

А. А. ПРОТАСОВ, П. П. ЗУЕВ

КАЛИБРОВКА ВАЛКОВ
ДЛЯ ПРОКАТКИ
БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ



ГОСУДАРСТВЕННОЕ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
ЛИТЕРАТУРЫ ПО ЧЕРНОЙ И ЦВЕТНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ
Москва 1956

АННОТАЦИЯ

В книге рассмотрены рациональные условия деформации при прокатке малопластичной стали и сплавов, обеспечивающие значительное уменьшение брака прокатного происхождения.

Книга рассчитана на калибровщиков и инженеров-технологов прокатных цехов.

Авторы:

ПРОТАСОВ Анатолий Александрович

ЗУЕВ Павел Петрович

* * *

Редактор И. Г. Астахов

Редактор издательства А. Г. Голяткина Технический редактор А. П. Берлов

Сдано в производство 19/III 1956 г. Подписано к печати 12/VII 1956 г.

Бумага 60 × 92¹/₁₆ бум. л. 5,5 печ. л. 11,0

Т-07302 уч.-изд. л. 10,32 Тираж 4300 Цена 6 р. 65 к. 3 л. 265

* * *

Типография Металлургиздата, Москва, Цветной бульвар 30.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	5
<i>I. Структура, свойства и требования, предъявляемые к быстрорежущей стали</i>	7
<i>II. Общие сведения по обработке давлением быстрорежущей стали</i>	19
1. Пластичность и физическая сущность пластической деформации	19
2. Влияние различных факторов на пластичность и сопротивление деформации	22
3. Опытное определение сопротивления деформации	39
4. Контактное трение и его значение	50
5. Неравномерность деформации и образование разрывов в быстрорежущей стали	64
6. Захват металла валками	78
7. Уширение быстрорежущей стали при прокатке	82
8. Специфические особенности прокатки слитка быстрорежущей стали	87
<i>III. Калибровка валков для прокатки быстрорежущей стали</i>	89
1. Калибровка валков для прокатки слитков	90
2. Оптимальные условия деформации слитка	123
3. Калибровка валков для прокатки простейших профилей из заготовки	125
4. Действующие калибровки валков для прокатки сортовых профилей быстрорежущей стали	136
<i>IV. Определение основных размеров калибров для прокатки быстрорежущей стали</i>	155
1. Ящичные калибры	155
2. Круглые калибры	157
3. Чистовой круглый калибр	158
4. Чистовой овал	160
<i>V. Шаблонное и инструментальное хозяйство</i>	171
1. Изготовление и хранение шаблонов для расточки валков	171
2. Контршаблоны	172
3. Контрольно-измерительные инструменты	172
Л и т е р а т у р а	175

ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ, ПРИНЯТЫЕ В КНИГЕ

Прогрессивной молодежи нашей—
Ленинскому Комсомолу
свой скромный труд посвящаем

Авторы

ПРЕДИСЛОВИЕ

Быстрорежущая сталь нашла широкое применение в машиностроении для режущего инструмента. Наряду с другими материалами она позволяет использовать в производстве скоростные методы обработки металлов резанием.

Изготовление быстрорежущей стали довольно сложно и связано с решением трудных задач как при выплавке, так и при дальнейшей ее обработке. Особенно большие затруднения встречаются при проектировании калибровки валков.

Наша промышленность и научно-исследовательские институты накопили довольно много материала по обработке давлением быстрорежущей стали. Поэтому назрела необходимость обобщить эти данные и особенно те, которые относятся к проектированию калибровки валков.

В задачу авторов этой книги не входило освещение теоретических вопросов калибровки валков, так как они достаточно полно освещены в ряде капитальных трудов, изданных в последние пять лет.

В данной книге рассматриваются следующие основные вопросы:

- 1) влияние отдельных факторов на пластичность быстрорежущей стали при высоких температурах;
- 2) основные виды брака по вине калибровки и главным образом образование внутренних трещин в сечении заготовок и пути его устранения;
- 3) анализ действующих и опробованных ранее калибровок;
- 4) организация шаблонного хозяйства и определение основных размеров, необходимых для построения шаблонов простейших профилей.

Все эти вопросы решаются на основе практики работы наших заводов, работ советских ученых: И. М. Павлова, С. И. Губкина, А. И. Целикова, Ю. М. Чижикова и др., а также работ передовых практиков-производственников — В. О. Белозерова и инж. Д. Л. Ротенберг. В книгу включены также исследования авторов.

Авторы приносят глубокую благодарность инженерам И. К. Анцыферову и А. В. Ласкину за ряд весьма ценных указаний и советов, сделанных при рецензировании рукописи, а также канд. техн. наук И. Г. Астахову за труд по редактированию книги, А. Л. Протасовой, за помощь в техническом оформлении рукописи книги

Размеры прокатываемой полосы τ_1, τ_2, τ_3 — главные касательные напряжения

H, H_0 ,
 H_1, B_1, L_1 — высота, ширина и длина
полосы до прокатки
 h, B_2, L_2 — то же после прокатки
 $H_{\text{экв}}$ — высота эквивалентного
прямоугольника
 ω_{n-1}, ω_n — площадь поперечного сечения до и после проката
 $S_{\text{вк-о}}$ — площадь внеконтактной области деформации
 $S_{\text{кн-о}}$ — площадь контактной области деформации
 S — проекция контактной поверхности

Напряжения и деформации

P — сопротивление деформации
 p — удельное давление
 σ_1 — максимальное главное напряжение
 σ_2 — среднее главное напряжение
 σ_3 — минимальное главное напряжение
 $p_{\text{ср}}$ — среднее удельное давление
 k — сопротивление деформации при линейном напряженном состоянии (σ_0)
 t — элементарные силы трения
 σ_B — предел прочности
 $\sigma_{\text{уп}}$ — предел упругости
 σ_s — предел текучести
 ε — относительная упругая деформация
 δ — относительная остаточная деформация (удлинение)

μ — вытяжка ($\mu = \frac{L_2}{L_1}$)

$\mu_{\text{ср}}$ — средняя вытяжка
 ψ — относительное поперечное сжатие

H_B — твердость по Бринеллю
 α_K — ударная вязкость

Силы

P — давление металла на валок
 R_Z — проекция силы P со стороны металла на валок
 T — сила трения
 Q_Z — проекция силы P со стороны валка на металл

Скорости

v — окружная скорость валков
 $u_{\text{ср}}$ — средняя скорость деформации
 v_1 — скорость выхода металла из валков

Углы и дуги

α — угол захвата (касания) при прокатке
 β — угол трения
 γ — критический угол при прокатке
 δ', φ — переменные углы
 ρ — длина дуги
 S_α — длина дуги захвата (касания) при прокатке

Разное

f — коэффициент трения
 n — число оборотов в минуту
 S_h — опережение при прокатке

$$\text{ке } \delta'' = f \sqrt{\frac{2D}{\Delta h}}$$

$\gamma_{\text{в}}$ — коэффициент вязкости металла

t — температура

$$\psi' = \frac{\pi n}{60} \left(D - D_p \right) - \text{секундное растяжение}$$

$$\varphi = \frac{B_1 - B_2}{2h} 100\% - \text{выпуск калибра}$$

ρ_1, ρ_2 — радиусы закруглений ручья

δ''' — зазор между буртами
 D_p — катающий диаметр

и Л. В. Варламовой за графическую работу по оформлению рисунков и диаграмм.

* *
*

В настоящей книге главы I, II и § 1, 2 главы III написаны инж. А. А. Протасовым; главы IV, V и § 3, 4 главы III — инж. П. П. Зуевым. Общее руководство по подготовке книги к изданию осуществлялось А. А. Протасовым.

I. СТРУКТУРА, СВОЙСТВА И ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ

Вследствие большой скорости резания, широко применяемой на наших заводах, от режущего инструмента требуется высокая красностойкость или теплотвердость и большое сопротивление износу. Этим требованиям отвечает быстрорежущая сталь, обладающая перечисленными свойствами, которые не уменьшаются при нагревании примерно до 600°. В промышленности повсеместно используют наиболее ходовые быстрорежущие стали двух марок — P18 и P9 (табл. 1).

Таблица 1

Химический состав быстрорежущей стали марок P18 и P9

Марка	Содержание элементов, %									
	C	Mn	Si	Cr	W	V	Mo	Ni	S	P
		не более					не более			
P18	0,7—0,8	0,40	0,40	3,8—4,4	17,5—19,0	1,0—1,4	0,3	0,4	0,03	0,03
P9	0,85—0,95	0,40	0,40	3,8—4,4	8,5—10,0	2,0—2,6	0,3	0,4	0,03	0,03

Примечание. При содержании в стали марки P18 0,3—1,0% Mo и в стали марки P9 0,3—0,6% Mo их маркируют соответственно P18M и P9M.

Быстрорежущая сталь относится к ледебуритному классу и в литом состоянии имеет такую же структуру, как и белый доэвтектический чугун — ледебуритная эвтектика в виде сетки, окружающей твердый раствор, с островками карбидной структуры. Ледебуритная эвтектика имеет «скелетообразный» вид, где пластинки карбидов чередуются с аустенитом (рис. 1).

В литой стали имеются карбиды трех типов, выделившиеся в разное время в процессе охлаждения. Первичные карбиды образуются в виде эвтектики (ее обычно называют ледебуритом). После затвердевания при дальнейшем охлаждении слитка из аустенита выделяются вторичные карбиды и, наконец, при температуре A_1 (800—850°) наступает перлитное превращение, т. е. распад аустенита на легированный феррит и мелкие (эвтектоидные) карбиды.

Толщина ледебуритной сетки (первичные карбиды) по сечению слитка различна — на периферии слитка она тоньше, чем в центре (рис. 2, 3 и 4).

При исследовании влияния веса слитка на толщину карбидной сетки образцы для микроанализа отбирали из центра и края слитков разного веса. Из рис. 2—4 наглядно видно, что на струк-

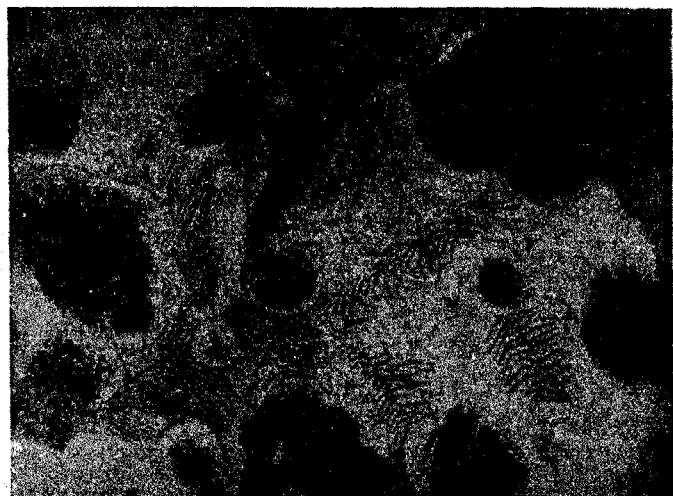


Рис. 1. Ледебуритная эвтектика в литой быстрорежущей стали. $\times 1000$

туру центра слитка вес его влияет незначительно, структура же периферии существенно зависит от веса слитка — чем больше вес слитка, тем больше площадь ледебуритных включений (табл. 2).

Таблица 2
Зависимость площади ледебуритных включений от веса слитка (Г. С. Черняк)

Вес слитка кг	Площадь ледебуритных включений, μ^2	
	центр слитка	край слитка
100	8,8	0,7
200	8,8	0,95
700	8,0	2,1

Примечание. Приведены средние данные из измерений 100 полей шлифа.

Толщина ледебуритной сетки оказывает влияние на сопротивление деформации: чем тоньше ледебуритная сетка, тем больше ее сопротивление деформации. Это объясняется тем, что при уменьшении толщины сетки увеличивается поверхность и, следовательно, поверхностная энергия, а это приводит к увеличению сопротивления деформации ледебуритной сетки.

