячекатаной стали диаметром 53 мм; б — 1400 т горячекалиброванной стали диаметром 38 мм.

минимального значения для первого и практически с постоянным полем для второго процесса. Как в первом, так и во втором процессе (рис. 72, а и б) не обнаружено уве-

либрованной стали

мм, при времени работы стана, ч								
8	9	10	11	12	13	14	15	16
0,1—0,25	—	—	—	—	—	—	—	—
0,05—0,1	0,05—0,15	0,1— 0,2	0,1— 0,2	—	—	—	—	—
0,1—0,2	0,05—0,15	0,1— 0,15	0,5— 0,15	—	—	—	—	—
0,1—0,15	0,05—0,15	0,1— 0,2	0,1— 0,15	0,1— 0,2	0,05— 0,1	—	—	—
0,1—0,2	0,1—0,15	0,1— 0,2	0,05— 0,15	0,1— 0,2	0,1— 0,15	0,05— 0,15	0,1— 0,15	0,1— 0,2
0,05—0,15	0,1—0,15	0,1— 0,2	0,1— 0,25	0,1— 0,2	0,1— 0,2	0,05— 0,2	0,1— 0,2	0,15— 0,2

личение поля овальности в зависимости от времени эксплуатации калибра. Однако если при обычной прокатке это достигается частыми и тщательными настройками чистовой группы клетей, то при горячем калибровании — соответствующими коэффициентами жесткости калибра и его формы, а также характером износа калибров трехвалковых клетей. При прокатке круглой стали в двухвалковой чистовой клети стана за каждый час работы использовалось все допускаемое стандартами поле овальности (0,55—0,7 мм). Появление овальности 0,2—0,25 мм горячекалиброванной стали обусловлено неполным контролем периметра подката предчистовым трехвалковым калибром, а также несимметричностью нагрузки на валки клетей блока при овальности 0,7—0,8 мм калибруемой стали в условиях применяемых трехвалковых клетей. Несмотря на это, процесс горячего калибрования обеспечивает получение профилей с малым полем овальности в течение длительной эксплуатации калибра, полностью исключая брак металла по овальности.

Экспериментальное исследование поля отклонений абсолютных размеров и овальности круглой стали проводили для двух исследуемых технологий по изложенной выше

Таблица 20

Обобщение результатов исследования точности горячекатаной стали

Диаметр круглой ста- ли, мм	Количество прокатан- ного металла, т	Овальность, мм		Отклонение размеров сечения, мм		Использование допусков по ГОСТ 2590—71, % (обычная точность)	
		Пределы изменения	Средне- статисти- ческое значение	Поле отклоне- ния	Средне- статисти- ческое отклоне- ние	положи- тельной части	отрица- тельной части
56	700	0,205—0,505	0,355	—0,85 +0,255	—0,15	63,8	85,0
53	1220	0,205—0,805	0,455	—0,85 +0,305	—0,15	76,3	85,0
50	1240	0,25—0,85	0,45	—0,8 +0,405	—0,2	101,3	80,0
38	500	0,105—0,805	0,45	—0,6 +0,25	—0,15	62,5	85,7
36	828	0,105—0,605	0,355	—0,7 +0,25	—0,2	62,5	100,0
36	1120	0,105—0,705	0,355	—0,6 +0,3	—0,15	75,0	85,7
35	1030	0,155—0,605	0,355	—0,55 +0,25	—0,05	62,5	78,6
34	424	0,255—0,705	0,455	—0,55 +0,205	—0,15	51,3	78,6
32	1379	0,105—0,705	0,355	—0,55 +0,45	—0,05	112,5	78,6
32	1400	0,105—0,705	0,405	—0,6 +0,4	—0,1	100,0	85,7

методике с определением максимального и минимального диаметрального размера и абсолютных размеров в 10—12 направлениях в одном сечении. При обработке результатов измерения использовали методику построения эмпирической кривой распределения абсолютных размеров и овальности. Выравнивание эмпирического распределения размеров профиля производили по нормальному закону Гаусса, имеющему площадь вероятности

$$\varphi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}},$$

где a — математическое ожидание; σ^2 — дисперсия. Определяли значение a , σ и вероятность каждого интервала:

$$P_x = \frac{h}{\sigma} \varphi(t),$$

где $h = 0,05$ мм — ширина выбранного интервала; $\varphi(t) =$

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}} \text{ — плотность веро-}$$

ятности нормального распределения.

При

$$t = \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma}$$

произведение $\varphi(t)$ на Σm_i данного интервала дает значение теоретической частоты $P_x \Sigma m_i$.

Результаты исследования поля отклонений абсолютных

размеров (табл. 20, рис. 73, а, б) показывают, что прокатка круглой стали диаметром 32—56 мм ведется в отрицательной части поля допускаемых отклонений с загрузкой его на 79—85% независимо от диаметра прокатываемого профиля. Круглую сталь диаметром 48—56 мм прокатывают в поле допускаемых отклонений 1,1—1,2 мм, а диаметром 32—48 мм — в поле допускаемых отклонений 0,85—1,0 мм. Симметричное расположение кривой (рис. 73) относительно центра эмпирического распределения и ее пологость, когда отклонения в процентах каждого интервала отклонений невелики,

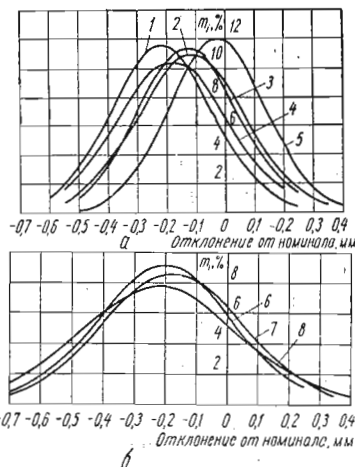


Рис. 73. Кривые эмпирического распределения отклонений размеров сечения профиля в партии горячекатаной круглой стали диаметром:

1 — 38 мм (1770 т); 2 — 36 мм (1120 т); 3 — 35 мм (1023 т); 4 — 34 мм (424 т); 5 — 32 мм (1380 т); 6 — 26 мм (650 т); 7 — 20 мм (1220 т); 8 — 20 мм (1230 т).

свидетельствуют о нестабильности процесса и малой разности в вероятности появления того или иного отклонения от номинала, а также о равной вероятности появления отклонений в обе стороны от настроечной высоты калибра, которая в основном определяет положение центра распределения относительно номинального диаметра прокатываемой стали. Использование положительной части поля допускаемых отклонений составляет 63—100%, а общего поля при условии, что за 100% принята каждая его часть, — 150—180%. Поле отклонений абсолютных размеров при горячем калибровании круглой стали более чем в два раза меньше (+0,0...—0,5 мм) и обеспечивает в этом поле прокатку свыше 1500 т крупносортовой стали. При этом используется только 70—75% отрицательного поля допускаемых отклонений обычной точности (ГОСТ 2590—71).

Абсолютные значения теоретической частоты эмпирического центра распределения (25—45%), а также небольшая зона рассеивания абсолютных размеров сечения (рис. 74, а) свидетельствуют о прокатке в узком поле отклонений со смещением центра распределения в отрицательной части поля допуска, уменьшающей загрузку поля до 43%. Сокращение времени эксплуатации блока сближает ветви кривой распределения за счет уменьшения влияния износа на поле отклонения размеров и позволяет обеспечить прокатку круглой стали с минимальным полем 0,2—0,25 мм при работе в течение 6—8 ч, что соответствует 700—800 т прокатанного металла. Дальнейшее сокращение времени работы уже не приводит к существенному изменению поля допускаемых отклонений, так как в этом случае оно будет определяться такими параметрами, как качество подготовки валков, несимметричностью нагружения трехвалковой клетки ввиду значительной овальности подката, полной контрольной геометрии профиля в предчистовой клетке блока, а также перепадом температуры при прокатке и величиной максимального обжатия (рис. 74, б).