Термообработкой ледебу-

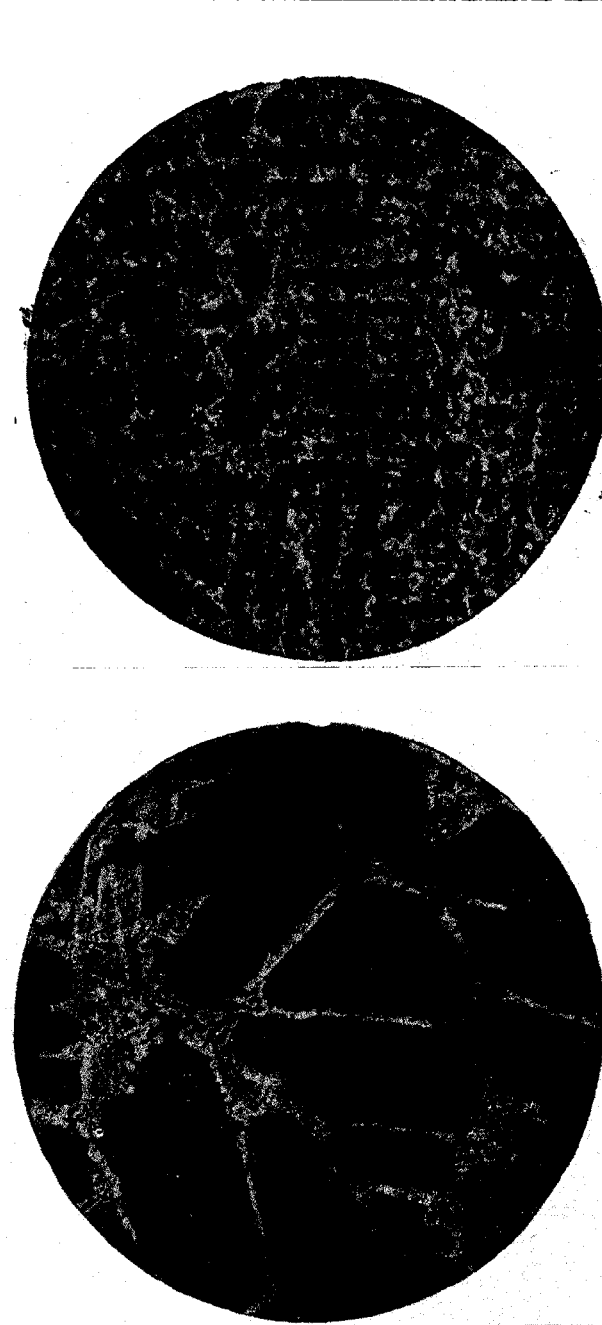
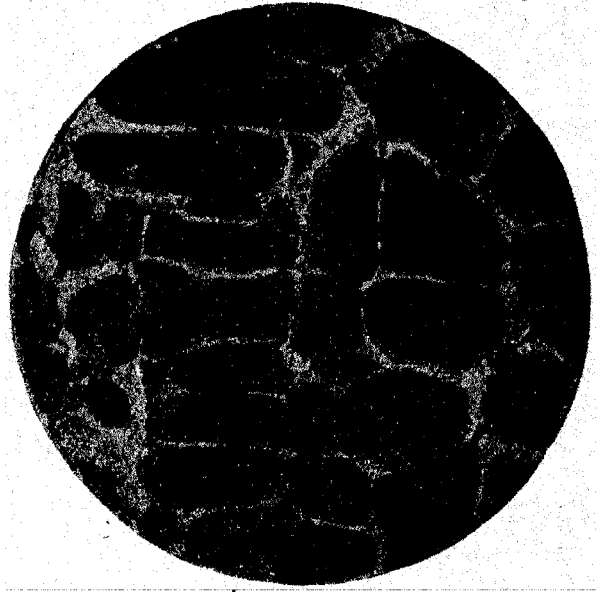
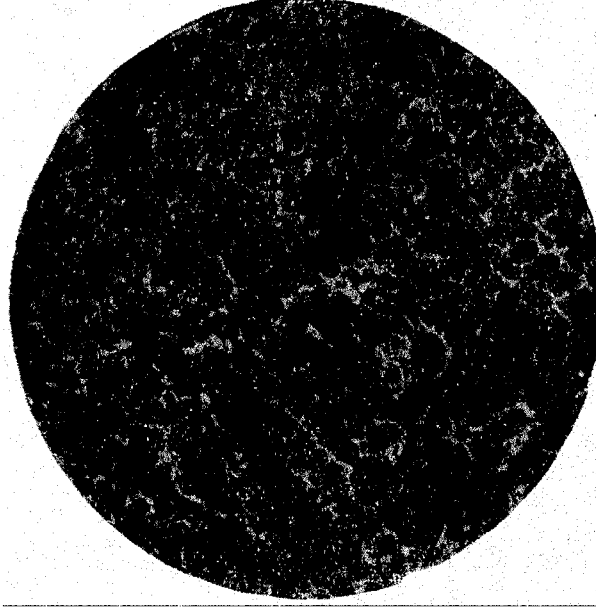


Рис. 2. Микроструктура слитка быстрорежущей стали круглого сечения весом 750 кг. $\times 500$:
а — в центре слитка; б — на расстоянии 10 мм от поверхности слитка



a

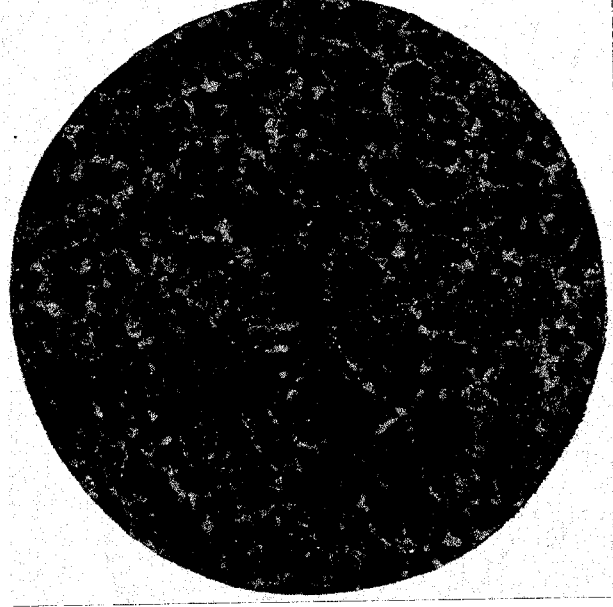


б

Рис. 3. Микроструктура слитка быстрорежущей стали марки Р18 круглого сечения весом 300 кг.
 $\times 500$:
a — в центре слитка; *б* — на расстоянии 10 мм от поверхности слитка



a



б

Рис. 4. Микроструктура слитка быстрорежущей стали марки Р18 круглого сечения весом 200 кг.
 $\times 500$:
a — в центре слитка; *б* — на расстоянии 10 мм от поверхности слитка

ритная сетка не разбивается. Так, установлено, что даже тремя последовательными нагревами в продолжение 6 час. при 1150—1205° с последующим охлаждением в печи ее не удалось разрушить [1]. Это удается с большим трудом, только в процессе горячей механической обработки, например, ковкой и прокаткой слитка весом 200 кг при относительной суммарной степени обжа-

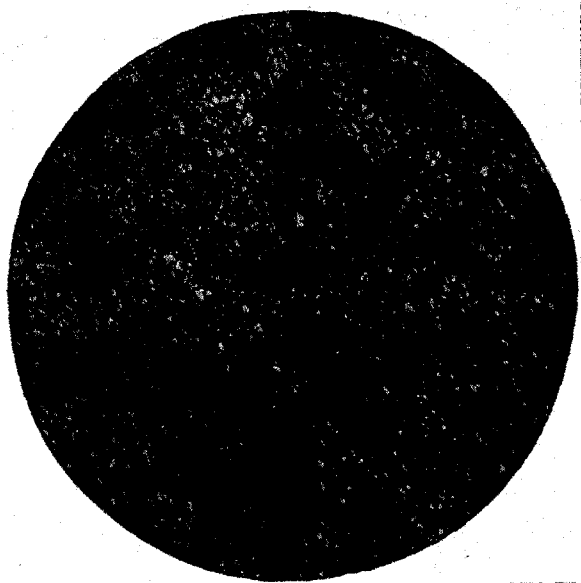


Рис. 5. Микроструктура образца диаметром 8 мм, полученного прокаткой слитка круглого сечения весом 200 кг марки Р18 по схеме: слиток → квадрат 83 мм → квадрат 36 мм → круг диаметром 8 мм

тия 98,52%. При прокатке этого слитка до круглого профиля диаметром 8 мм достигнут балл 3,0 по карбидной неоднородности (рис. 5).

К одному из основных специфических свойств литой быстрорежущей стали относится ее незначительная теплопроводность, почти в три раза меньшая по сравнению с малоуглеродистой сталью (рис. 6).

Вследствие этого быстрорежущая сталь чувствительна к резкому нагреву, в особенности, если слитки после разбора литейной канавы в сталелитейных цехах не подвергали отжигу. Поэтому продолжительность нагрева слитков согласно инструкции должна составлять:

Марка стали	Вес слитка, кг	Продолжительность нагрева, час.
Р18	200	8
	300	10
Р9	200	7
	300	9

При больших скоростях нагрева, особенно при низких температурах, слитки разрушаются; во избежание этого температуру

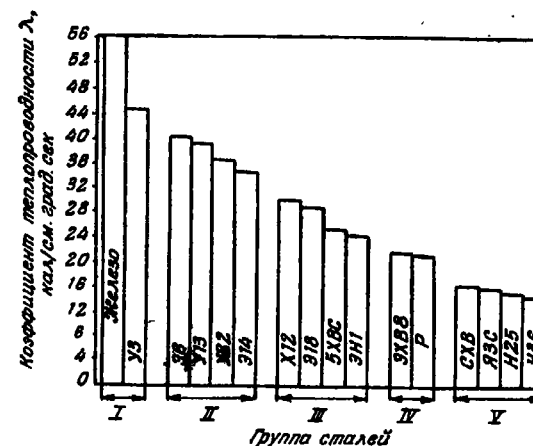


Рис. 6. Классификация сталей по их теплопроводности

в хвостовой части нагревательной печи не рекомендуется держать выше 600°.

Быстрорежущая сталь поставляется потребителям в виде простых профилей: круга, квадрата в соответствии с ГОСТ 5650—51 и полосы — ГОСТ 4405—48. При приемке готового профиля контролируют не только основные размеры сечения, длину, винтообразность и кривизну профиля, но и качество его поверхности. Допускаются лишь те поверхностные дефекты, после удаления которых зачисткой размеры сечения уменьшаются не более чем на 0,5 допуска на данный размер. К поверхностным дефектам относятся: трещины, закаты, плены, волосины и др.

Контролируется также макроструктура стали, определяемая по виду излома и макротравлением темплетов при плавочном контроле. Излом стали в состоянии поставки должен быть однородным, мелкозернистым; в нем не должно быть пустот, пузырей, шлаковых включений, посторонних прослоек и блесков.

Особое внимание заводы-потребители инструментальной быстрорежущей стали обращают на карбидную неоднородность и глубину обезуглероженного слоя.

ГОСТ 5952—51 (рис. 7) допускает следующий балл по карбидной неоднородности:

Диаметр круга или сторона квадрата, мм	
Не более 4	До 40
» » 5,5	Свыше 40 до 60
» » 7,0	Свыше 60 до 80

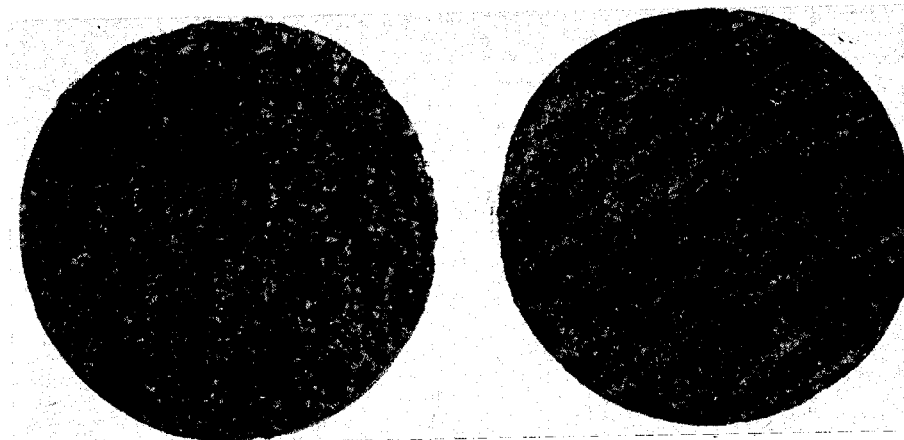
Для профилей с диаметром или стороной свыше 80 мм балл устанавливается соглашением сторон в зависимости от назначения стали. Для резбонарезных плашек, долбняков для зубчатых колес, протяжек и червячных фрез по требованию потребителя завод-поставщик обязан поставлять сталь по карбидной неоднородности с баллом не более 4,0 для профилей с диаметром или стороной 40—60 мм и с баллом не более 5,0 для профилей с диаметром или стороной свыше 60 и до 80 мм.

Шкала по карбидной неоднородности быстрорежущей стали, предусмотренная ГОСТ 5952—51, составлена на основании статистической обработки опытных данных по зависимости стойкости инструмента от структуры быстрорежущей стали в состоянии поставки. Для каждого размера поставляемых профилей установлены определенные нормы по карбидной неоднородности, которые нужно будет пересмотреть в случае изменения условия производства, позволяющие получать быстрорежущую сталь с пониженным баллом по карбидной неоднородности.

Стойкость инструмента тем выше, чем ниже балл по карбидной неоднородности. По данным Е. И. Малинкиной [2] наилучшими технологическими и эксплуатационными свойствами обладает быстрорежущая сталь с карбидной неоднородностью, соответствующей баллам 1—3.

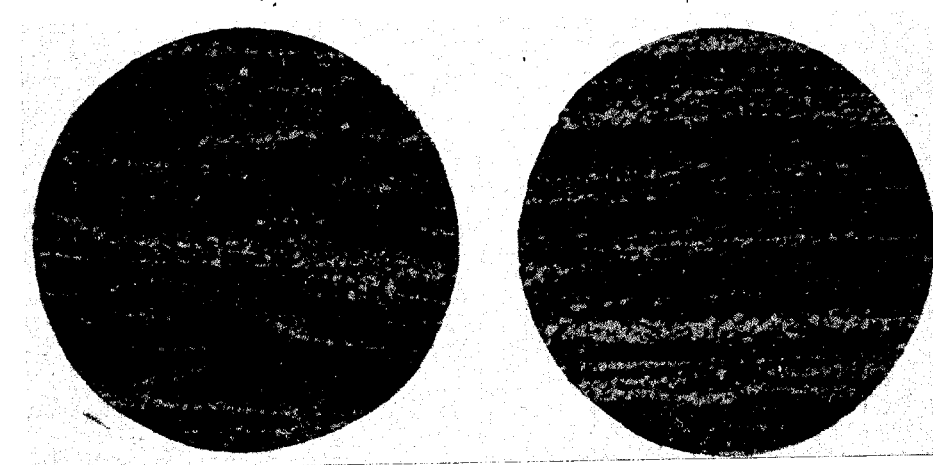
Справедливость требования заводов-потребителей по ужесточению норм по карбидной неоднородности быстрорежущей стали, нельзя еще считать доказанной, так как стойкость инструмента зависит не только от степени неоднородности структуры стали, но и от многих факторов технологии изготовления инструмента и условий его эксплуатации. Этот вопрос в настоящее время принимает актуальное значение и представляет собой одну из основных проблем металловедения [2, 3]. При существующей технологии литья, прокатки иковки быстрорежущей стали балл по карбидной неоднородности в готовом сорте колеблется в тех пределах, которые представлены на рис. 8.