Отсутствие гарантированного полного контроля периметра сечения профиля, поступающего в блок, обуславливает появление около 10—15% случаев на готовом прокате (рис. 75), когда размер меньше расчетного по диаметру предчистового трехвалкового калибра, что приводит к увеличению поля отклонений, не поддающегося исправлению непосредственно в блоке. Увеличение минимального обжатия $\Delta h_{\min}$ в клетях блока на 0,2—0,25 мм в несколько раз

(кривая 1) уменьшает вероятность появления таких размеров. Отсутствие полного контроля подката блоком сказывается и на овальности горячекалиброванной стали. При работе с двухвалковым калибром чистовой клетки стана без изменения его размеров, применяемых при обычной прокатке, с учетом необходимого $\Delta h_{\min}$ для горячего калибрования, а также при значении расчетного диаметра трех-

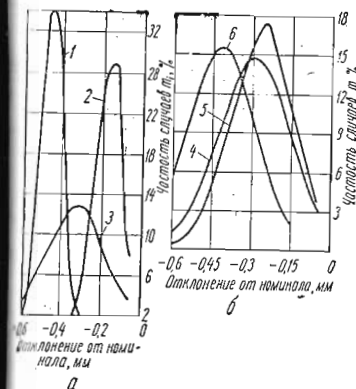


Рис. 74. Кривые эмпирического распределения отклонений размеров сечения профиля в партии горячекалиброванной круглой стали диаметром:

1 — 36 мм (1000 т); 2 — 36 мм (последующие 1000 т); 3 — 36 мм (1000 т); 4 — 45 мм; 5 — 42 мм; 6 — 40 мм.

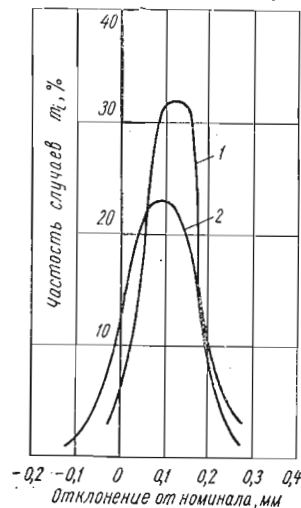


Рис. 75. Кривые эмпирического распределения отклонений размеров сечения горячекалиброванной круглой стали диаметром 38 мм относительно исходного диаметра калибра трехвалковой клетки после прокатки:
1 — 800 т металла; 2 — 1200 т металла.

валкового калибра, близкого к номинальному диаметру сечения, абсолютные значения и поле отклонений овальности (рис. 76, в) на готовом металле практически совпадают с обычной прокаткой (кривые 2,3). Изменение режима обжатия металла в предчистовой клетке блока с учетом фактической разнотолщинности подката (кривая 1) в три-четыре раза уменьшает поле отклонений овальности, качественно изменяя характер кривой распределения овальности сечения с большим значением (50%) теоретической частоты эмпирического центра распределения.

Экспериментальное исследование овальности (табл. 21) показало, что при обычной прокатке на стане 350-1 допустимых отклонений овальности используется почти на 100% (рис. 76), а характер кривой распределения таков,

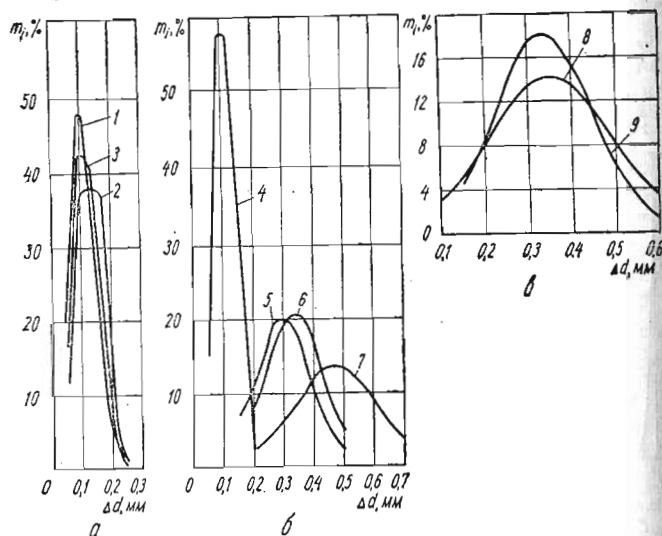


Рис. 76. Кривые эмпирического распределения овальности сечения в партии круглой стали:

1 — горячекалиброванной диаметром 38 мм (1000 т); 2 — то же, 38 мм (1200 т); 3 — 38 мм (2200 т); 4 — 36 мм; 5 — 42 мм; 6 — горячекатаной диаметром 56 мм; 7 — то же, 53 мм; 8 — 32 мм; 9 — 35 мм.

что разница между теоретическими частотами центра распределения и крайних точек поля рассеивания не превышает 8—10%. Это говорит о почти равной вероятности появления любого отклонения в каждый момент прокатки. Поле отклонений овальности практически не зависит от диаметра прокатываемой стали, а определяется тщательностью настройки стана. Центры эмпирического распределения овальности при обычной прокатке находятся в пределах 0,35...0,45 мм.

Горячим калиброванием достигается поле отклонений овальности в пределах 0,05...0,25 мм при длительной эксплуатации калибров и с центром распределения 0,105—0,155 мм. Разница между максимальной и минимальной частотами (рис. 76) составляет 40% и более, что позволяет

получать свыше 40—50% профилей с овальностью 0,105—0,155 мм, т. е. в три раза меньшей, чем при двухвалковой прокатке, и не превышает требований по овальности на калиброванную сталь исследованного сортамента.

Таблица 21

Обобщенные результаты исследования точности горячекалиброванной стали

Диаметр круглой стали, мм	Количество прокатанного металла, т	Овальность, мм		Отклонение размеров сечения, мм		Использование отрицательной части допускаемого отклонения по ГОСТ 2590—71 (обычной точности), %
		Пределы изменения	Среднестатистическое значение	Поле отклонения	Среднестатистическое значение	
52	800	0,05—0,250	0,170	—0,55 +0,00	—0,35	55,0
45	800	0,105—0,255	0,205	—0,45 —0,05	—0,35	64,3
42	1430	0,05—0,255	0,155	—0,55 —0,05	—0,30	78,6
38	2000	0,05—0,205	0,105	—0,60 —0,10	—0,35	85,7
38	800	0,05—0,255	0,105	—0,60 —0,25	—0,45	85,7
36	1000	0,05—0,205	0,155	—0,35 —0,05	—0,15	50,0
36	700	0,05—0,205	0,105	—0,30 —0,05	—0,20	42,9

Анализ комплексного исследования точности показывает, что процесс горячего калибрования обладает высокой эффективностью в повышении точности прокатки сортовой стали по всем исследуемым параметрам и делает возможным производство горячекалиброванной стали различных классов точности. Дальнейшее совершенствование конструкции

трехвалковых клетей, повышение их жесткости и нагрузочных параметров, совершенствование техники подготовки калибров блока к работе позволит значительно повысить точность размеров сечения горячекалиброванной стали.

Современные требования к точности размеров сортовой стали при одновременном увеличении производительности труда обуславливают необходимость непрерывного контроля формы и размеров металла в процессе производства. Своевременное обнаружение нарушения технологического процесса позволит избежать больших потерь металла, которые возможны при периодическом контроле. Поэтому наряду с улучшением оборудования и совершенствованием технологии требуется создание надежно действующих приборов для контроля и управления технологией прокатки. Такие приборы существуют для контроля ширины и толщины при прокатке листов, а также некоторых простых сортовых профилей. Создание надежно действующих приборов для сортовых станов осложняется многообразием формы профилей и необходимостью одновременного контроля нескольких параметров в одном сечении. Например, при прокатке круглой стали необходимо контролировать диаметры в горизонтальном и вертикальном направлениях и два размера, направленных под углом 45° к горизонтальной оси валков, что позволяет выяснить причины нарушения технологического процесса и внести правильную корректировку в настройку клетей.

Эффективность работы калибрующего блока в технологических линиях сортовых станов с непрерывным и последовательным процессом прокатки зависит от режима обжатий. В этом случае даже выборочный контроль подката после чистовой клетки стана крайне затруднен и поэтому необходим непрерывный контроль размеров сечения в промежулке между чистовой клетью стана и первой клетью калибрующего блока с помощью специализированных систем и приборов. Общие требования к измерительным приборам можно сформулировать следующим образом:

- 1) точность измерения должна быть в пределах $0,1\%$ номинального диаметра проката;
- 2) метод измерения должен обеспечивать работу прибора в непосредственной близости к горячему раскату с температурой до 1200°C ;
- 3) измерения должны производиться при высоких скоростях прокатки;

4) состав и температура прокатываемого материала не должны влиять на результат измерения;

5) должна обеспечиваться малая инерционность работы прибора;

6) прибор должен быть безотказным в среде, где имеет место пар, вода, окалина;

7) у рабочей клетки должна находиться только измерительная головка прибора, которая не должна быть помехой работе валков и направляющих механизмов клетки;

8) калибровка прибора должна быть несложной;

9) считывание измеряемого параметра должно быть цифровое или с записью на ленту.