Не менее важным показателем качества быстрорежущей стали является величина обезуглероженного слоя. Обезуглероженный



Балл 1

Балл 2



Балл 3

Балл 4



Балл 5



Балл 6



Балл 7



Балл 8



Балл 9



Балл 10

Рис. 7. Шкала карбидной неоднородности быстрорежущей стали (ГОСТ 5952—51)

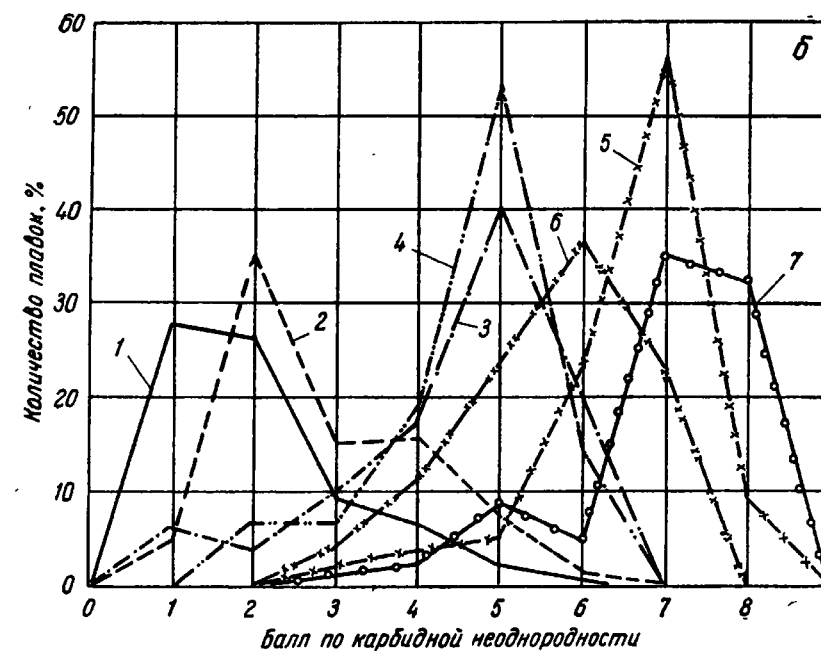
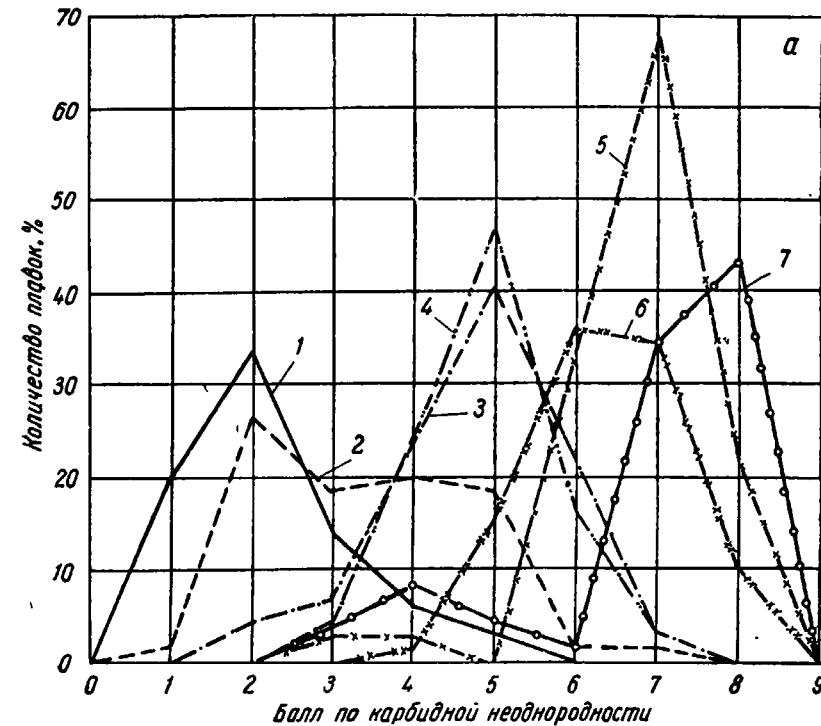


Рис. 8. Распределение плавок быстрорежущей стали марок Р18 (а) и Р9 (б) по карбидной неоднородности в зависимости от размера готовой продукции (по Г. С. Черняк):

1 — до 20 мм, катаный; 2 — до 40 мм, катаный; 3 — 41—60 мм, катаный;
4 — 41—60 мм, кованный; 5 — 61—80 мм, катаный; 6 — 61—80 мм, кованный;
7 — свыше 80 мм

слой (феррит + переходная зона) горячекатаной стали не должен превышать на сторону профиля норму, указанную в табл. 3.

Таблица 3
Допустимая глубина обезуглероженного слоя
для быстрорежущей стали

Размер стороны (диаметра) профиля мм	Глубина обезуглероженного слоя, мм стали марок	
	P18 и P9	P18M и P9M
От 5 до 15	0,40	0,45
Свыше 15—30	0,50	0,60
» 30—50	0,70	0,85
» 50—70	0,80	1,10
» 70—80	1,0	1,35
» 80—100	1,35	1,50

Из всех требований, предъявляемых к быстрорежущей стали, наиболее важными являются:

- 1) недопустимость глубоких поверхностных дефектов;
- 2) отсутствие внутренних разрывов в сечении штанг;
- 3) получение балла по карбидной неоднородности в соответствии с нормами ГОСТ 5952—51.

II. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ПО ОБРАБОТКЕ ДАВЛЕНИЕМ БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ

1. Пластичность и физическая сущность пластической деформации

Способность тела деформироваться без разрушения называется пластичностью. Пластичность металлов и сплавов — одно из главнейших их физических свойств, позволяющих придавать им различную форму, необходимую для технических целей.

Данные, характеризующие пластичность металла, используются при проектировании калибровки прокатных валков. Отсутствие этих сведений затрудняет решение следующих вопросов:

- а) выбор оптимальных обжатий и распределение их по пропускам;
- б) проектирование рациональных форм калибров;
- в) определение наивыгоднейших схем прокатки для данного профиля различных размеров.

До настоящего времени еще не имеется достаточно верных методов определения величины, характеризующей пластические свойства металлов и сплавов в условиях обработки их давлением. Особенно справедливо это замечание для малопластичных материалов [4].

В настоящее время пластичность металла определяют в горячем состоянии при различных температурах следующими методами:

- а) испытанием на растяжение до разрыва;
- б) испытанием ударной вязкости;
- в) испытанием на кручение;
- г) ковкой и загибкой проб, взятых во время плавки или разливки стали;
- д) испытанием осадкой с постоянной силой удара;
- е) испытанием на клин (метод Чижикова).

Наибольшее распространение получили первые четыре метода, их часто используют при плавочном контроле стали. Последние два метода пока применяют лишь в исследовательских работах.

Все эти методы испытаний позволяют определить следующие показатели, характеризующие пластичность металла и сплава.

Относительное удлинение, %, $\epsilon = \frac{\Delta l}{l} 100$, где Δl — удлинение образца; l — расчетная длина образца, мм.

Поперечное сжатие, %, $\psi = \frac{\omega_0 - \omega_1}{\omega_0} 100$, где ω_0 и ω_1 — сечение образца до и после разрыва.

Ударную вязкость, кгм/см^2 , a_k .

Число оборотов n до разрушения при скручивании.

Относительное обжатие, %, $u = \frac{H - h}{H} 100$, где H — толщина полосы до обжатия; h — толщина полосы после обжатия.

Чем выше значение показателей пластичности, тем материал пластичнее. Все металлы и сплавы, используемые в технике, можно разделить на хрупкие и пластичные.

Между этими противоположными состояниями металла могут быть и промежуточные: малопластичные, пониженной пластичности, средней пластичности, высокой пластичности [5].

Более 20 лет назад считали, что подвергать обработке давлением можно лишь те металлы и сплавы, которые относятся к группе, обладающей высокими пластическими свойствами. В связи с развитием теории пластической деформации представилось возможным обработать давлением не только пластичные, но и хрупкие металлы и сплавы. Так, например, белый чугун, характеризующийся присутствием, особенно в поверхностном слое, хрупкой составляющей цементита Fe_3C , по данным С. А. Баранова [6] в результате подбора соответствующей температуры нагрева и режимаковки деформировался без нарушения сплошности и сохранил после такой обработки свою твердость, стал пластичным и приобрел бархатистый излом. Или слитки быстрорежущей стали с ярко выраженной гетерогенной структурой при наличии хрупкой составляющей ледебуритной эвтектики в период освоения считали невозможным деформировать методом прокатки. В результате изменения условий деформации (формы калибров, степени обжатия, скорости деформации) и подбора оптимального режима нагрева оказалось возможным слитки весом до 750 кг прокатывать на блюминге без значительных потерь металла по рванинам.

Из этих примеров следует, что пластическое состояние металла нельзя считать неизменным, постоянным, раз и навсегда установившимся и зависящим только от его химического состава, способа выплавки, рафинировки и разливки. Оно может меняться или в сторону ухудшения или в сторону улучшения в зависимости от условий деформации металла.

Рассмотрим влияние этих условий на пластичность быстрорежущей стали, предварительно напомнив о физической сущности пластической деформации.

Металлы и сплавы представляют собой конгломерат кристаллитов, прочно соединенных между собой. Это соединение осуществляется связями электрического порядка (вследствие взаимо-

действия атомов соприкасающихся кристаллитов) и чисто механическим путем, вследствие того, что ветвь одного дендрита входит во впадины другого.

Чтобы деформировать тело пластически к его поверхности прикладывают внешнюю силу. Нормальная сила, в поликристаллическом теле вызывает касательные напряжения τ , под воздействием которых происходят перемещения внутри зерна по определенным для данной кристаллической решетки, плоскостям скольжения или перемещения кристаллитов одного относительно

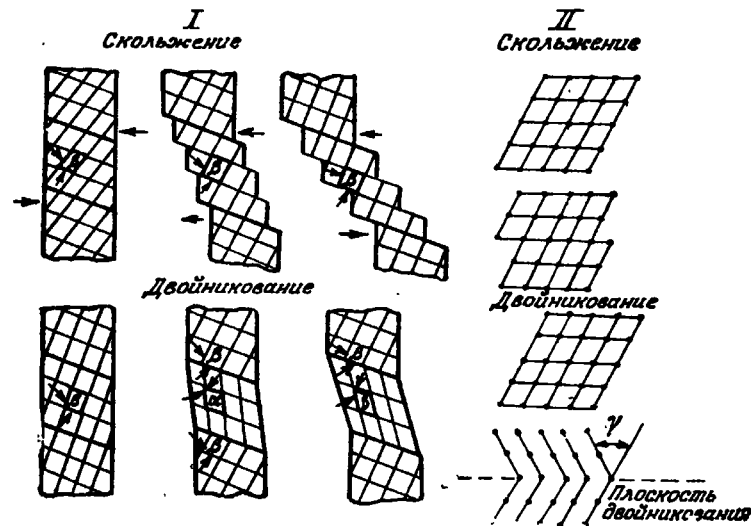


Рис. 9. Схема скольжения и двойникования (по Заксу)

другого. Для каждого металла или сплава в зависимости от их природных свойств имеется определенная величина касательных напряжений, при достижении которых происходят внутренние необратимые перемещения в кристаллитах по плоскостям скольжения (внутрикристаллитная деформация) или необратимое перемещение зерен одного относительно другого (межкристаллитная деформация). Такие необратимые перемещения приводят к необратимому изменению формы тела.

Одним из условий хорошей пластичности металла или сплава является более высокая прочность по границам зерен, чем по плоскостям скольжения. Если границы менее прочны, то происходит межкристаллитная деформация, и при сравнительно незначительной ее величине процесс пластической деформации прекращается и тело разрушается. Получаемый в этом случае излом называется интеркристаллитным. При значительном изменении

формы тела, если прочность зерен менее прочности межзеренных прослоек, может произойти так называемый транскристаллитный излом.

Необратимое изменение формы поликристалла может быть достигнуто также и за счет двойникования. Схематическое изображение скольжения и двойникования представлено на рис. 9. Считают, что двойникование приводит к разрушению гораздо скорее, чем скольжение.

Основной способ изменения формы металлического поликристалла — скольжение внутри кристаллитов.

При проектировании калибровки валков для прокатки быстрорежущей стали (особенно слитков), необходимо предусматривать и предупреждать межкристаллитную деформацию.

Знание влияния основных факторов на основные технологические свойства быстрорежущей стали является необходимым условием разработки такой технологии ее обработки давлением, которая могла бы обеспечить снижение брака по рванинам и внутренним трещинам.

2. Влияние различных факторов на пластичность и сопротивление деформации

Влияние химического состава стали на пластичность и сопротивление деформации

Химический состав быстрорежущей стали приведен в табл. 1. Из сталей двух марок, предусмотренных ГОСТ 5952—51, наиболее трудоемкой при термомеханической обработке и наиболее дорогостоящей является сталь марки P18, как имеющая повышенное содержание карбидообразующих химических элементов — вольфрама и ванадия.

Сопротивление деформации и пластичность быстрорежущей стали зависят от ее химического состава: чем больше углерода и карбидообразующих вольфрама и ванадия, тем затруднительнее становится прокатка. опытом установлено, что при содержании в стали (P18) углерода свыше 0,75% целесообразнее слитки не прокатывать, а ковать, особенно сталь, выплавленную в высокочастотных электрических печах. Весьма затруднительной становится обработка слитка прокаткой и в том случае, если быстрорежущая сталь загрязнена вредными примесями — серой, сурьмой, мышьяком и оловом.

По данным, опубликованным Я. С. Гинцбургом [8], быстрорежущая сталь без образования трещин катается только при содержании 0,09% As, 0,3% Cu и 0,0445% Sn. С увеличением содержания этих элементов сталь становится непластичной.

Для относительной оценки и сравнения пластичности и сопротивления деформации быстрорежущей стали с пластичностью и

сопротивлением деформации малоуглеродистой стали марки 15 были произведены механические испытания этих сталей при различных температурах [9].

Образцы для испытаний стали марки 15 изготавливали из прутков диаметром 18 мм, стали марки P9 и P18 — из заготовки сечением 80×80 мм. Сталь марки P9 подвергали отжигу по режиму: нагрев до 900°, выдержка 10 час., охлаждение с печью 6 час. до 650°, затем — на воздухе. Твердость после отжига составила 197 H_B (диаметр отпечатка — 4,3 мм). Сталь марки P18 отжигали по режиму: нагрев до 900°, выдержка 6 час., охлаждение с печью до 650°, затем — на воздухе. Твердость после отжига 269 H_B (диаметр отпечатка 3,7 мм).

Испытание на растяжение при различных температурах производили на разрывной машине с максимальным усилием 30 т при скорости растяжения 1,1 мм/мин. Диаметр образца для испытания на растяжение в горячем состоянии был равен 10 мм, а расчетная длина 50 мм.

Твердость в горячем состоянии определяли на прессе Бринеля. Образец диаметром 25—30 мм и высотой 30 мм нагревали в вертикальной цилиндрической печи до требуемой температуры и вместе с печью переносили на пресс.

Ударную вязкость определяли на образцах сечением 10×10 мм длиной 100 мм с надрезом. Их нагревали до требуемой температуры в муфельной печи, затем быстро переносили под маятниковый копер, имеющий запас работы 30 кгм. Расстояние между опорами копра равно 60 мм.

Все образцы стали марки 15 при испытании на ударную вязкость не разрушились, а согнулись, исключая испытания образца при температуре 500°. Образцы стали марки P18 при 20° не выдержали испытаний вследствие большой хрупкости.

Результаты испытаний сведены в табл. 4. Цифры, характеризующие механические свойства, являются средними из испытаний 2—4 образцов.

Данные механических испытаний при разных температурах стали марок P9, P18 и 15 показывают, что химический состав стали влияет на показатели сопротивления деформации (предел прочности σ_b , твердость H_B) и на показатели пластичности (относительное удлинение ϵ , поперечное сжатие ψ , ударная вязкость a_k).

Удлинение и поперечное сжатие быстрорежущей стали при высоких температурах испытаний значительно меньше, чем стали 15. При 1200° удлинение стали марок P9 и P18 меньше почти в два раза, чем стали 15 при той же температуре, а поперечное сжатие меньше на 30%.

Сопротивление деформации, судя по величине предела проч-

Таблица 4

Механические свойства стали марок 15, P9, P18

Температура испытания °C	марки стали									
	Предел прочности σ_B , кг/мм ²		Относительное удлинение ϵ , %		Относительное сужение ψ , %		Ударная вязкость a_K , кгм/см ²		Твердость HВ	
	15	P9	15	P9	15	P9	15	P9	15	P9
20	43,9	—	32,9	16,2	—	—	24,6	3,58	113	197,0
100	46,9	—	22,2	—	—	—	25,4	—	111	—
200	49,5	—	21,9	—	—	—	18,5	—	126	—
300	54,7	—	26,1	—	—	—	25,7	—	126	—
400	35,7	—	33,5	—	—	—	21,2	—	125	—
500	23,0	—	49,6	—	—	—	11,7	—	108	—
600	12,6	31,8	68,1	23,2	23,4	66,0	25,0	4,26	60	139,0
700	5,6	19,6	73,9	32,4	34,3	73,9	21,6	4,44	—	103,9
800	5,8	9,2	35,7	47,6	36,8	80,4	16,5	5,93	27	106,4
900	4,5	8,3	45,6	51,4	34,4	69,2	12,5	8,43	15	93,0
1000	2,8	5,7	51,6	52,9	51,1	66,5	10,2	11,56	11	88,7
1100	2,4	3,3	57,5	50,2	55,9	64,7	8,2	12,85	7	42,3
1200	1,4	2,1	65,1	33,2	37,5	69,2	6,8	13,33	—	24,8
1300	—	—	—	—	—	—	5,7	—	—	—

ности и твердости, у стали P18 оказалось в два-три раза больше, чем у стали 15. Сталь P18 обладает наилучшей пластичностью в интервале 900—1200°, а сталь P9 — в интервале 900—1150°.

Следует отметить, что при испытании стали марки 15 удлинение и сужение поперечного сечения при 800° резко падает. Снижение пластичности вызвано тем, что после перехода критической точки A_{c1} при 735° сталь имеет двухфазную структуру (аустенит + феррит). С дальнейшим повышением температуры в области аустенита удлинение и сужение поперечного сечения вновь растет. Удлинение образцов в области α -железа (700°) выше, чем в области аустенита (1200°).

Для полного представления о влиянии химического состава стали на пластические свойства стали и сопротивление деформации приводим данные испытаний на кручение.

Перед испытанием образец диаметром 8 мм и длиной 380 мм нагревали в муфельной печи до нужной температуры. После прогрева производили испытание, т. е. включали электромотор, и образец скручивался со скоростью 150 об/мин до излома. Число скручиваний на 360° замерялось счетчиком, установленным на крышке редуктора. Регулирование и контроль температуры в печи осуществлялись при помощи контактного гальванометра и термопары. На время испытаний термопару из печи вынимали. Результаты испытаний образцов на кручение приведены в табл. 5.

Таблица 5

Зависимость числа скручиваний от температуры нагрева стали марок 15 и P9

Температура испытания °C	Среднее число оборотов до разрушения стали		Средний крутящий момент, кгсм стали	
	15	P9	15	P9
500	10	—	558	—
600	19	—	363	—
700	48	—	259	—
800	60	—	180	—
900	107	24	167	358
1000	205	39	113	250
1100	212	28	88	145
1200	235	7	63	81
1300	237	2	75	63

Анализируя данные испытаний на кручение, можно обнаружить, что сталь марки P9 при 1200—1300° оказалась в области хрупкого состояния, так как среднее число оборотов до разру-

шения резко упало и снизился при этом средний крутящий момент. Это явление подтверждается данными микроанализа. При охлаждении в воде с 1200° микроструктура стали Р9 оказалась более грубозернистой, с укрупненными иглами мартенсита, с увеличенным размером зерна аустенита, так как количество карбидов значительно уменьшилось (перешли в твердый раствор).

Температурный интервал хорошей пластичности у стали марки 15 значительно больше, чем у стали марки Р9. Если при испытании стали марки 15 на скручивание среднее число оборотов до разрушения с повышением температуры до 1300° увеличивается, то у стали марки Р9, наоборот, оно значительно уменьшается.

Для перемещения внутри зерна по плоскостям скольжения или перемещения кристаллитов одного относительно другого требуется величина скалывающих напряжений в стали марки Р9 при $900\text{—}1100^{\circ}$ почти в два раза большая, чем в стали марки 15.

По числу скручиваний можно более точно судить о степени пластичности металла или сплава, чем по данным испытаний на растяжение.

Влияние температуры нагрева металла на пластичность и сопротивление деформации

Знание зависимости пластичности металла или сплава от температуры необходимо для установления технологии горячей обработки давлением, для подсчета усилий, возникающих при деформации. При горячей обработке давлением, как правило, пластические свойства металла выше, а сопротивление деформации ниже, чем при холодной обработке.

Было бы ошибочным утверждать, что у всех сплавов и сталей с повышением температуры пластичность повышается. У быстрорежущей стали (Р9 и Р18) имеется вполне определенный температурный интервал, в котором сталь обладает наибольшей пластичностью. Так для стали марки Р18 этот интервал установлен в пределах $900\text{—}1200^{\circ}$, а для стали марки Р9— $900\text{—}1150^{\circ}$.

Температурный интервал пластичности быстрорежущей стали весьма узок — $250\text{—}300^{\circ}$, поэтому прокатка или ковка этой стали представляет значительные трудности.

Нагрев быстрорежущей стали до критической точки A_{c1} ($800\text{—}850^{\circ}$) не сопровождается структурными изменениями. При переходе через критическую точку происходит превращение эвтектоида в аустенит. Дальнейший нагрев ведет к растворению во вновь образовавшемся аустените вторичных карбидов и насыщению аустенита углеродом и легирующими элементами.

С понижением температуры нагрева растворимость в аустените ванадия, вольфрама и хрома уменьшается, особенно резко —

вольфрама. Процесс растворения карбидов при этом замедляется. Карбиды вольфрама, хрома, ванадия, при одновременном увеличении твердости, придают стали хрупкость. Поэтому при температурах ниже 900° быстрорежущую сталь деформировать без нарушения сплошности почти невозможно. Необходимо отметить, что на растворимость карбидов влияет выдержка при $1150\text{—}1200^{\circ}$. Поэтому при нагреве слитков для прокатки выдержка при

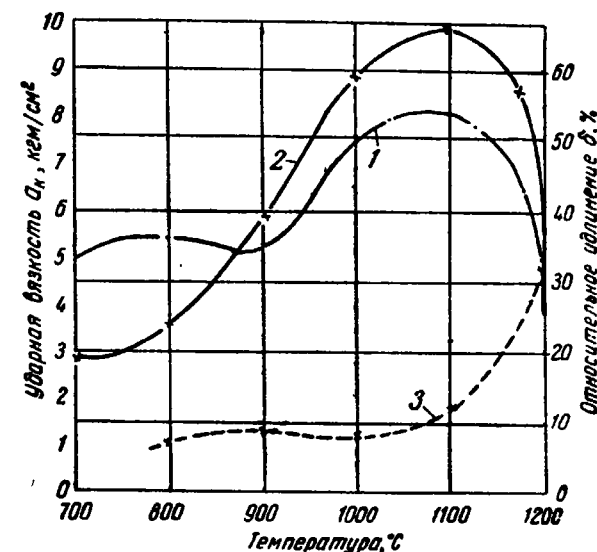


Рис. 10. Изменение относительного удлинения и ударной вязкости стали марки Р18 в зависимости от температуры:

1 — относительное удлинение деформированного образца; 2 — ударная вязкость того же образца; 3 — ударная вязкость недеформированного (литого) образца

высоких температурах должна составлять примерно около половины предусматриваемой продолжительности нагрева.

Увеличение выдержки при $1150\text{—}1200^{\circ}$ способствует растворению вторичных карбидов, но при этих температурах первичные карбиды в аустените не растворяются. Избыточные первичные карбиды препятствуют росту аустенитного зерна, поэтому быстрорежущая сталь не склонна к перегреву.

Нагрев стали марки Р18 выше 1280° ведет к значительному росту зерна, иногда к оплавлению ледебуритной эвтектики [10]. Ледебуритная эвтектика начинает плавиться при 1300° .

Практика подтверждает, что нагрев быстрорежущей стали марок Р9 и Р18 до температур, указанных выше, вполне обеспечивает удовлетворительную пластичность металла. Температура

конца прокатки для быстрорежущей стали должна быть не ниже 900° , так как при дальнейшем снижении ее резко повышается сопротивление деформации металла и снижаются его пластические свойства. В интервале $800\text{—}700^{\circ}$ предел прочности выше, чем при 900° , более чем в два раза, а ударная вязкость ниже почти в 1,5 раза (см. табл. 4).

Зависимость относительного удлинения и ударной вязкости быстрорежущей стали марки Р18 от температуры представлена для наглядности в графическом виде (по данным табл. 4). Данную зависимость (рис. 10) можно использовать при определении температурного интервала прокатки иковки этой стали.

Следует отметить, что при нагреве слитка требуется большая осторожность по сравнению с нагревом заготовки быстрорежущей стали, так как литая структура имеет большую склонность к пережогу, чем деформированная.

Влияние дробности деформации на пластичность

Большая работа по определению максимальной величины деформации при прокатке и выяснению влияния дробности деформации на пластичность различных металлов и сплавов проведена Ю. М. Чижиковым [5]. Он спроектировал валки с калибром переменного сечения для прокатки образца квадратного сечения (36×36 мм).

За показатель пластичности автор этого метода принял относительное обжатие. Максимальное относительное обжатие, при котором начинают появляться трещины (разрывы) на боковой поверхности прокатываемого образца, он назвал «пределом пластичности».

Полученные им результаты опытной прокатки на клин дают лишь частичное сравнительное представление о пределах пластичности металлов и сплавов в производственных условиях, так как структура и условия деформации образцов далеко не аналогичны структуре и условиям деформации слитков.

Опыты Ю. М. Чижикова показали, что при прокатке литого квадратного профиля при всех других равных условиях предел пластичности стали марки Р18 достигнут при обжатии 58%, сплава Х20Н80 — около 30%; предел пластичности ферритной стали фурудит не был достигнут при обжатии до 70%.

На основании этого по величине предела пластичности он отнес быстрорежущую сталь к материалам, обладающим средней пластичностью.

Образец литой (ледебуритной) быстрорежущей стали марки Р18 после прокатки на клин при 890° представлен на рис. 11.

Ю. М. Чижиков считает, что предел пластичности, т. е. суммарное обжатие, отвечающее началу нарушения сплошности в

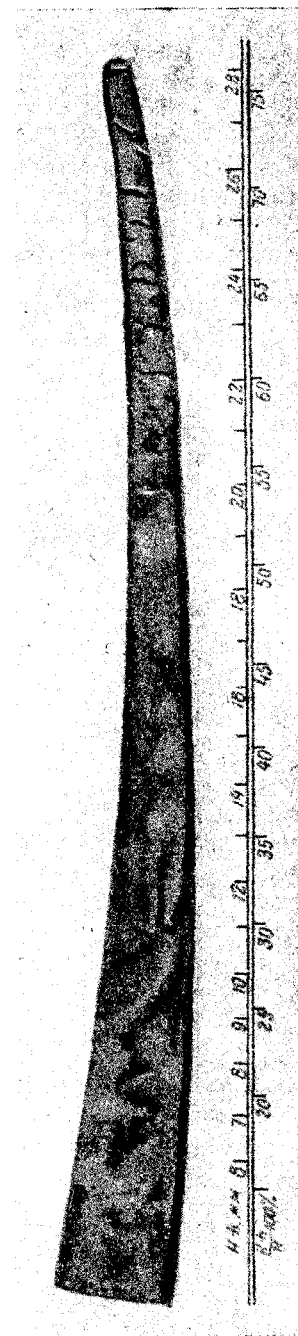


Рис. 11. Образец литой (ледебуритной) быстрорежущей стали марки Р18 после прокатки на клин при 890° . Предел пластичности достигнут при обжатии около 58%

данных условиях деформации, повидимому, не зависит от числа пропусков и режима обжатий по пропускам (от величины частных обжатий, их последовательного нарастания или уменьшения). Такое утверждение неверно, во-первых, потому, что напряженное состояние зависит от величины обжатия и, во-вторых, по мере деформации изменяется предел пластичности.

Практикой установлено, что предел пластичности быстрорежущей стали изменяется с изменением структуры. Совершенно не-

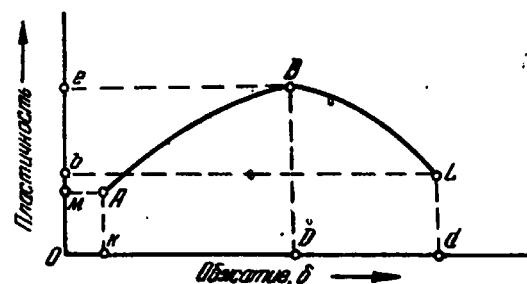


Рис. 12. Зависимость пластичности литого металла от степени суммарного обжатия $\frac{H-h}{H}$ (по А. А. Протасову)

допустимо прокатывать слитки быстрорежущей стали, имеющие литую структуру (ледебуритная эвтектика в виде сетки), с такими же обжатиями, которые используются при прокатке заготовки той же стали на сортовых станах. После изменения грубой, хрупкой литой структуры слитка ковкой или обработкой в обжимных станах дальнейшая прокатка заготовки быстрорежущей стали в ромбических калибрах при весьма неравномерных условиях деформации происходит без нарушения сплошности металла.