Работы по созданию приборов для измерения размеров проката проводят в СССР, США, Японии, Франции, ФРГ, ЧССР и т. д. [30, 78, 79, 82]. Принципиально методы измерения размеров сечения проката разделяются на контактные и бесконтактные. Измерение контактным методом связано с большими трудностями, недостаточно надежно и точно при высоких скоростях прокатки, когда после выхода проката из клетки возникают его поперечные колебания. При измерении размеров проката бесконтактным методом используют различные принципы: оптический, телевизионный, с применением ядерного излучения, с помощью лазерного луча или ультразвуковых волн и т. д.

Весьма эффективно применение в условиях производства горячекалиброванного проката средств контроля и измерения длины раската. Это позволяет вести оптимальный раскрой проката при его порезке, автоматизировать процесс прокатки и, что самое главное, экономить большое количество металла за счет отгрузки его потребителю в единицах длины, а не массы, в условиях стабильной прокатки в узком поле отрицательных допусков. Принципиально методы, применяемые для измерения длины раската, аналогичны методам измерения размеров сечения проката и их комбинациям. Длину раската измеряют как непосредственно за чистовой клетью стана, так и в линии отделки металла после его остывания, например, на выходной стороне роликовой правильной машины. Фирмой «Ниппон Кокан» (Япония) на универсальном балочном стане [81] был применен измеритель длины горячего проката с помощью фотореле, импульсного генератора и мсдоз, установленных под нажимными винтами чистовой клетки, и измеритель длины холодного раската за роликовой правильной машиной.

Точность работы второго измерителя была значительно выше и составляла ± 20 мм, причем около 45% замеров выполнялись с точностью ± 5 мм. Ошибки при измерении длины горячего проката доходили до 300 мм.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КАЛИБРУЮЩЕГО БЛОКА В ПОТОКЕ ПРОКАТКИ

Эффективность горячего калибрования в блоках трехвалковых клетей, прежде всего, заключается в повышении точности и стабилизации размеров поперечного сечения профилей в прокатываемой партии. Это позволяет в зависимости от конкретных задач изменять исходные размеры калибров трехвалковых клетей для получения проката с различной точностью в пределах поля допускаемых отклонений без изменения калибровки чистовых клетей двухвалкового стана. Например, при прокатке круглой стали диаметром 32 мм можно получить отклонение размеров сечения $+0... -0,2$ мм, $+0... -0,3$ мм, $+0... -0,4$ мм и т. д. Объем прокатанного металла в этих случаях определяется износом трехвалковых калибров. Опыт эксплуатации калибрующих блоков в условиях прокатных станов 350-1 и 320 показал способность станов гибко реагировать на изменение абсолютного размера профиля и допускаемых отклонений в зависимости от требований к калибуемому металлу. Эксплуатация калибрующего блока в условиях стана 350-1 ведется в двух режимах работы: обеспечение высокой точности круглой стали (ГОСТ 2590—71); производство горячекалиброванной круглой стали по различным классам точности, приближенным к холоднотянутой. Работа стана при обоих режимах сопровождается увеличением его производительности благодаря скоростному режиму горячего калибрования, обжатию металла в клетях блока, позволяющему увеличить диаметр круглой стали, выходящей из чистовой клетки стана. Увеличение производительности стана в этом случае определяется по формуле

$$\Delta P = (d_2^2 - d_1^2) \frac{\pi}{4} v_1 q \cdot 3600,$$

где d_2 и d_1 — диаметры круглой стали после чистовой клетки стана при прокатке с применением калибрующего блока и по обычной технологии; v_1 — скорость прокатки в чистовой клетки стана; q — плотность стали.

На основании экспериментальных исследований точности прокатки круглой стали (см. табл. 16) диаметром 32—56 мм установлено, что центр эмпирического распределения отклонения размеров сечения при прокатке по обычной технологии находится в пределах $+0,0... (0,1-0,2)$ мм. При прокатке круглой стали с применением калибрующего блока среднее значение диаметра после чистовой клетки увеличено на 0,40—0,45 мм. Тогда увеличение производительности при расчете по средним значениям диаметра составит 1,1—3,8%.

При прокатке круглой стали одного размера по обычной технологии затраты времени на смену изношенных калибров от полной остановки до максимальной загрузки стана по производительности (по данным хронометража в условиях среднесортных станов с линейным расположением клетей) составляет 15—20 мин. При этом на перестановку валковой арматуры, направляющих и кантующих устройств затрачивается 5—10 мин, на достижение необходимого режима обжатия в чистовой линии стана — 5—10 мин. При работе стана с калибрующим блоком затраты времени на стабилизацию размеров готового проката сокращаются в два раза, а при хорошо отработанной технологии и высокой квалификации вальцовщиков допускается максимальная загрузка стана сразу же после установки блока, что особенно важно при частой смене размера прокатываемой стали. Изменение марочного состава прокатываемых сталей в пределах одного типоразмера профилей практически незначительно отражается на точности горячекалиброванной стали и не требует дополнительной подстройки чистовых клетей стана. Основная доводка размеров сечения осуществляется в предварительно настроенных клетях калибрующего блока, поэтому работа обслуживающего персонала на чистовых клетях двухвалкового стана облегчается за счет сокращения числа промежуточных подстроек и контроля размеров, уменьшая субъективный фактор в достижении качества проката.

Установка калибрующего блока в условиях стана 350-1 непосредственно у холодильника позволила улучшить работу последнего за счет повышения прямолинейности проката и особенно некоторой доработки переднего конца, лучшего выброса полосы на холодильник и сокращения брака по кривизне от застревания переднего изогнутого конца в сбрасывающих клапанах рольганга холодильника, кроме

того, облегчила захват раската роликами правильной машины.

Незначительные обжатия в пределах 0,15 ... 1,5 мм, характер и абсолютный износ валков, коэффициенты жесткости трехвалковых калибров позволяют длительно эксплуатировать калибрующий блок и увеличивать срок службы двухвалкового чистового калибра в 2—2,5 раза. При прокатке круглой стали по обычной технологии с полем допускаемых отклонений $+0,4 \dots -0,7$ мм срок службы чистового круглого калибра соответствует прокатке 1100—1300 т металла. Дальнейшая эксплуатация калибра не обеспечивает гарантированного размера сечения.

Работа стана с калибрующим блоком обеспечивает гарантированное поле допускаемых отклонений при прокатке 2200—3000 т металла. Это позволяет исключить потери производства металла при смене калибра (20—30 т проката), увеличить срок службы одного комплекта валков чистовых клетей стана, разместить на бочке вала большее число калибров различных размеров и сократить число перевалок чистовой линии стана в два раза. Калибрующий блок способствует стабилизации размеров круглой стали на концах раската, устраняя гармонические их изменения, обусловленные крутильными колебаниями в системе привода стана в момент захвата металла, а также от перепада температур по длине раската. Это позволяет сократить концевую обрезь в два — четыре раза в зависимости от размера прокатываемого профиля для применяемых конструкций трехвалковых клетей и свести обрезь к минимуму при установке клетей с повышенными допускаемыми нагрузками. Стабилизация размеров профиля за счет вытяжки ($\mu = 1,01 \dots 1,04$) в калибрующем блоке удлиняет раскат (для условий стана 350-1 на 0,5—1,5 м), что эффективно отражается на экономии металла, когда количество изготавливаемых деталей находится в прямой зависимости от длины раската.

Малопроизводительные и трудоемкие операции на участке отделки и сортировки проката часто сдерживают своевременную отгрузку металла заказчикам и вызывают необходимость иметь большие площади для складирования. Калибрующие блоки позволяют стабилизировать размер проката и в ряде случаев отгружать металл без сортировки, т. е. непосредственно с потока.

Таким образом, помимо экономической эффективности повышения точности сортового проката, установка калиб-

рующих блоков имеет ряд технологических преимуществ, которые обеспечивают еще более высокую эффективность процесса и целесообразность внедрения его в широких масштабах на сортовых прокатных станах.

Глава V.

ОБРАБОТКА ПОВЕРХНОСТИ И ПРИМЕНЕНИЕ ГОРЯЧЕКАЛИБРОВАННОЙ СТАЛИ

В зависимости от назначения калиброванная сталь, полученная холодным волочением, по качеству поверхности подразделяется на три группы в соответствии с ГОСТ 1051—59. Поверхность стали должна быть чистая, гладкая или матовая, без трещин, плен, неметаллических включений, волосовин, закатов и окалины. На поверхности термически обработанных прутков допускается оксидная пленка. Допускаемые дефекты поверхности определяются характером дальнейшей переработки и использования стали. Для стали особо ответственного назначения группы А дефекты не допускаются вообще. Для групп Б и В калиброванной стали, которая перерабатывается на станках-автоматах, шлифовальных и других установках, а также используется без переработки для менее ответственного назначения, допускаются отдельные мелкие риски, раковины, черновины, вмятины, рябизна, пологие зачистки и отдельные мелкие волосовины.