А. А. Протасовым [11] была предложена кривая, выражающая зависимость пластичности литого металла от степени его обжатия (рис. 12). Точка A соответствует степени обжатия δ_A в первом пропуске при минимальном пределе пластичности m , точка B — максимальной степени обжатия δ_B при максимальном пределе пластичности e и точка L — относительному обжатию δ_L , которое должно быть больше относительного обжатия δ_A и меньше или больше критической степени деформации для данной стали, но значительно меньше δ_B , т. е.

$$\delta_A < \delta_L < \delta_B.$$

Понижение пластичности в точке L связано с падением температуры металла в процессе прокатки. Для пластичных сталей

максимальная степень обжатия δ_B принимается с учетом предельного угла захвата, прочности валков и мощности двигателя.

По практическим данным для быстрорежущей стали с уменьшением веса слитка можно безопасно увеличить δ_A до 15% и δ_L — до 20%.

Чтобы доказать, что в результате обработки давлением механические свойства изменяются с изменением структуры, приводим неопубликованные данные испытаний быстрорежущей стали марки P18 на удар при разных температурах¹ (табл. 6). Образцы были изготовлены из диска, вырезанного из-под прибыльной части слитка круглого сечения весом 50 кг, и из полосы сечением 40 × 80 мм.

Таблица 6

Зависимость ударной вязкости от температуры быстрорежущей стали марки P18 в литом и деформированном состоянии

Состояние структуры стали	Ударная вязкость a_k , кал/см ² при температуре испытаний, °C					
	800	900	1000	1100	1150	1200
Литая	1,01	1,26	1,17	1,77	1,26	4,74
Деформированная	4,98	7,52	7,22	7,81	11,72	9,84

Из данных табл. 6 следует, что при температурах испытаний на удар деформированная структура стали марки P18 оказалась более пластичной, чем в литом состоянии. Поэтому на практике обжатия при прокатке слитков принимают значительно меньшие, чем при прокатке заготовки.

Влияние скорости деформации на пластичность и сопротивление деформации

Если при горячей деформации пластичного металла влияние скорости деформации не учитывают, так как она не вносит затруднений в выборе основных параметров калибровки валков, то при прокатке малопластичной быстрорежущей стали, наоборот, влияние скорости деформации значительно.

Увеличение скорости деформации металла сопровождается увеличением сопротивления его деформации и резким снижением пластичности стали.

¹ Испытания проведены инж. М. Я. Дзугутовым.

Средняя скорость деформации определяется по формуле [12]:

$$u_{\text{ср}} = \frac{v_1 l}{r H_0},$$

где $u_{\text{ср}}$ — средняя скорость деформации, 1/сек;
 v_1 — скорость выхода металла из валков, мм/сек;
 H_0 — высота сечения металла при входе в валки, мм;
 r — радиус валка, мм;
 l — горизонтальная проекция дуги захвата, мм.

Известно, что с увеличением скорости деформации быстрорежущей стали увеличивается сопротивление деформации металла. Справедливость этого положения подтверждается данными динамического сопротивления деформации быстрорежущей стали [8] и испытанием этого же металла при растяжении со скоростью 1,1 мм/мин (табл. 7).

Таблица 7

Зависимость сопротивления деформации от температуры и скорости деформации

Условия деформации	Предел прочности σ_B , кг/мм ² при температуре испытаний, °С								
	700	750	800	850	900	950	1000	1050	1100
Динамические	63	60	57,3	47,0	43,5	40	36	31,5	28,5
Статические . .	22,6	—	11,4	—	11,0	—	6,8	—	3,2

Динамическим испытаниям подвергали образцы из быстрорежущей стали следующего химического состава: 0,71% С; 4,49% Cr; 21,48% W. Химический состав стали образцов для испытания на растяжение со скоростью 1,1 мм/мин несколько иной, а именно: 0,72% С; 4,24% Cr; 18,17% W; 1,14% V. Различие в химическом составе образцов незначительно.

Данные испытаний показывают, что сопротивление деформации быстрорежущей стали при динамических испытаниях значительно выше, чем при статических.

Учитывая, что сопротивление деформации с увеличением скорости деформации металла повышается, при прокатке слитков быстрорежущей стали на обжимных станах рекомендуется снижать число оборотов валков.

На стане 600 одного из заводов число оборотов валков в минуту при прокатке быстрорежущей стали, как правило, снижают до 50, вместо 70, которые обычно применяют при прокатке других сталей. Этим достигается улучшение условий захвата металла

валками, получение чистой поверхности полосы без рванин и уменьшение мощности, потребной для деформации. При прокатке заготовки быстрорежущей стали на среднесортных и мелкосортных станах число оборотов валков также ниже, чем при прокатке сталей других марок.

Истинных причин увеличения сопротивления деформации с повышением скорости деформации металла пока вскрыть не удалось. По этому вопросу существуют только гипотезы. Нет еще вполне достоверных формул для определения зависимости сопротивления деформации от скорости деформации.

Влияние скорости на сопротивление деформации можно объяснить тем, что скорость рекристаллизации и отдыха у быстрорежущей стали при динамическом испытании меньше скорости деформации. Поэтому процесс рекристаллизации или отдыха не успевает проходить во время деформации и металл в силу этого при динамических испытаниях проявляет большее сопротивление деформации, чем при статических. В холодном состоянии влияние скорости деформации на сопротивление деформации весьма незначительно, так как процессы разупрочнения стали протекают с очень малыми скоростями.

Влияние структуры быстрорежущей стали на пластичность

Присутствие в литой структуре слитка нераздробленной ледебуритной сетки придает быстрорежущей стали высокую хрупкость даже при температуре прокатки. Это объясняется тем, что растворение карбидов и при высоких температурах протекает крайне медленно.

Карбиды в быстрорежущей стали по весу составляют около 30%. При нагревании до 1300° нерастворимых карбидов в ней остается не более 10% [13].

Карбиды вольфрама, хрома и железа придают стали особенно сильную хрупкость в том случае, когда они неравномерно распределены по объему металла и ледебуритная сетка имеет большую толщину.

Для получения относительно тонкой ледебуритной сетки разливку быстрорежущей стали, идущей под прокатку, производят в слитки небольшого веса — 100—300 кг.

Слитки увеличенного веса (до 1000 кг) могут быть использованы только с предварительной ковкой до квадратной заготовки сечением 160—180 мм с последующей прокаткой на готовую продукцию [14].

Опытная прокатка, проведенная Ю. М. Чижиковым на обжимном реверсивном стане 800 слитка стали марки Р18 весом 1000 кг не увенчалась успехом. Результаты прокатки слитка стали марки Р9 того же веса оказались несколько лучшими.

Причина неудовлетворительных результатов при прокатке слитка стали марки Р18 весом 1000 кг кроется в основном в крупнозернистости, большой карбидной ликвации и большой толщине эвтектической карбидной сетки.

Лучшие показатели, полученные при прокатке слитка весом 1000 кг стали марки Р9, можно объяснить повышенной пластичностью по сравнению со сталью марки Р18, меньшей чувствительностью к перегреву и более однородной структурой.

Надо полагать, что пластичность быстрорежущей стали в укрупненных слитках металлургами будет достигнута за счет реализации средств, обеспечивающих получение относительно однородной структуры с мелким зерном и тонкой ледебуритной сеткой. В этом направлении ведутся интересные работы с применением метода выплавки быстрорежущей стали непосредственно в изложнице [15].

Микроструктура заготовки быстрорежущей стали, в отличие от слитка, не имеет ярко выраженной гетерогенной структуры.

При прокатке слитка на заготовку в результате деформации карбидная неоднородность значительно снижается, а толщина ледебуритной сетки уменьшается. Более однородная структура заготовки, относительно меньшая толщина ледебуритной сетки, по сравнению со слитком, дают возможность производить прокатку заготовки на другие профили с увеличенными обжатиями, не опасаясь образования поверхностных рванин. В отдельных пропусках при прокатке квадрата сечением 40×40 мм из заготовки сечением 83×83 мм без ухудшения качества металла используют обжатия до 50%.

Если прокатка слитка весом 200 кг стали марки Р18 до квадрата сечением 83×83 мм производится с двумя обязательными промежуточными подогревами, то прокатка заготовки сечением 83×83 мм до круга или квадрата размером 15 мм и более производится без промежуточных подогревов, хотя и с достаточно интенсивными обжатиями, при которых полоса не только не остывает, но даже разогревается.

Теплопроводность λ ковальной и отоженной заготовки быстрорежущей стали в 2 раза больше, чем литой неотожженной стали. Если теплопроводность слитка быстрорежущей стали составляет $12 \text{ кал/см} \cdot \text{сек} \cdot ^\circ\text{C}$, то теплопроводность заготовки — $23,5 \text{ кал/см} \cdot \text{сек} \cdot ^\circ\text{C}$. Поэтому заготовку нагревают более форсированно по сравнению со слитком. Если заготовку стали марки Р18 перед прокаткой нагревают до 1200° со скоростью 35 мм/час, то слиток весом 200 кг стали той же марки нагревают до той же температуры со скоростью 25 мм/час. При таком форсированном нагреве заготовки не было ни одного случая разрушения ее, тогда как при больших скоростях нагрева слитки быстрорежущей стали разрушаются, издавая при этом звук лопнувшей струны.

Влияние характера напряженного состояния на пластичность и сопротивление деформации

При прокатке металл находится в условиях объемного напряженного состояния.

Объемно напряженное состояние тела при прокатке вызывается следующими факторами:

- а) силами трения, действующими на поверхности контакта;
- б) активным действием давления валков на металл;
- в) формой калибра;
- г) формой деформируемого тела;
- д) остаточными напряжениями, имеющимися в теле до начала деформации.

При проектировании калибровки валков для прокатки малопластичного металла необходимо предусматривать такие условия объемно напряженного состояния металла, при которых схема напряженного состояния деформируемого тела соответствовала бы трехосному сжатию.

Наиболее опасными для металла являются растягивающие напряжения, так как при воздействии их возникают нарушения сплошности металла. Поэтому в разноименной схеме объемно напряженного состояния, которое имеет место в отдельных частях деформируемого тела, величина растягивающих напряжений должна быть доведена до минимума.

Современный уровень знаний теории пластической деформации не позволяет точно определить значения напряжений в деформируемом теле. Если и была бы возможность вычислить точно величину действующих напряжений в пластически деформируемом металле, то и при этих условиях возникли бы затруднения при решении производственных задач ввиду отсутствия допускаемых величин, сопротивлений пластической деформации стали каждой марки и сплава. На основании этого влияние характера напряженного состояния металла при его деформации на пластичность металла нами рассматривается лишь с качественной стороны.

Для определения влияния характера напряженного состояния металла при деформации на его пластичность необходимо знать изменения схемы деформации металла при различных соотношениях главных напряжений. Возможные схемы деформации [16] указаны на рис. 13.

При деформации тела различают два основных вида напряжений:

- 1) главные нормальные напряжения: σ_1 , σ_2 и σ_3 , где $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$;
- 2) главные сдвигающие напряжения, называемые максимальными сдвигающими напряжениями: τ_1 , τ_2 и τ_3 .

По четвертой теории предельного состояния, наиболее правдоподобной, пластическая деформация начинается тогда, когда в деформируемом теле накопится определенное количество потенциальной энергии упругой деформации, направленной на измене-

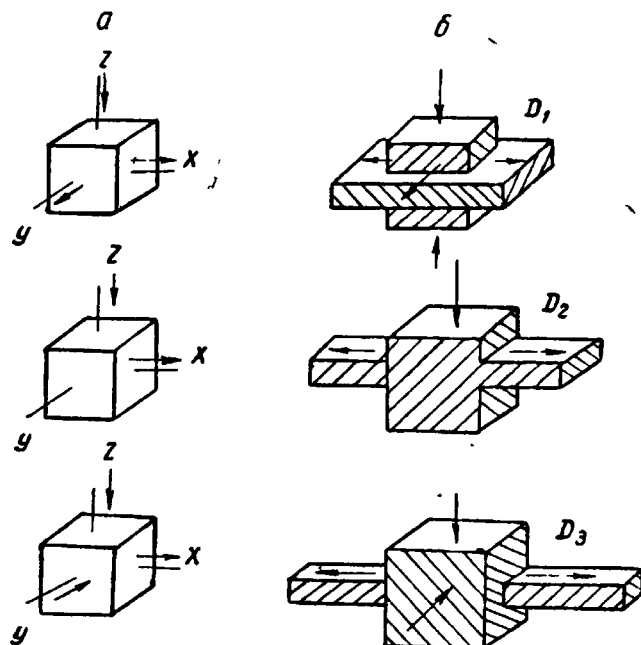


Рис. 13. Схемы деформации (а) и наглядное представление о них (б)

ние формы тела. Энергетическое условие пластичности по четвертой теории предельного состояния для главных осей определяется уравнением:

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 = 2\sigma_s^2, \quad (1)$$

где σ_s — сопротивление деформации при линейном напряженном состоянии (часто приравнивается пределу текучести).

Это уравнение при $\sigma_2 = \sigma_3$ и $\sigma_2 = \sigma_1$ принимает более простой вид

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_s.$$

При $\sigma_2 = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$ уравнение (1) примет вид

$$\sigma_1 - \sigma_3 = 1,15\sigma_s.$$

В общем виде при изменении σ_2 от σ_3 до σ_1 можно написать:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \beta\sigma_s, \quad (2)$$

где β — коэффициент, изменяющийся от 1 до 1,15.

Необходимо отметить, что деформация металла будет больше в направлении оси минимального напряжения.

При равенстве напряжений $\sigma_2 = \sigma_3$ деформация в направлении их осей должна очевидно быть одинакова. Этот случай соответствует схеме деформации, когда металл поступает по одной оси и уходит по двум другим осям. Такая схема деформации для прокатки малопластичных сталей и сплавов, в том числе и быстрорежущей стали, не пригодна, как не обеспечивающая роста отношения напряжений $\frac{\sigma_2}{\sigma_1}$ и $\frac{\sigma_3}{\sigma_1}$.