Во многих случаях качество поверхности горячекалиброванной стали могло бы удовлетворять требованиям ГОСТ 1051—59 (стали групп Б и В) с учетом допускаемых дефектов, однако основным препятствием этому является окалина — естественный результат процесса горячей прокатки. Окалина, как более твердый и хрупкий материал, чем основной металл, обуславливает ряд отрицательных эффектов при дальнейшем использовании стали. При обработке круглой стали на станках-автоматах окалина, разрушаясь, попадает в цапфы механизма зажима, забивает зазоры, нарушает работу механизма и станка в целом, приводит к его быстрому износу. Очевидно, что для получения горячекалиброванной стали, удовлетворяющей требованиям стандарта по качеству поверхности, необходимым условием

является удаление окалины с поверхности проката. По величине вмятин, рисок, мелких волосовин горячекалиброванный прокат при современной технологии производства удовлетворяет соответствующим требованиям для стали групп Б и В. Требования по величине обезуглероженного слоя и твердости горячекалиброванной стали не рассматриваются в настоящей работе, так как по сравнению с обычной прокаткой горячее калибрование существенно не влияет на эти параметры.

СПОСОБЫ УДАЛЕНИЯ ОКАЛИНЫ

Для улучшения качества поверхности проката, в том числе для удаления окалины, применяют следующие основные способы: обточку (обдирку), шлифование (полирование), травление, знакопеременный изгиб, галтовку, дробеметную и дробеструйную обработку. Обточку и шлифование применяют при производстве калиброванной стали группы А классов точности 2а, 3 и 3а. При этом преследуют цель не столько удаления окалины, сколько удаления поверхностных слоев металла со всевозможными дефектами: обезуглероженным слоем, трещинами, раковинами, волосовинами и т. п. Для различных диаметров и марок круглой стали толщина снимаемого слоя металла находится в пределах 0,5...2,5 мм. Эти способы отличаются возможностью получения высокого качества поверхности проката. Однако они обладают и существенными недостатками: низкой производительностью, большим расходом рабочего инструмента и высоким расходом металла. Травление применяют в основном для удаления окалины с поверхности проката перед последующим технологическим переделом — волочением или холодной прокаткой. При травлении удаление окалины происходит достаточно полно по всей поверхности проката, но этот процесс отличается трудоемкостью и дополнительным расходом металла, связан с вредными условиями труда для обслуживающего персонала, с дополнительными затратами на удаление и переработку отработанных травильных растворов и шлама.

Большинство указанных способов обработки поверхности проката осуществляются на отдельных участках, в стороне от прокатного стана и по условиям технологии не могут быть применены в непрерывном технологическом потоке на прокатном стане. Удаление окалины с поверхности

проката путем знакопеременного изгиба применяется в непрерывных технологических линиях при производстве полосового проката и катанки [1, 10]. Прокат проходит через ряд роликов, наружные слои металла поочередно растягиваются и сжимаются, а окалина, как менее пластичный материал, трескается, взламывается и осыпается, остатки ее удаляются с поверхности вращающимися металлическими щетками. В данном случае отсутствует дополнительный расход металла, процесс может быть высокопроизводительным (скорость движения металла достигает 4 м/с), однако он имеет недостатки: возможно неполное удаление окалины с поверхности металла, знакопеременный изгиб приводит к появлению (раскрытию) трещин на самом металле и внутренних остаточных напряжений, применяется для круглой стали небольшого диаметра (5—20 мм). При больших диаметрах профиля роликовая установка становится чрезмерно громоздкой, а качество удаления окалины ухудшается.

Галтовка применяется для удаления окалины и пригара, осуществляется путем перемешивания деталей и абразивных материалов в специальных барабанах периодического действия, характеризуется низкой производительностью и используется при небольших объемах обрабатываемой продукции. В настоящее время этот способ находит применение в качестве вспомогательного (после дробеметной обработки проката) для придания определенных свойств поверхности проката перед волочением [10].

Дробеметная обработка [1, 2] предназначена для удаления окалины, остатков песка, керамики и пригаров на отливках металлических деталей. Рабочий материал (дробь, проволоочная сечка) с большой скоростью направляется турбинным колесом на обрабатываемую поверхность, ударяет, взламывает неметаллические материалы на металле и удаляет их. В настоящее время способ дробеметной обработки находит все более широкое применение при удалении окалины с поверхности проката перед волочением. Наибольшее распространение получили дробеметные установки фирмы «Уилбрейтор» (США) и фирмы «Гуттман» (ФРГ), обеспечивающие полное удаление окалины, достаточное качество поверхности и производительность до 5 т/ч. Недостатком дробеметных установок является малая стойкость лопаток дробеметных турбин и сложность их конструкции.

Вместе с дробеметной получает распространение и дробеструйная обработка проката. При этом способе в качестве рабочего материала используется металлический песок и различные виды абразивов. Рабочий материал получает энергию для удара по поверхности обрабатываемой детали за счет движения в струе сжатого воздуха или воды. Такие установки получили широкое распространение для удаления окалины с катанки и мелкого сорта после прокатки и термообработки перед волочением. Производительность установок равна 1—6 т/ч. Результаты промышленной эксплуатации показали, что дробеструйные установки непрерывного действия обеспечивают требуемое качество поверхности деталей при достаточно высокой производительности. Как и при дробеметном способе, дробеструйная обработка не влечет дополнительного расхода металла, может применяться для различных марок стали и видов продукции, в том числе проката, и характеризуется малым расходом рабочего материала — дробы, что важно при больших объемах производства.

Сравнивая преимущества и недостатки перечисленных способов удаления окалины с поверхности проката, можно заметить целесообразность использования для этой цели ряда механических способов, таких как знакопеременный изгиб, дробеструйная и дробеметная обработка. Эта целесообразность подтверждается следующими основными показателями: технологичностью процесса (возможность использования в непрерывных технологических линиях для обработки различных видов проката) при больших объемах производства и, как следствие, высокой производительностью; низким расходом металла в процессе удаления окалины; малым расходом рабочего материала и высокой экономичностью процесса.

Выбор способа удаления окалины необходимо осуществлять с учетом условий производства в каждом конкретном случае, в зависимости от сортамента проката и марок стали, наличия производственной площади и энергетических ресурсов, необходимой производительности. Для окончательного выбора способа очистки поверхности проката от окалины необходимо сопоставить различные способы по такому важному показателю, как качество обработанной поверхности готового проката.

Рассмотрим качество поверхности проката, обусловленное не технологией прокатки, а способами очистки поверхности от окалины. Основным критерием при оценке качества поверхности металла является ее микрорельеф, который характеризуется шероховатостью поверхности. Последняя определяется средним арифметическим отклонением R_a от средней линии профиля и высотой неровностей R_z . Для определения этих величин при исследованиях пользовались профилографом модели 201 завода «Калибр».

В исследованиях были использованы образцы горячекалиброванной круглой стали диаметром 10 и 38 мм из стали марок Ст3, Ст5, 20, 45, после горячего калибрования при температурах 800 и 1040—1070° С. Очистку образцов от окалины производили на следующих установках:

1. Дробеструйная камера периодического действия марки 361-М с поворотным столом, оборудованная одним соплом, работающим при давлении воздуха 700 кПа. Расстояние от сопла до обрабатываемого изделия равно 1900 мм, время обработки образца — 7 мин. Рабочий материал — дробь фракции 5 мм.

2. Ленточный дробеметный барабан марки 323 с рабочим материалом — дробью фракции 2,5 мм. Мощность двигателя дробеметного аппарата равна 21 кВт, расстояние от дробемета до обрабатываемого изделия — 900 мм, время обработки образца — 15 мин.

3. Очистной галтовочный барабан модели ОБ-800 с рабочим материалом — отходами абразивного инструмента. Время обработки образца составляло 40 мин.

4. Дробеструйная камера непрерывного действия с кольцевым конвейером и рабочим материалом — металлическим песком фракции 1,0 мм. Камера оборудована 20 соплами, работающими при давлении воздуха 700 кПа. Расстояние от сопла до обрабатываемого изделия равно 250 мм, время обработки образца — 10 мин.

5. Пескоструйная камера периодического действия с рабочим материалом — металлическим песком фракции 0,3—0,5 мм в смеси с окалиной (70%). Камера оборудована одним соплом, работающим при давлении воздуха 700 кПа. Расстояние от сопла до обрабатываемого изделия равно 150 мм, время обработки образца — 0,5 мин.

6. Дробеметная камера непрерывного действия с рабочим материалом — стальной сечкой $0,8 \times 1,5$ мм.

Результаты анализа качества поверхности образцов после удаления окалины показали (табл. 22, рис. 77), что

Таблица 22

Чистота поверхности горячекалиброванной круглой стали после удаления окалины различными способами

Номер образца (рис. 77)	Вид обработки поверхности	Время обработки, мин	R_a , мкм	Класс чистоты поверхности (ГОСТ 2789-59)
1	Дробью фракции 5 мм	7	8	—
2	» » 2,5 мм	1,5	8	—
3	» » 2,5 мм, затем металлическим песком фракции 1,0 мм	2,5	8	—
4	Сечкой фракции $0,8 \times 1,5$ мм	0,5	8	3
5	Дробью фракции 2,5 мм, затем галтовка	5,5	7,8	4
6	Металлическим песком фракции 1,0 мм	1,0	7,16	4
7	» » 0,8 мм	1,0	7,10	4
8	Дробью фракции 2,5 мм, затем металлическим песком фракции 0,5 мм	1,5	7,0	4
9	Металлическим песком фракции 0,5 мм	0,5	5,6	4
10	Галтовкой	4,0	5,5	4
11	Металлическим песком фракции 1,0 мм, затем галтовка	5,0	5,4	5
12	Сечкой фракции $0,8 \times 1,5$ мм, затем волочение	1	3,33	5
13	Шлифованием	2	3,35	5
14	»	3	1,62	6
15	Травлением 20% H_2SO_4	8	6,0	4
16	» 20% H_2SO_4			
17	с добавкой 2,5 г/л ингибитора И-1-В	12	6,8	4
18	Травлением 10% HCl	8	5,5	4
	» катодно 10% H_2SO_4	15	5,0	5

различные виды обработки дают неодинаковую величину шероховатости и степень очистки поверхности. Однако в большинстве случаев качество поверхности соответствует 4—5-му классу и требованиям, предъявляемым к калиброванной стали групп Б и В. Не удовлетворяет этим требованиям поверхность, обработанная дробью крупной фракции: чем крупнее фракция дробы, тем грубее поверхность, покрытая отдельными глубокими вмятинами. При обработке крупной

дробью и галтовке не вся окалина удаляется с образца, часть ее вминается, заглаживается в верхний слой металла, а на поверхности остаются черновины. Визуальное наблюдение показало, что наилучшее качество поверхности по-

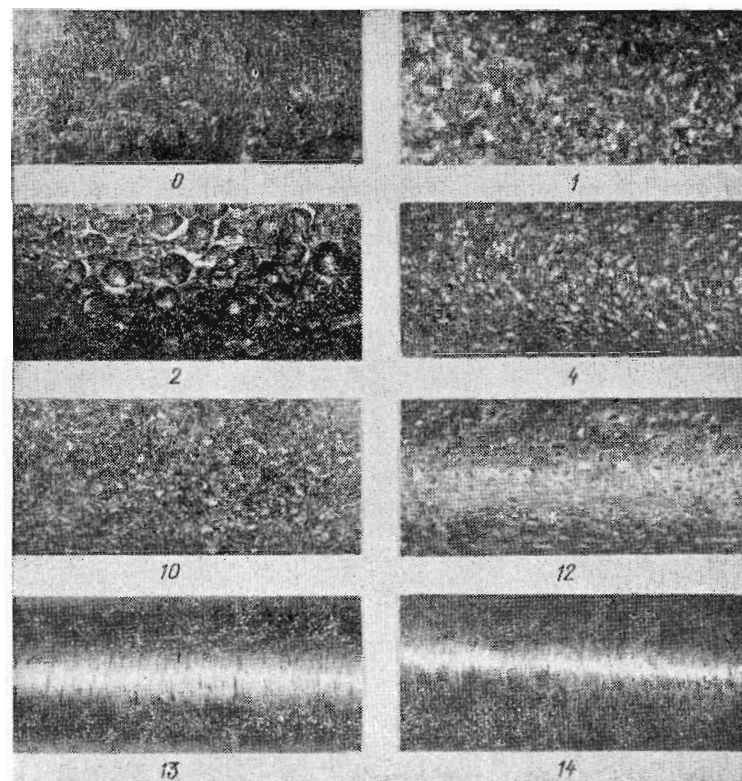


Рис. 77. Поверхность горячекалиброванной и горячекатаной круглой стали после различных видов обработки (четырекратное увеличение; номера образцов соответствуют номерам табл. 22; 0 — поверхность горячекалиброванной стали с окалиной).

лучается после шлифования по 6-му классу (блестящая гладкая поверхность). Поверхность травленных образцов похожа на поверхность образцов, обработанных песком фракции 0,5 мм, но более темная. После травления на поверхности металла хорошо видны дефекты горячей прокатки, в то время как поверхность, обработанная мелким песком,

имеет равномерную шероховатость с постоянным R_a . В процессе дробеструйной обработки острые края вмятин и риски притупляются, контуры их размываются, хотя крупные вмятины и риски остаются.

В процессе исследования качества поверхности проводили измерение твердости поверхностного слоя металла, обработанного травлением, шлифованием и дробеструйным способами, которое показало, что твердость поверхностного слоя металла после обработки практически не изменяется (в пределах точности измерений).

Шлифование, травление, дробеструйная обработка и галтовка практически обеспечивают требуемое для калиброванной стали групп Б и В качество поверхности. Однако с учетом преимуществ дробеструйной обработки целесообразно применение этого способа для очистки поверхности горячекалиброванного проката от окалины. Для поточной очистки проката на станах необходима разработка специальных конструкций таких агрегатов.

ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ ГОРЯЧЕКАЛИБРОВАННОГО МЕТАЛЛА

При разработке конструктивных и технологических параметров процесса очистки от окалины учитывали следующие условия: очистка поверхности должна осуществляться на прокатном стане в его технологическом потоке после горячего калибрования и охлаждения проката; производительность установки должна обеспечить обработку партий металла на первых этапах освоения производства горячекалиброванной стали; удаление окалины должно быть полным по всей поверхности, а качество обработанной поверхности удовлетворять требованиям, предъявляемым к калиброванной стали. При этом качество поверхности калиброванного проката должно соответствовать целям и характеру дальнейшей переработки его, технология очистки не должна усложнять в значительной степени общий технологический процесс на прокатном стане и ухудшать условия труда.

Исходя из этого, ДонНИИчермет совместно с ММЗ пришли к выводу о целесообразности применения дробеструйного способа удаления окалины с поверхности металла в условиях среднесортного стана 350-1, производящего го-

рячекалиброванный прокат. В соответствии с этим разработана и введена в эксплуатацию опытно-промышленная установка. Она представляет собой дробеструйную проходную камеру непрерывного действия, принципиальная схема которой показана на рис. 78. Камера установлена на участке отделки проката и имеет производительность до 3 т/ч и

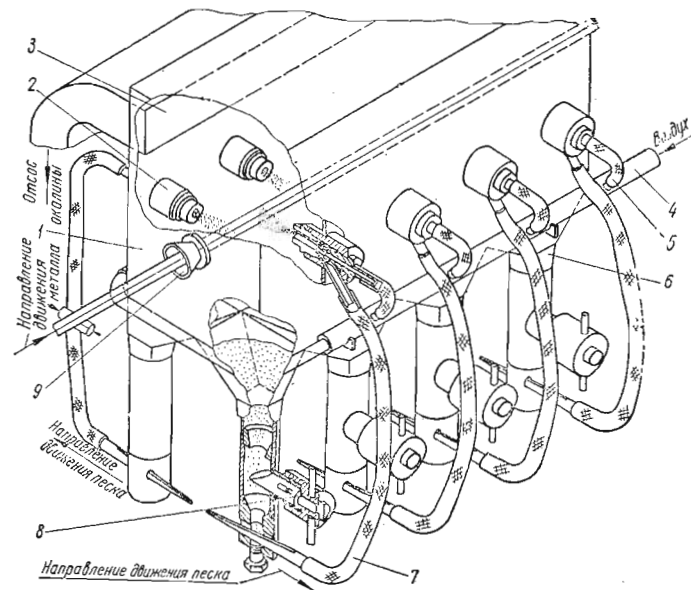


Рис. 78. Схема дробеструйной камеры непрерывного действия.

предназначена для удаления окалины с прутков горячекалиброванной круглой стали диаметром 32—56 мм. Металл на очистку поступает после охлаждения, правки и порезки на соответствующие длины.