С увеличением отношения напряжений $\frac{\sigma_2}{\sigma_1}$ и $\frac{\sigma_3}{\sigma_1}$ создаются условия минимальной межкристаллитной деформации [16]. Чем резче выражена схема объемного сжатия, тем выше отношение $\frac{\sigma_2}{\sigma_1}$ и тем для малопластичного металла создаются лучшие условия деформации, при которых уменьшается вероятность образования рванин на поверхности металла, главным образом по кромкам полосы.

Для обеспечения таких условий требуется увеличить среднее напряжение σ_2 , что достигается прокаткой металла с ограниченным уширением или с уширением, равным нулю. В последнем случае деформация металла происходит по схеме, когда металл приходит по одной оси, а уходит по другой, а по третьей оси перемещение металла отсутствует. Такая схема деформации для прокатки быстрорежущей стали, особенно слитков, считается вполне приемлемой, так как в этих условиях наиболее вероятна прокатка без нарушения сплошности металла.

Неоднократные производственные опыты подтверждают наличие растягивающих напряжений на кромках при прокатке металла со свободным уширением. Растягивающие напряжения в этом случае появляются вследствие неравномерного распределения поперечных напряжений [17]. При наличии уширения отдельные части металла деформируются в условиях разноименной схемы напряженного состояния, когда по двум осям действуют напряжения сжатия, а по третьей — напряжения растяжения. Последние уменьшают пластичность металла и, следовательно, малопластичные стали рекомендуется прокатывать без уширения.

Из изложенного выше следует основное правило проектирования форм калибров для прокатки малопластичных сталей и сплавов, в том числе и быстрорежущей стали: форма калибров по возможности должна отвечать условиям одноименной схемы сжи-

мающих напряжений, т. е. следует проектировать калибры с ограниченным уширением, или совсем без него, или даже с отрицательным уширением. Прокатки с отрицательным уширением можно достичь при высотно-поперечном обжатии. В настоящее время мы можем осуществлять прокатку только с ограниченным уширением.

При одноименной схеме главных напряжений величина сопротивления деформации будет больше, чем при разноименной схеме.

Это вполне очевидно из уравнений (2):

$$\left. \begin{aligned} \tau_{\text{одн}} &= \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \sin 2\alpha; \\ \tau_{\text{разн}} &= \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \sin 2\alpha. \end{aligned} \right\} \quad (2a)$$

Как видно из уравнений (2), чтобы получить одну и ту же величину сдвигающего напряжения, необходимого для пластической деформации, напряжение при одноименной схеме сжатия должно быть больше такого же напряжения при разноименной схеме.

Итак при разноименной схеме напряженного состояния, хотя сопротивление деформации меньше по сравнению с одноименной, но зато хуже пластичность металла.

Опытные заводские данные, а также данные многих специальных исследований советских ученых (С. И. Губкин, И. М. Павлов и др.) за последние двадцать лет позволили вывести правило выбора условий деформации металла при его обработке давлением в зависимости от степени пластичности металла. Это правило формулируется следующим образом.

При обработке давлением металлов и сплавов, обладающих пониженной пластичностью, необходимо создавать такие условия деформации, при которых увеличивалось бы сопротивление металла сжатию. В тех же случаях, когда пластические свойства металла при данной температуре и скорости деформации достаточно высоки, можно идти на всемерное понижение сопротивления деформации металла за счет облегчения условий напряженного состояния. Чем резче выражена схема объемного сжатия, тем выше пластичность металла.

В заключение следует отметить, что при деформации дорогостоящего малопластичного металла в условиях резко выраженной схемы объемного сжатия уменьшаются потери от брака по равнину, но зато увеличивается расход электроэнергии и валков на одну тонну проката. При прокатке такого металла экономичнее идти по пути удорожания передела за счет увеличения расхода энергии и валков на тонну годного проката, но повышать при этом

выход годного металла, так как в себестоимости металл является главным слагаемым, стоимость которого составляет 90—92% от общей стоимости годного металла.

3. Опытное определение сопротивления деформации

Знание удельного давления p позволяет решать значительное количество вопросов, как то: определять расход энергии, подсчитывать упругие деформации деталей прокатной клети, знать износ валков, рассчитывать прочность детали прокатного стана. Данные о характере распределения удельного давления по дуге захвата позволяют определить положение равнодействующей элементарных сил давлением и, таким образом, найти моменты, которые следует приложить к валкам для их вращения.

Таким образом удельное давление металла на валок необходимо знать как калибровщику, так и конструктору, проектирующему прокатный стан.

Удельное сопротивление пластической деформации металла, или то же, что и удельное давление металла на валок p , зависит от многих факторов.

Сложная зависимость удельного давления от большого числа факторов затрудняет определение удельного давления аналитическим методом. Поэтому нами была проведена опытная работа по определению истинного удельного давления при прокатке слитков быстрорежущей стали на обжимном стане трио 600 и этой же стали на стане доппель-дуо 300. Кроме того для сравнения удельное давление было определено расчетным путем по формуле А. И. Целикова.

Удельное давление при прокатке быстрорежущей стали на стане 300¹

Исследование проводили на стане доппель-дуо 300 с длиной бочки 600 мм. Валки чугунные с закаленной поверхностью. Привод от отдельного электромотора с установкой Кремера, ток трехфазный напряжением 3000 в. Мощность мотора 1000 л. с., число оборотов мотора в минуту 150—300. Маховик мотора диаметром 3,2 м, весом 18 т. Окружная скорость валков в период испытаний 4,5 м/сек.

Для определения давления металла на валок использовали мессдозы индуктивного типа, которые устанавливали между нажимными винтами и подушками.

¹ Работа по определению давления металла на валок при прокатке на стане 300 стали марки Р18 проводилась в 1946 г. под руководством канд. техн. наук Н. И. Сведе-Швец, который непосредственно занимался изготовлением мессдоз и составлением схемы установки [18].

В данном исследовании были использованы двухшлейфовый осциллограф и стабилизатор напряжения.

Двухшлейфовый осциллограф (рис. 14) оснащен: пленочной кассетой 14, вмещающей до 50 м фотобумажной ленты шириной 120 мм для записи процесса, токовым шлейфом 9 типа В-6 чувствительностью в 5 мА при собственной частоте колебаний 1200 Гц,

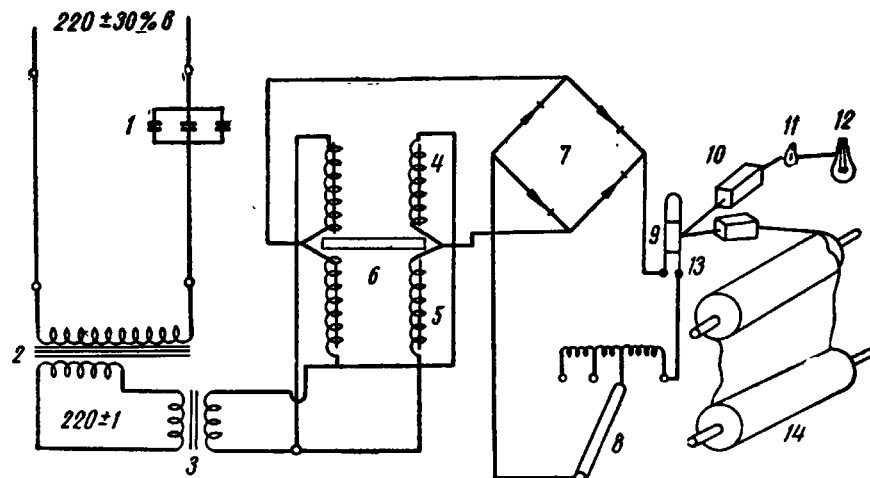


Рис. 14. Схема установки по определению давления металла на валки: 1 — блок конденсаторов на 14 мкФ (μF); 2 — трансформатор стабилизатора; 3 — понижающий трансформатор 220/12 В; 4 — верхняя пара катушек мессдозы; 5 — нижняя пара катушек; 6 — железный сердечник; 7 — купроксный мостик Гретца; 8 — магазин сопротивлений к осциллографу; 9 — шлейф токового миллиамперметра; 10 — линза осциллографа; 11 — щелевой затвор осциллографа; 12 — источник света; 13 — линза; 14 — пленочная кассета с фотобумагой

шлейфом типа В-7 чувствительностью в 2 мА при собственной частоте колебаний 800 Гц, отметчиком времени на 50—360 Гц.

Две мессдозы индуктивного типа состоят из двух стальных стаканов, непосредственно воспринимающих нагрузки в области упругих деформаций.

В стаканы вмонтированы индуктивные датчики, состоящие из четырех катушек 4 и 5 с железными сердечниками, включенных по схеме индуктивного мостика. Между катушками помещен железный сердечник 6, который при сжатиях мессдозы отходит от верхней пары катушек к нижней на сотые доли миллиметра и тем самым, нарушая равновесие индуктивного мостика, обеспечивает возникновение электродвижущей силы на диагонали мостика.

Токовый шлейф осциллографа, будучи включен в диагональ индуктивного мостика, отмечает изменения электродвижущей силы. Мессдозы проградуированы под прессом. Разница в пока-

заниях при нагрузке и разгрузке не превышает 1% от максимального показания шкалы токового миллиамперметра.

Первичная обмотка трансформатора 2 стабилизатора напряжения настроена с последовательно включенной емкостью 1 в феррорезонанс. Стабилизатор напряжения обеспечивает питание мессдоз стабилизированным переменным током в 50 Гц. Стабилизатор при колебаниях напряжения в сети переменного тока $\pm 30\%$ дает на выходе колебание напряжения $\pm 1\%$. Индуктивные датчики мессдоз питаются током 12 В. Для записи на ос-

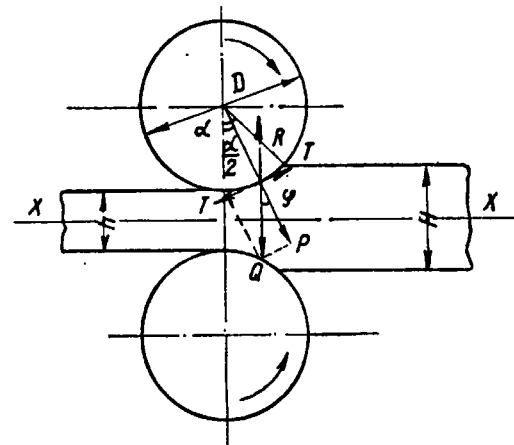


Рис. 15. Схема действия сил при прокатке

циллографе пульсирующего тока в выходную цепь включен купроксный мостик Гретца.

Вертикальную силу R определяли с помощью мессдоз и, пользуясь простейшими преобразованиями, исходя из схемы действия сил, указанной на рис. 15, находили среднее удельное давление:

$$P = Q \cos \varphi = R \cos \varphi.$$

$$\text{Так как } \varphi = 0,5 \alpha, \text{ то } P = R \cos \frac{\alpha}{2}.$$

С другой стороны,

$$P = p_{\text{ср}} S,$$

где S — проекция контактной поверхности на плоскость хорды дуги захвата. Ее можно найти по формуле

$$S = \frac{B_1 + B_2}{2} \sqrt{r_p (H - h)}.$$

Тогда

$$p_{\text{ср}} = \frac{P}{b_{\text{ср}} D \sin \frac{\alpha}{2}} = \frac{R \cos \frac{\alpha}{2}}{b_{\text{ср}} D \sin \frac{\alpha}{2}}; \quad p_{\text{ср}} = \frac{R}{b_{\text{ср}} D} \cotg \frac{\alpha}{2}. \quad (3)$$

Формула (3) выведена без учета опережения, и принято, что давление по дуге захвата распределено равномерно или симметрично. Давление металла на валок определялось указанным

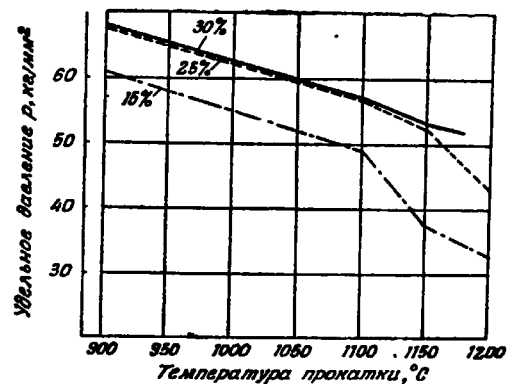


Рис. 16. Зависимость удельного давления от температуры и обжатия при прокатке стали марки Р18 на стали 300

методом при прокатке заготовки $20 \times 25 \times 500$ мм на гладкой бочке при 1200, 1150, 1100, 1000 и 900° и обжатиях 15, 25, 35 и 45%. Зависимость удельных давлений при горячей прокатке стали марки Р18 от степени деформации и температуры прокатки представлена на рис. 16 и 17.

Анализ полученных данных дает возможность сделать следующие выводы.

1. С увеличением степени деформации удельные давления при всех температурах растут до некоторого предела (25—30%), при дальнейшем росте деформации повышения давления почти не наблюдается.

2. С понижением температуры прокатки от 1200 до 900° удельные давления плавно увеличиваются, причем наибольший их рост отвечает низким степеням деформации (табл. 8).

3. Абсолютное удельное давление при деформации в 30%, т. е. при отношении $\frac{b}{h} = 1,25$ и $\frac{h}{D} 100 = 4,7\%$ и при скорости

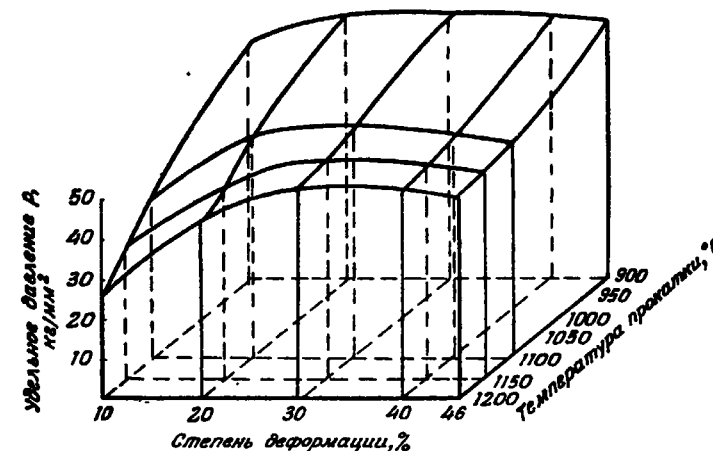


Рис. 17. Зависимость удельных давлений при горячей прокатке стали марки Р18 от степени деформации и температуры прокатки [18]

Таблица 8

Зависимость удельного давления от температуры прокатки и степени деформации быстрорежущей стали марки Р18

Степень деформации %	Удельное давление, кг/мм² при температуре, °C		Примерное повышение удельного давления при 900° по сравнению с удельным давлением при 1200° %
	900	1200	
15	61,0	32,5	100
20	65,0	37,0	75
25	68,0	42,5	60
30	68,0	51,0	35

прокатки 4,5 м/сек в интервале 1200—900° принимает для стали марки Р18 значения в пределах 50—70 кг/мм².

Удельное давление при прокатке слитков быстрорежущей стали на обжимном стане трио 600¹

Давление металла на валки при прокатке слитков быстрорежущей стали на стане трио 600 определяли тем же методом,

¹ Работу по измерению давлений металла на валок при прокатке слитков быстрорежущей стали марки Р18 проводили сотрудники лаборатории № 42 ЦНИИЧМ инж. В. А. Енина, инж. В. В. Маркелов, техник В. Н. Шашков при участии инж. А. А. Протасова.

что и на стане 300. Условия прокатки слитка стали марки Р18 были несколько иные, чем у образцов, прокатанных на стане 300.

Слиток прокатывали до требуемого квадрата (85×85 мм) с двумя промежуточными подогревами после пропуска через третий и шестой калибры¹.

Стан 600 приводится в действие через редуктор электромотором (1200 л. с.) трехфазного тока напряжением 3000 в с установкой Кримера. Число оборотов мотора в минуту 300—600. Маховик диаметром 8,0 м весом 70 т. Передаточное число 1:8. Таким образом прокатку можно производить при 37,5—75 об/мин. Калибровка валков указана на рис. 49. Валки изготовлены из ковanej стали марки 40ХН. Скорость прокатки 1,245 м/сек.

Среднее удельное давление металла на валок определяли по формуле (3).

Размеры прокатываемых слитков весом 200 кг приведены в табл. 21. Результаты измерения давлений на валки при прокатке быстрорежущей стали марки Р18 приведены в табл. 9.

Таблица 9

Давление на валки при прокатке слитков быстрорежущей стали марки Р18

№ пропуска	Форма калибра	Размер калибра мм	$\frac{\Delta h}{h} 100$ %	Давление на валки	
				полное т	среднее удельное кг/мм²
2	Ящичный	235×155	18,4	262	12,9
6	»	170×155	18,4	265	13,6
8	»	140×133	20,8	210	14,8
12	Черновой круг	130	8,5	142	10,5
14	То же	120	8,2	177	15,8
16	» »	110	9,9	206	19,8
18	» »	100	10,7	185	16,9
22	Квадратный	85×85	—	192	17,7

Примечания: 1. Полное давление является средним из шести измерений при прокатке шести слитков.
2. Температура начала прокатки 1200°; температура конца прокатки 930°.

Как видно из данных табл. 9, сопротивление деформации при прокатке стали из стали марки Р18 ниже по сравнению с той же маркой стали, но прокатанной на стане 300 из полосы $20 \times 25 \times 500$ мм. Это объясняется тем, что отношение толщины слитка к диаметру валков стана 600 больше, чем отношение толщины полосы к диаметру валков стана 300, а именно: в первом случае

¹ Слиток прокатывали по калибровке № 4 (см. стр. 111) по схеме, указанной в табл. 22.

$\frac{h}{D} = 0,383$, а во втором $\frac{h}{D} = 0,067$. Известно, что с уменьшением отношения $\frac{h}{D}$ сильнее сказывается влияние внешнего трения и по-

этому удельное давление повышается. Кроме того, при прокатке деформированной быстрорежущей стали ее сопротивление деформации должно быть больше литой, так как первая имеет более мелкое зерно.

Для сравнения сопротивления деформации стали марки Р18 с сопротивлением деформации нержавеющей и углеродистой стали в табл. 10 приведены соответствующие данные.

Таблица 10

Удельное давление сталей

Сталь	Среднее удельное давление, кг/мм²	
	минимальное	максимальное
Быстрорежущая марки Р18*:		
слитки	10,5	19,8
полоса	50,0	70,0
Нержавеющая**	7,9	10,4
Углеродистая (0,1% С)**	3,8	8,1

* Слитки весом 200 кг прокатывали на стане 600, полосу 20×25 мм — на стане 300.

** Слитки сечением 250×250 мм прокатывали на блюме сечением 160×160 мм на блюминге дуо с диаметром валков 850 мм.

Из данных табл. 10 следует, что быстрорежущая сталь марки Р18 относится к труднодеформируемому металлу. Ее сопротивление деформации во много раз больше, чем сопротивление деформации других сталей.

Расчет удельного давления по формуле Целикова

Следует отметить, что замер давлений металла на валок дает более надежные и точные данные, чем расчет по формулам, с помощью которых при наличии большого числа факторов прокатки нельзя их точно учесть. Для расчета среднего удельного давления одной из наиболее надежных является формула А. И. Целикова [19]:

$$p_{\text{ср}} = K \frac{2(1-\varepsilon)}{\varepsilon(8-1)} \left(\frac{H_1}{h} \right) \left[\left(\frac{H_1}{h} \right)^8 - 1 \right], \quad (4)$$

где H_T — высота прокатываемого металла в нейтральном сечении, мм;

ϵ — отношение абсолютного обжатия к начальной высоте;

$$\delta = f \sqrt{\frac{2D}{\Delta h}};$$

$$\phi K = 1,15 \sigma_s.$$

Высоту металла в нейтральном сечении определяют по формуле

$$\frac{H_T}{h} = \left[\frac{1 + \sqrt{1 + (\delta^2 - 1) \left(\frac{H}{h} \right)^\delta}}{\delta + 1} \right]^{\frac{1}{\delta}}. \quad (5)$$

Для упрощения решения уравнений (4) и (5) А. И. Целиков рекомендует пользоваться диаграммой (рис. 18), разработанной

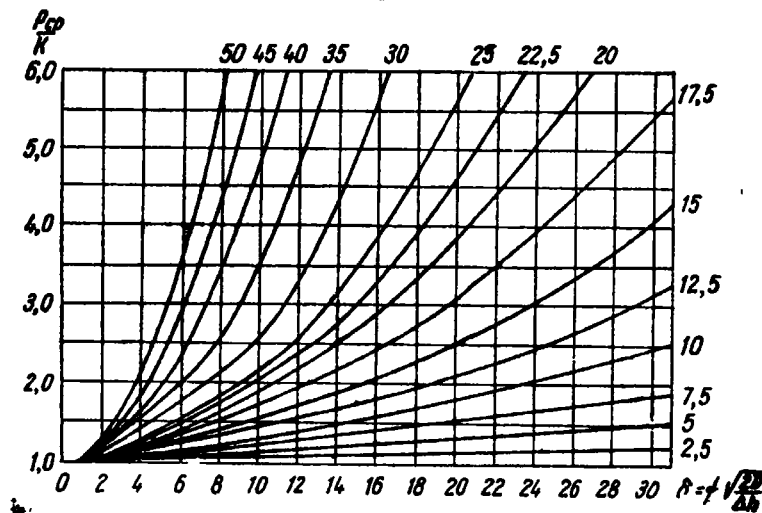


Рис. 18. Изменение отношения $\frac{P_{ср}}{K}$ в зависимости от внешнего трения при различном обжатии. Цифры у кривых обозначают обжатие $\frac{\Delta h}{h}$ 100% (по Лаксу)

М. А. Лаксом, по которой определяют значение отношения $\frac{P_{ср}}{K}$ в зависимости от δ при обжатиях 2,5—50%. В качестве примера определим расчетным методом по формуле А. И. Целикова среднее

удельное давление металла на валок при прокатке квадратной полосы (20×20 мм) из быстрорежущей стали марки Р18 на стане 300.

Для определения величины K нужно знать предел текучести. Так как предел текучести, определяемый при высоких температурах, является величиной довольно условной, то пользуются величиной предела прочности. Предел прочности характеризует поведение металла при сравнительно небольших скоростях деформации. Чтобы приблизить его значение к условиям прокатки необходимо определить уточненную величину предела прочности по формуле:

$$\sigma_{общ} = \sigma_s + \eta_b u',$$

где η_b — коэффициент вязкости металла, кг · сек/мм²;

u' — скорость деформации, 1/сек;

σ_s — предел прочности при статическом испытании.

Скорость деформации определяем по формуле:

$$u' = \frac{\pi n \sqrt{r_p \Delta h}}{15 (H + h)},$$

где n — число оборотов вала в минуту;

r_p — рабочий радиус вала, мм.

В технической литературе данные о коэффициенте вязкости легированных сталей отсутствуют, поэтому принимаем вязкость этих сталей в области высоких температур примерно равной вязкости углеродистых сталей. Коэффициент вязкости подсчитываем по формуле Эшелунда:

$$\eta_b = 0,01 (14,0 - 0,01 t),$$

где t — температура прокатываемого металла, °С.

Величину K находим по уравнению

$$K = 1,075 \sigma_{общ}.$$

Коэффициент 1,075 выбран как промежуточный между значением 1,15 (для случая прокатки без уширения) и 1,0 (при отсутствии сдерживающих поперечных сил).

По данным Ю. М. Чижикова [20] коэффициент трения быстрорежущей стали марки Р18 незначительно отличается (~ на 10%) от коэффициента трения углеродистых сталей. На основании этого коэффициент трения находили по формуле Эшелунда:

$$f = 0,8 (1,05 - 0,0005 t),$$

где 0,8 — коэффициент для чугунных валков с закаленной поверхностью.

4. Контактное трение и его значение

При проектировании калибровок валков приходится решать следующие основные задачи, связанные с коэффициентом контактного трения:

1) распределять обжатия по пропускам при заданном диаметре валков, что связано с углом захвата α_{\max} и, следовательно, углом трения β ;

2) определять уширение и опережение металла, зависящие также от величины контактного трения;

3) определять усилия, действующие на валки, а по ним проверять прочность деталей прокатного стана и рассчитывать мощность, необходимую для прокатки;

4) изучать объемное напряженное состояние металла в калибрах проектируемых форм и качественно представлять поведение металла при прокатке;

5) изучать степень неравномерности деформации;

6) определять износ калибров прокатных валков.

Таким образом, проектирование калибровок валков без учета контактного трения не может привести к положительным результатам.

Контактное или внешнее трение — процесс, возникающий на поверхности соприкосновения тел, находящихся как в состоянии покоя, так и в состоянии взаимного перемещения.

Различают два рода внешнего трения.

1. Трение первого рода, или трение скольжения, — когда одно тело, перемещающееся по поверхности другого, соприкасается почти неизменными точками своей поверхности.

2. Трение второго рода, или трение качения, — когда относительная скорость точек контакта двух тел равна нулю и точки контакта все время меняются.

По отношению к смазке различают трение двух основных типов: сухое и жидкостное.

Такое деление весьма условно, так как между указанными двумя крайними типами трения имеется непрерывный ряд промежуточных: полужидкостное, полусухое и т. д.

Между прокатываемым металлом и поверхностью валков имеется скольжение с сухим трением.

Сухого трения в чистом виде не существует. Получить его можно только в лабораторных условиях. На основании этого, С. И. Губкин, разделяя взгляд А. К. Чертавских и К. Н. Кан, считает необходимым ввести третий основной вид трения — так называемое трение с адсорбционной смазкой. Они показали, что коэффициент внешнего трения в значительной степени зависит от природы окисла, образующегося на поверхности деформируемого тела, и в тем большей степени, чем толще пленка окисла.

Сила трения T при сухом трении определяется в соответствии с законом Амонтона (1699 г.), по формуле:

$$T = fN,$$

где f — коэффициент пропорциональности, называемый коэффициентом трения;

N — нормальная сила.

В 1785 г. Кулон для определения силы трения предложил новую формулу:

$$T = fN + A,$$

где A — величина, зависящая от молекулярного сцепления поверхностей.

Советский исследователь Б. В. Дерягин предложил закон трения в следующем виде:

$$T = f(N + S\rho_0), \quad (6)$$

где S — истинная площадь соприкосновения поверхностей трения;

ρ_0 — величина удельного сцепления частиц трущихся поверхностей или величина удельного прилипания.

Из этого выражения следует, что при нагрузке $N = 0$ внешнее трение не исчезает. Это является в настоящее время общепринятым взглядом.

Определим, какой должна быть величина коэффициента трения при прокатке. Известно, что чем больше коэффициент трения, тем больше можно дать обжатие металлу за один пропуск. Однако это не означает, что увеличение коэффициента трения всегда желательно. Его нужно увеличивать в том случае, когда угол захвата ограничивает обжатие. Это имеет место обычно при прокатке в вытяжных калибрах на блуминге и заготовочных станах. Если же прокатка не лимитируется углом захвата, то коэффициент трения нужно снижать, так как чем больше коэффициент трения, тем больше износ валков, расход энергии, давление металла на валки, а также ухудшается качество поверхности металла и т. д.

С увеличением трения между валками и металлом значительно повышается вертикальное давление прокатки. Например, при холодной прокатке алюминия на гладких валках [22] максимальное удельное давление равно примерно 53 кг/см^2 (рис. 19), а при прокатке на шероховатых валках — примерно 84 кг/см^2 . Такое резкое увеличение сопротивления деформации металла при прокатке на валках с шероховатой поверхностью объясняется весьма резко выраженным действием сил трения, подпирающих полосу в зеве валков как в продольном, так и в поперечном направлениях.

Однако следует отметить, что, во-первых, скорость прокатки свинца была мала и, во-вторых, по достижении скорости 0,8 м/сек намечается понижение значения коэффициента трения с увеличением скорости прокатки.

При прокатке металла, особенно малопластичных сталей и сплавов с гексагональной решеткой (электрон и цинк), влияние скорости на коэффициент трения имеет очень большое значение. С увеличением скорости деформирования пластичность цинка и электрона резко падает.