Дробеструйная установка состоит (рис. 78) из корпуса 1 (габаритные размеры 1000 × 1700 × 1300 мм), в боковых стенках которого укреплены по четыре сопла 2. В верхней части корпуса выполнено окно 3 вытяжной вентиляции, в нижней — бункеры 6 с рабочим материалом (дробью). Рабочее пространство камеры разделено сеткой, которая предохраняет бункер от попадания в него крупных частиц, нарушающих работу дозаторов и рабочих сопл. Подача

воздуха в сопла осуществляется по резиновым шлангам 5 из общего коллектора 6. Подача металлической дробы из бункера в сопла происходит путем инъекции через шланги 7 и дозаторы 8. В передней и задней стенках камеры установлены вводная и выводная направляющие воронки 9, предназначенные для правильного удержания проката в камере и вывода его. Металлические поверхности внутри камеры защищены от воздействия дробы и преждевременного износа листовой резиной. С передней и задней сторон камера оборудована приемными стеллажами и холостыми рольгангами, а также двумя парами приводных задающих и приемных роликов.

Система вентиляции установки состоит из трубопровода с регулирующей заслонкой, пылевого циклона, вентилятора и отводящего трубопровода. Работа вытяжной системы регулируется заслонкой в отводящем от камеры трубопроводе так, чтобы в камере поддерживалось постоянное разрежение.

Исследования качества поверхности прутков, обработанных в опытно-промышленной дробеструйной установке, подтвердили ранее полученные результаты — чистота поверхности соответствует 4—5-му классам при среднем значении $R_a = 5,6$ мкм.

После удаления окалины с поверхности проката диаметром 36, 38 и 40 мм его масса уменьшается на 0,092—0,15%. Эти цифры подтверждаются результатами измерения толщины и плотности окалины. На углеродистых и конструкционных марках стали без ускоренного охлаждения толщина окалины составляет 0,05—0,06 мм (0,1—0,12 мм по диаметру) при среднем значении плотности 5,2 г/см³.

ПРИМЕНЕНИЕ ГОРЯЧЕКАЛИБРОВАННОЙ СТАЛИ

Калиброванная сталь [71], полученная холодным волочением, характеризуется точными размерами, повышенным качеством отделки поверхности и, для ряда сталей, заданными физико-механическими характеристиками. Использование на машиностроительных предприятиях калиброванной и горячекатаной круглой стали весьма разнообразно, определяется технологией производства и оснащенностью предприятия специализированными металлообрабатывающими станками и агрегатами. Горячекатаную круглую сталь ис-

пользуют в кузнечно-прессовых цехах как заготовку для горячейковки или штамповки изделий всевозможного назначения. Для этого случая, как правило, нет необходимости в повышении точности поперечных размеров проката, что обуславливается недостаточно точной порезкой прутков на заготовки перед ковкой или штамповкой, нагревом всего объема заготовки и образованием окалины, а также образованием облоя для гарантированного заполнения металлом полости штампа. Точность проката не имеет существенного значения и тогда, когда важен объем получаемой из него заготовки, а не продольный размер, а также когда экономия от переработки точного проката значительно ниже затрат на его производство.

Например, горячекатаную круглую сталь часто применяют для изготовления деталей путем последовательных операций со снятием стружки по всей поверхности глубиной в несколько миллиметров. Применение крупносортовой холоднокатаной стали в этом случае с экономией 2—3% металла за счет снижения отходов в стружку не компенсирует затраты при производстве такой стали. Применение же для этой цели горячекалиброванной круглой стали с окалиной, имеющей геометрические размеры только в отрицательном узком поле допуска, позволяет получить ту же экономию при значительно меньших затратах на производство точного металла. ММЗ поставяет таким потребителям горячекалиброванную круглую сталь по высокой точности (ГОСТ 2590—71) с приплатами за точность в размере 8%.

По аналогичной технологии часто изготавливают резанием по всей поверхности детали с утолщением различной конфигурации на концах, когда основной объем снимаемой стружки приходится на среднюю часть детали, с последующей шлифовкой изделия. Изготовление таких деталей из горячекалиброванной заготовки с горячей высадкой утолщенных концов и шлифовкой в качестве последней операции позволяет экономить металл и значительно сокращать затраты труда.

В больших количествах горячекатаная круглая сталь применяется без какой-либо обработки, например, в виде гладкой арматуры в железобетонных конструкциях или в виде элементов металлоконструкций самого разнообразного назначения. Применение для этих целей горячекалиброванной стали, характеризующейся только отрицательными

допусками на геометрические размеры, со смещением в сторону их максимальных значений, дает прямую экономию металла. Исследованиями [64] показано, что экономия металла при прокатке по суженным допускам составляет 1,5—12% с максимальными значениями для мелкосортного проката и катанки. Рассмотренные примеры относятся к применению горячекалиброванной стали вместо обычного проката, а эффективность в основном оценивается экономией металла. Производство на прокатных станах горячекалиброванной стали с допусками, соответствующими ГОСТ 7417—57, создает условия для применения ее в ряде случаев вместо холоднотянутой. Эта область металлообработки производства включает три основных направления: изготовление деталей на станках-автоматах; использование металла в виде готовых изделий с незначительной дополнительной механической обработкой; сокращение технологических операций на заключительной стадии металлургического цикла.

Потребность крупного машиностроительного завода в калиброванной стали достигает нескольких десятков тысяч тонн в год. Основная масса такой стали предназначена для переработки на станках-автоматах. Анализ требований к качеству изготавливаемых деталей и технологии производства на Харьковском тракторном заводе, заводе «Ростсельмаш» и Кременчугском автомобильном показал, что если после обточки на станках остающаяся необработанной поверхность исходной заготовки не является посадочным местом или ответственным участком сопряжения в соответствующем механизме или узле конструкции, то холоднотянутую сталь можно заменить горячекалиброванной без окалины. Из общей потребности металла на предприятии такая замена может превышать 50%. Во всех этих случаях применение стали с малыми допусками в качестве заготовки для станков-автоматов обусловлено работой подающего и зажимного цанговых механизмов. Стабильные и точные размеры заготовки обеспечивают надежное удержание ее цанговым механизмом в процессе обработки резанием.

Авторами в содружестве со специалистами указанных заводов проведены испытания по применению горячекалиброванной круглой стали конструкционных углеродистых марок при массовом изготовлении деталей комбайнов, тракторов и автомашин на многошпиндельных токарных автоматах. Уже на первой стадии испытания были из-

готовлены и признаны годными более 30 тыс. различных стальных без замечаний как к качеству готовых изделий, так и к работе станков-автоматов. По результатам этих испытаний ММЗ поставляет горячекалиброванную углеродистую сталь по специальным техническим условиям, в которых предусмотрено четыре класса точности геометрических размеров сечения круглой стали (табл. 23), а также

Таблица 23
Допускаемые отклонения размеров горячекалиброванной круглой стали

Диаметр стали, мм	Допускаемые отклонения, мм, при классе точности				Площадь попереч- ного сечения, см ²	Масса 1 м, кг
	1	2	3	4		
32	+0,00 -0,20	+0,00 -0,30	+0,00 -0,40	+0,15 -0,50	8,042	6,31
33					8,533	6,71
34					9,079	7,13
35					9,621	7,55
36					10,18	7,99
38					11,34	8,90
40					12,57	9,86
42					13,85	10,88
43					14,52	11,40
44					15,20	11,94
45	+0,00 -0,20	+0,00 -0,30	+0,00 -0,40	+0,15 -0,80	15,90	12,48
48					18,10	14,20
50					19,64	15,42
52					21,24	16,67
53					22,06	17,32
56					24,63	19,33

оставка металла с окалиной на поверхности или без нее. Средняя цена горячекалиброванной круглой стали из углеродистых марок стали составляет 124 руб. (диаметр 32—40 мм) и 122 руб. (диаметр 50—70 мм) при поставке без окалины и с приплатами в размере 8% при поставке металла с окалиной. Средняя же оптовая цена на углеродистую холоднотянутую сталь составляет 139 руб. 71 коп. [71].

Эффективность применения горячекалиброванной стали заключается в более низкой стоимости по сравнению с холоднотянутой, особенно при изготовлении последней в металлургических цехах машиностроительных предприятий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Адыюстажное оборудование для отделки сортового проката за рубежом.— «Информация ин-та «Черметинформация», 1971, сер. 7, вып. 5, 3С с.
2. Аксенов П. Н. Оборудование литейных цехов. М., «Машиностроение», 1968, 458 с.
3. Анисифоров В. П., Зельдович Л. С. Исследование натяжения и давления металла на валки при редуцировании труб.— «Бюллетень ин-та «Черметинформация», 1967, № 10, с. 49—51.
4. Баакашвили В. С., Поздеев А. А., Тарновский И. Я. Исследование сопротивления деформации методами теории наследственности.— «Сообщение АН Груз.ССР». Т. XXIX. 1962, № 3, с. 269.
5. Бахтинов Б. П., Штернов М. М. Калибровка прокатных валков. М., Металлургиздат, 1953, 783 с.
6. Беляев Н. М. Сопротивление материалов. М., «Наука», 1965, 855 с.
7. Борисенко Г. П. Опережение при прокатке круглых профилей на непрерывном мелкосортном стане.— В сб.: «Прокатное производство». Т. XXI. М., Металлургиздат, 1965, с. 145—161.
8. Бровман М. Я. Энергосиловые параметры непрерывных заготовочных станов. М., Металлургиздат, 1962, 150 с.
9. Бронштейн И. К., Семендяев К. А. Справочник по математике. М., Физматгиз, 1959, 608 с.
10. Владимиров Ю. В. Механическое удаление окалины с поверхности мелкосортной стали, катанки и проволоки за рубежом. М., «Черметинформация», 1970, 98 с.
11. Вудкок Р., Вильямс Е. Жесткость прокатных клетей.— В сб.: «Технический прогресс в прокатном производстве». М., «Металлургия», 1968, с. 211—217.
12. Выгодский М. Я. Справочник по высшей математике. М. 29. Физматгиз, 1962, 870 с.
13. Выдрин В. Н., Барков Л. А., Соловьев А. В. Геометрия прокатки в многовалковых калибрах.— «Известия вузов Черная металлургия», 1970, № 6, с. 87—95.
14. Выдрин В. Н., Дукмасов В. Г., Нагорнов В. С. Новое в прокатке точного сортового металла. Челябинск, Южно-Уральское книжное изд-во, 1970, 107 с.
15. Выдрин В. Н., Дукмасов В. Г. Точная прокатка сортового металла. Челябинск, Южно-Уральское книжное изд-во, 1965, 62 с.
16. Грицук Н. Ф., Сиразитдинов Н. И. Повышение точности прокатки круглого профиля.— «Бюллетень ЦНИИЧМ». 1966, № 22, с. 65—68.
7. Губарь Е. Н., Грицук Н. Ф., Гунин И. В. Прокатка с суженными допусками.— «Металлург», 1972, № 3, с. 28—30.
8. Губкин С. И. Пластическая деформация металлов. Т. I. М., Металлургиздат, 1961, 376 с.
9. Девкин М. М., Севастьянов И. Д. Очистка поверхности деталей металлическим песком. М., «Машиностроение», 1968, 65 с.
10. Динник А. А. Истинные пределы текучести стали при горячей прокатке.— В сб.: «Теория прокатки. Материалы конференции по теоретическим вопросам прокатки». М., Металлургиздат, 1962, с. 157—173.
11. Динник А. А. Расчет давления металла на валки при горячей прокатке стали.— В сб.: «Современные достижения прокатного производства. Труды межвузовской научно-технической конференции». Т. I. Л., Изд-во ЛПИ, 1958, с. 81—85.
12. Динник А. А. Экспериментальное исследование разупрочнения стали при горячей деформации.— В сб.: «Металлургия и коксохимия». Вып. 6. Киев, «Техника», 1966, с. 18—24.
13. Дмитриев В. Д. Использование жестких клетей на сортопрокатных станах.— В сб.: «Точность прокатки». Донецк, «Донбасс», 1969, с. 26—35.
14. Долженков Ф. Е. Некоторые закономерности процесса прокатки при больших отношениях толщины раската к диаметру валков.— В сб.: «Современные достижения прокатного производства. Труды межвузовской научно-технической конференции». Т. II. Л., Изд-во ЛПИ, с. 116—131.
15. Емельяненко П. Т., Борисов С. И. Исследование давления металла на валки автоматстана.— «Металлург», 1940, № 4, с. 28—30.
16. Еремеев В. И., Тарновский В. И., Поздеев А. А. Об одной теории ползучести при горячем пластическом деформировании.— В сб.: «Вопросы строительной механики. Труды Уральского политехнического ин-та». Вып. 175. Свердловск, Изд-во УПИ, 1968, с. 105—109.
17. Еремеев В. И., Сергеев С. Т. Методика определения параметров уравнений состояния.— В сб.: «Точная прокатка. Труды конференции». Донецк, «Донбасс», 1973, с. 113—127.
18. Жесткие рабочие клетки для прокатки сортового металла с повышенной точностью.— «Сталь», 1970, № 5, с. 428—432. Авт.: И. Ф. Приходько, А. Я. Сапожников, А. А. Вайсфельд и др.
19. Зайков М. А. Режимы деформации и усилия при горячей прокатке. Свердловск, Металлургиздат, 1960, 280 с.
20. Зарезанков Г. Х. Фотоэлектронные приборы автоматического контроля размеров проката. М., Металлургиздат, 1962, 152 с.
21. Зюзин В. И., Бровман М. Я., Мельников А. Ф. Сопротивление деформации сталей при горячей прокатке. М., Металлургиздат, 1964, 270 с.
22. Калинин В. П., Маркова С. Д., Джетымов А. М. Жесткость клетей и точность прокатки на стане 350.— «Металлургическое оборудование». НИИИНФОРМТЯЖМАШ, 1968, № 21, с. 25—28.

33. Кацнельсон М. П., Бровман М. Я. Кинематические и энергосиловые параметры при прокатке катанки в трехвалковых клетях. — «Металлургическое оборудование». НИИИНФОРМТЯЖМАШ, 1967, № 16, с. 10—13.
34. Кацнельсон М. П., Сапожников А. Я. Новые конструкции чистовых групп рабочих клетей непрерывных прокатных станов в СССР и за рубежом. — «Металлургическое оборудование». НИИИНФОРМТЯЖМАШ, 1967, № 2, 39 с.
35. Качанов Л. М. Основы теории пластичности. М., «Наука», 1969, 420 с.
36. Качанов Л. М. Теория ползучести. М., Физматгиз, 1960, 455 с.
37. Липухин В. А. Современные непрерывные проволочные и мелкосортные станы. — «Металлург», 1964, № 12, с. 36—38.
38. Мериин И. М. Точность прокатки в предварительно напряженных клетях. Ижевск, «Удмуртия», 1970, 119 с.
39. Механические свойства стали при горячей обработке давлением. М., Metallurgizdat, 1960, 263 с. Авт.: И. Я. Тарновский, А. А. Поздеев, Л. В. Меандров и др.
40. Морз Ф. Колебания и звук М., Гостехиздат, 1949, 496 с.
41. Некоторые основные закономерности исследования горячей калибровки круглых профилей. — «Сталь», 1972, № 4, с. 337—341. Авт.: Г. А. Гладков, С. В. Калинович, А. А. Когадеев и др.
42. Персиянцев В. А. К вопросу зависимости сопротивления от скорости деформации. — В сб.: «Процессы штамповки и их технологические параметры». М., Машиностроение, 1959, с. 128.
43. Поздеев А. А., Тарновский В. И., Еремеев В. И. Анализ сопротивления деформации в зависимости от истории процесса нагружения. — «Известия вузов. Черная металлургия», 1966, № 1, с. 89—95.
44. Поздеев А. А., Тарновский В. И., Еремеев В. И. О перспективах применения теории ползучести и наследственности к расчету процессов обработки металлов давлением. — «Известия вузов. Черная металлургия», 1965, № 11, с. 62—69.
45. Применение теории ползучести при обработке металлов давлением. М., «Металлургия», 1973, 192 с. Авт.: А. А. Поздеев, В. И. Тарновский, В. И. Еремеев и др.
46. Прокатные станы СССР Т. I. М., «Металлургия», 1970, 600 с.
47. Пушкарев В. Ф. К вопросу о влиянии внешних зон на сопротивление деформации при прокатке. — В сб.: «Прокатные станы и технология прокатки. Труды ЦНИИТМАШ». Вып. 84. М., Машгиз, 1958, с. 92—96.
48. Работнов Ю. Н. Ползучесть элементов конструкций. М., «Наука», 1966, 752 с.
49. Сапожников А. Я., Иванов Ю. Г. Жесткость станин сортовых станов. — «Металлургическое оборудование». НИИИНФОРМТЯЖМАШ, 1968, № 11, 41 с.
50. Сапожников А. Я., Приходько И. Ф. Предварительно напряженные клетки для прокатки сортового металла с повышенной точностью в СССР и за рубежом. — «Металлургическое оборудование», НИИИНФОРМТЯЖМАШ, 1968, № 10, 50 с.
51. Сергеев С. Т., Еремеев В. И., Зайков М. А. Нограмма для определения сопротивления деформации. — В сб.: «Точная прокатка. Труды конференции». Донецк, «Донбасс», с. 127—133.
- Силовые условия прокатки в многовалковом калибре. — В сб.: «Теория и технология прокатки Труды Челябинского политехнического института». Вып. 54. Челябинск, 1968, с. 182—191. Авт.: М. И. Бояршинов, М. Г. Поляков, Ю. И. Коковихин и др.
- Тарновский И. Я., Поздеев А. А., Ляшков В. Б. Деформация металла при прокатке. Свердловск, Metallurgizdat, 1956, 287 с.
- Теория прокатки крупных слитков. М., «Металлургия», 1968, 252 с. Авт.: А. П. Чекмарев, В. Л. Павлов, В. И. Мелешко и др.
- Теория редуцирования труб. Свердловск, Средне-Уральское книжное изд-во, 1970, 228 с. Авт.: В. В. Ереклинцев, Ю. И. Блинов, Д. С. Фридман и др.
- Тимошенко С. П. Колебания в инженерном деле. М., «Наука», 1967, 444 с.
- Фомичев И. А., Кириченко А. Н. Определение проекции поверхности соприкосновения заготовки с валком при прокатке в калибрах. — В сб.: «Труды УкрНИТИ». Вып. 2. М., Metallurgizdat, 1959, с. 114—131.
- Фролов С. В., Шостаков Р. Я. Курс высшей математики. М., «Высшая школа», 1966, 663 с.
- Хилл Р. Математическая теория пластичности. М., Госэнергоиздат, 1956, 407 с.
- Целиков А. И. Основы теории прокатки. М., «Металлургия», 1965, 247 с.
- Целиков А. И., Смирнов В. В. Прокатные станы. М., Metallurgizdat, 1958, 432 с.
- Целиков А. И., Смирнов В. В. Влияние внешних зон на сопротивление деформации при прокатке. — «Сталь», 1952, № 7, с. 614—618.
- Целиков А. И. Теория расчета усилий в прокатных станах. М., Metallurgizdat, 1962, 494 с.
- Чекмарев А. П., Чернобривенко Ю. С., Бибба В. И. Технико-экономическая эффективность производства точного сортового проката. — В сб.: «Обработка металлов давлением». Т. LVII М., «Металлургия», 1971, с. 7—11.
- Чекмарев А. П., Борисенко Г. П., Горбанев А. А. Определение среднего удельного и полного давления металла на валки при прокатке на трехвалковом стане. — В сб.: «Прокатное производство». Т. XXII М., «Металлургия», 1967, с. 84—97.
- Чекмарев А. П., Борисенко Г. П., Горбанев А. А. Степень и скорость деформации при прокатке на трехвалковом стане. — В сб.: «Прокатное производство». Т. XXII М., «Металлургия», 1967, с. 145—155.
- Чекмарев А. П., Ваткин Я. Л. Основы прокатки труб в круглых калибрах. М., Metallurgizdat, 1962, 221 с.
- Чекмарев А. П., Побегайло Г. Г. Точная прокатка сортовых профилей. М., «Металлургия», 1968, 236 с.
- Шварцбарт Я. С. Расчет напряжений текучести с учетом закона развития деформации во времени при горячей прокатке. — «Сталь», 1971, № 11, с. 1020—1023.

70. Шевченко А. А. Непрерывная прокатка труб. М., Metallurg-издат, 1954, 144 с.
71. Шефтель Н. И. Производство стальных калиброванных прутков. М., «Металлургия», 1970, 431 с.
72. Ширяев В. И. Исследование деформации и определение оптимальной формы винтовой пары нажимного устройства клетки прокатного стана.— «Известия вузов. Черная металлургия», 1965, № 12, с. 161—169.
73. Шостак В. А., Мигрохин А. К. Инфракрасный пирометр для измерения температуры проката.— «Заводская лаборатория», 1970, № 1, с. 119.
74. Энергосиловые параметры процесса прокатки в трехвалковых калибрах с натяжением.— В сб.: «Прокатное производство. Труды ин-та черной металлургии». Т. XXXV. М., «Металлургия», 1971, с. 189—199. Авт.: А. П. Чекмарев, Г. П. Борисенко, А. А. Горбанев и др.
75. Эффективность эксплуатации калибрующего блока трехвалковых клеток.— «Металлург», 1973, № 7, с. 30—32. Авт.: А. А. Когадеев, Г. А. Гладков, Л. П. Стычинский и др.
76. Энциклопедический справочник «Машиностроение». Т. VI. М., «Машиностроение», 1965, 548 с.
77. B ungeroth R. K., R umrich R. F. A mill for rod and bar products.— «Iron and steel Engineers», 1966, 43, № 3, p. 113—118.
78. Drahtdiemessung mit Radioisotopen.— «Draht — Welt», 1972, 58, № 2, s. 123.
79. Dry descaling process for wire rod and bar.— «Iron and Steel», 1968, 41, № 6, p. 246—250.
80. Egon Meier — Engelen, B üther H. I. Berührungslöse Walzdraht — Profilmessung.— «Draht», 1972, 23, № 5, s. 265—268.
81. Fujii Seiji, Onhishi Eimeii, Horiuchi Ioshihiro. On line measurement of the length of rolled materials.— «Iron and Steel Institute of Japan», 1973, 59, № 5, p. 218—221.
82. De Vos I. P. Über die Anordnung der Fertigstaffeln in mehradrigen Drahtwalzwerken hoher Leistung.— «Stahl und Eisen», 1961, 81, № 13, s. 382.
83. United — Profil — und Durchmesser — Lehre.— «Draht», 1972, 23, № 11, s. 717.

СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

Предисловие	3
Глава I Способы и эффективность повышения точности проката	5
Факторы, определяющие точность проката	5
Качество поверхности горячекатаного металла и эффективность повышения точности размеров его сечения	12
Глава II. Калибрующие блоки	14
Сущность процесса горячего калибрования	14
Рабочие клетки блоков	18
Конструкция и расположение калибрующих установок	24
Расчет основных конструктивных элементов	32
Подготовка калибрующих блоков к работе	38
Глава III. Основы теории и исследование процесса горячего калибрования	43
Методика расчета круглых и шестигранных калибров	43
Жесткость трехвалковых клеток	58
Формоизменение и неравномерность деформации металла	74
Площадь поверхности контакта металла с валками	78
Удельное давление металла на валки	86
Соппротивление деформации	96
Давление металла на валки и момент прокатки	101
Катающий диаметр	107
Нейтральный угол и опережение	109
Глава IV. Технология и практика работы калибрующих блоков	112
Режим обжария	112
Скоростной и температурный режимы	120
Износ калибров трехвалковых клеток	124
Точность размеров горячекалиброванной стали	130
Эффективность использования калибрующего блока в потоке прокатки	154
Глава V. Обработка поверхности и применение горячекалиброванной стали	157
Способы удаления окалины	158
Исследование качества поверхности готового проката	161
Технология и оборудование для обработки поверхности горячекалиброванного металла	164
Применение горячекалиброванной стали	166
Литература	170

*Геннадий Александрович Гладков, канд. техн. наук,
Станислав Васильевич Калинович, канд. техн. наук,
Леонид Павлович Стычинский, канд. техн. наук,
Анатолий Александрович Когадеев, инж.,
Эдуард Петрович Николаев, инж.,
Станислав Тихонович Сергеев, инж.*

ПРОИЗВОДСТВО ГОРЯЧЕКАЛИБРОВАННОГО ПРОКАТА

Редактор издательства инж. *М. Д. Семененко*
Обложка художника *Л. Б. Сергия*
Художественный редактор *М. Д. Шевченко*
Технический редактор *С. М. Литвин*
Корректор *В. В. Цекало*

Сдано в набор 31-VII, 1974 г. Подписано к печати 10-XII
1974 г. Формат бумаги 84x108¹/₃₂. Бумага типографская № 2.
Объем: 9,24 усл. печ. л.; 9,39 уч.- изд. л. Тираж 2000. Зак.
№ 4—1962. БФ 39191. Цена 58 коп.

Издательство «Техніка», 252601, Киев, 1, ГСП Пушкинская 28,

Отпечатано с матриц республиканского производственного
объединения «Полиграфкнига» в Нестеровской городской ти-
пографии Львовского облполиграфиздата, г. Нестеров, ул.
Горького, 8, зак. 2459.



Цена 58 коп.