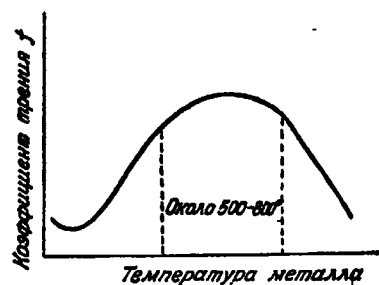


Рис. 20. Общий характер зависимости коэффициента трения от температуры обрабатываемого металла (по И. М. Павлову)

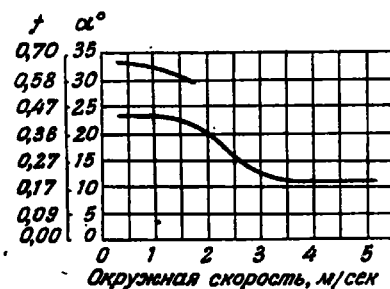


Рис. 21. Изменение коэффициента трения в зависимости от скорости прокатки (по Тафелю)

Опытом установлено, что при прокатке быстрорежущей стали со скоростью более 6 м/сек пластичность металла снижается и ухудшаются условия захвата. На среднесортных и мелкосортных станах при ручной задаче металла в валки прокатка производится при скорости, не превышающей 3,0—4,4 м/сек, обеспечивающей удовлетворительный захват металла валками, тогда как при прокатке высокопластичного металла на современных мелкосортных и проволочных непрерывных станах скорость валков достигает до 30—40 м/сек, при этом условия захвата металла валками не ухудшаются¹.

Влияние состояния поверхности бочки вала на коэффициент трения

Известно, что внешнее трение возрастает с увеличением отношения контактной поверхности деформируемого металла к его объему, т. е. с уменьшением толщины полосы.

¹ По данным решения Всесоюзного совещания прокатчиков, г. Магнитогорск, 1955 г.

При прокатке металла (особенно листов, ленты) в горячем и холодном состоянии решающим фактором, определяющим качество проката, износ валков и расход энергии, является состояние поверхности валков. В зависимости от состояния поверхности валков и смазки коэффициент трения изменяется в значительной степени. Так по данным И. М. Павлова он изменяется в пределах от $f_{\max} = 0,7$ до $f_{\min} = 0,05$.

К сожалению, до настоящего времени вопросу обработки поверхности прокатных валков прокатчики уделяют недостаточно внимания, тогда как в машиностроении считают получение качественной поверхности изделий основной задачей.

Известно, что чистота обработанной поверхности и качество металла в поверхностном слое влияют на сопротивление усталости металла под действием переменной нагрузки тем больше, чем больше чувствительность металла к концентрации напряжений.

По данным С. В. Серенсена разность усталостной прочности тонкополированного и грубо обработанного образцов доходит до 30—40%. Такое резкое падение усталостной прочности изделий от способа обработки объясняется концентрацией напряжений во впадинах.

При горячей прокатке на поверхности валков образуются дефекты (сетка разгара, риски, продавы), вызывающие вследствие сильной концентрации напряжений появление мелких трещин. В дальнейшем эти трещины, постепенно увеличиваясь, приводят к излому вала (рис. 22). Поэтому в процессе обработки и эксплуатации валков необходимо контролировать качество их поверхности. Гораздо выгоднее своевременно сменить валки для переточки, чем довести их до поломки или до состояния, требующего большого съема металла при их обработке.

По данным В. Н. Рудбаха и В. П. Северденко [26] при прокатке железа частицы металла и окислы увеличивают коэффициент трения, уменьшают вытяжку полосы (примерно на 6%) и увеличивают уширение.

В результате налипания металла на поверхность бочки вала резко повышается коэффициент трения при холодной и горячей прокатке. Наибольшей склонностью к налипанию обладают алюминий и его сплавы, а также сталь марок 1X13, X25Ю5, 2X13, 3X13, X15H60 и CX8.

Насколько сильно может меняться коэффициент трения под влиянием налипания, показывают данные, полученные И. М. Павловым и Н. Н. Гет [27] при горячей прокатке красной меди и алюминия (табл. 12).

Таким образом, при прокатке на валках с налипшим металлом коэффициент трения увеличивается почти вдвое по сравнению с прокаткой на грубошлифованных валках.



Рис. 22. Трещины усталости в изломе прокатного кованого вала (сталь марки 40ХН)

Таблица 12

. Коэффициент трения при горячей прокатке

Металл	Температура прокатки, °С	Коэффициент трения при прокатке на валках		
		с развитой сеткой	с налипшим металлом	грубошлифованных
Красная медь	750—850	0,416—0,420	0,545—0,560	0,269—0,329
Алюминий	400—500	0,423—0,466	0,535—0,558	0,227—0,272

Влияние состояния поверхности прокатываемого металла на коэффициент трения

На величину коэффициента трения также влияет и состояние поверхности прокатываемого металла. Многие легированные стали перед холодной и горячей прокаткой подвергают механической обработке для удаления поверхностных дефектов (плен, рванин,

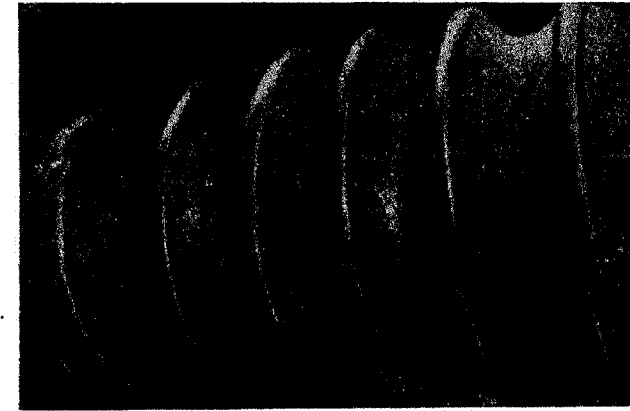


Рис. 23. Внешний вид кованого вала из стали марки 40ХН после эксплуатации его в течение двух недель

волосовин и др.). В зависимости от способа механической обработки изменяется коэффициент трения.

Состояние поверхности прокатываемого металла также характеризуется и физико-химическими свойствами окалины.

Свойства окалины сталей различного химического состава были подробно изучены В. Н. Рудбахом и С. М. Сафоновым [28]. Свойства же окалины быстрорежущей стали еще никем не изучались, но на основании наблюдений автора в производственных условиях окалина стали марок Р18 и Р9 характеризуется следующим.

При высоких температурах (1200°) сила сцепления первичной окалины с металлом мала; с понижением температуры слитка она увеличивается. При передаче нагретого слитка на рольганг стана значительная часть ее отпадает. После этого начинается образовываться новый слой окалины (вторичная окалина).

Наличие на поверхности слитка вторичной и первичной окалины в значительной степени влияет на условия процесса деформации, а именно, процесс иногда идет толчками при строго периодическом изменении условий трения.

Окалина при деформации металла способствует в значительной степени износу валков. На рис. 23 показан средний валок пос-

ле эксплуатации его в течение двух недель. Видно, насколько быстро валки изнашиваются при прокатке стали марок Р18 и Р9. При современном уровне техники нагрева металла быстрорежущую сталь следовало бы нагревать в электрических печах в защитной атмосфере, вследствие чего резко снизились бы потери дорогостоящего металла от угара и улучшились условия эксплуатации валков и качество самого проката. На основании работ одной из заводских лабораторий потеря металла от угара при нагреве слитков быстрорежущей стали марки Р18 в обычных методических нефтяных печах достигает 5,5%. При нагреве этой же стали в электрических печах в защитной атмосфере потери металла от угара составляют не более 0,5%. Таким образом, стоимость нагрева дорогостоящей быстрорежущей стали в технически совершенных печах была бы оправдана.

Влияние химического состава деформируемого металла и валков на коэффициент трения

Опытных данных, характеризующих зависимость коэффициента трения от химического состава трущихся поверхностей, мало.

Л. Ф. Молотков [29] установил зависимость коэффициента трения от содержания углерода в стали (рис. 24) — с увеличением содержания углерода коэффициент трения уменьшается.

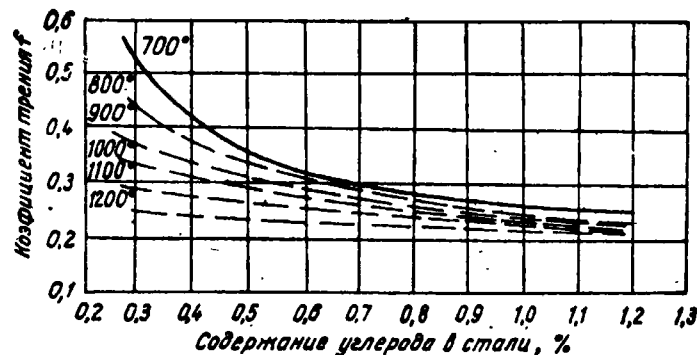


Рис. 24. Зависимость коэффициента трения от содержания углерода в стали

Ю. М. Чижиковым [20] получены опытные данные, позволяющие сравнить коэффициент трения различных сталей (табл. 13).

Из данных табл. 13 следует, что коэффициент трения быстрорежущей стали мало отличается от коэффициента трения низкоуглеродистой стали — всего лишь на 10%; коэффициент трения сплавов на никелевой основе (X15H60) довольно высок.

Таблица 13
Влияние химического состава сталей на коэффициент трения

Группа стали	Марка стали	Коэффициент трения
Малоуглеродистая	Ст. 1	1,0
Легированная	Р18	1,1
Перлитно-мартенситная	ШХ15, 4Х13	1,24—1,30
Аустенитная	1Х18Н9Т	1,40
То же, с избыточной фазой		1,45
То же, с карбидами	X15H60	1,60
Ферритная	1Х17ЮА	1,55

Примечание. За единицу принят коэффициент трения низкоуглеродистой стали.

В технической литературе данных о влиянии материала валков на коэффициент трения опубликовано весьма мало.

Коэффициент трения при горячей прокатке на стальных валках на 20% выше по сравнению с прокаткой на чугунных валках.

Методы определения коэффициента трения

В настоящее время существует несколько методов для определения коэффициента контактного трения при прокатке. Рассмотрим только те методы, которые могут быть использованы в производственных условиях.

По первому методу коэффициент трения определяют по величине максимального угла захвата. В этом случае его находят из условия естественного захвата:

$$f > \operatorname{tg} \alpha,$$

где α — угол, при котором начинается захват полосы.

Величину угла α определяют по формуле

$$\alpha = \arccos \left(1 - \frac{\Delta h}{D_p} \right). \quad (7)$$

По этому методу определяют коэффициент трения только при захвате, но не при установившемся процессе прокатки. Ввиду отсутствия при захвате «обновления» поверхности полосы, коэффициент трения не может быть равным коэффициенту трения полосы при установившемся процессе прокатки, когда происходит «обновление» поверхности полосы вследствие пластической деформации металла.

Так как при прижатии полосы к валкам не исключена возможность сминания и истирания ее кромок, то нельзя считать, что фактический угол захвата равен геометрическому углу, определяемому по формуле (7). По этому методу момент захвата полосы фиксируется не автоматически, а визуально, следовательно, точность определения угла захвата небольшая.

По второму методу коэффициент трения находят по усилию торможения, определяемому при помощи клещевого прибора И. М. Павлова [31], и по давлению металла на валки.

Автором прибора предложены формулы для определения коэффициента трения в момент наступления скольжения полосы в валках, вследствие приложения некоторой внешней силы к заднему концу полосы.

$$f = \frac{2P_z^M \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} + Q}{2P_z^M - Q \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}. \quad (8)$$

При $T_z \approx 0$

$$f = \frac{Q}{2P_z^M} + \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}, \quad (9)$$

где Q — тормозящая сила, замеренная динамометром;

P_z^M — вертикальная составляющая давления в металле валка, измеряемая мессдозами;

α — угол захвата.

Формула (9) является приближенной, так как в ней не учитывается вертикальная составляющая силы трения.

Разница между значениями коэффициента трения, подсчитанными по формулам (8) и (9), возрастает с увеличением коэффициента трения и угла захвата [32].

По этому методу также нельзя получить достоверных значений коэффициента трения по следующим причинам:

1) формула (8) выведена в предположении, что радиальное удельное давление распределено по дуге захвата равномерно, что опровергнуто опытными данными последних работ;

2) не учитывается обновление поверхности полосы, так как при буксовании валков по неподвижной недеформирующейся полосе происходит только частичное истирание ее.

Этот метод нельзя применить для определения коэффициента трения при установившемся процессе прокатки.

Третий метод (метод кернов). Определение коэффициента трения по величине опережения основано на теоретической зависимости между критическим углом, углом захвата и углом трения и на зависимости между опережением и критическим углом.

Угол трения β определяют по формуле И. М. Павлова [33]

$$\gamma = \frac{\alpha}{2} \left(1 - \frac{\alpha}{2\beta} \right). \quad (10)$$

Критический угол вычисляют по формуле:

$$\cos \gamma = \frac{1}{2} + \frac{h}{2D} + \sqrt{\left(\frac{1}{2} + \frac{h}{2D} \right)^2 - \frac{h}{D} \left(\frac{S_h}{100} + 1 \right)}, \quad (11)$$

где S_h — опережение.

Опережение определяют методом кернов по формуле:

$$S_h = \frac{L_2 - L_1}{L_1},$$

где L_2 — расстояние между отпечатками на полосе;

L_1 — длина дуги между кернами на бочке валка.

При выводе формул (10) и (11) были сделаны следующие допущения:

- горизонтальные составляющие скоростей равны между собой в любом вертикальном сечении;
- плоские поперечные сечения полосы не искривляются при прохождении ее через зев валка;
- удельное давление по дуге захвата распределено равномерно;
- значение коэффициента трения по дуге захвата постоянно;
- уширение отсутствует;
- материал валков абсолютно тверд.

Однако несмотря на указанные допущения, оценка этого метода, данная И. М. Павловым [34], вполне справедлива. Он пишет: «Преимуществом этого метода (метода кернов) определения коэффициента трения (помимо легкости) является полное соответствие получаемого коэффициента действительным условиям установившегося процесса прокатки; другие способы определения коэффициента трения при прокатке «по максимальному углу захвата» и с помощью «клещевого прибора» автора дают только более или менее удовлетворительное приближение к этим условиям».

В заключение необходимо отметить, что определение коэффициента трения методом кернов весьма удобно и легко осуществимо в производственных условиях, тогда как разработанные в последние годы новые методы, как то: И. М. Павлова [35] (электроконтактный), Н. П. Спиридонова [36] (коэффициент трения определяют по диаграмме радиального удельного давления) отличаются значительной сложностью аппаратуры, а метод Н. П. Спи-

ридонова к тому же и вычислениями. Следовательно, последние два метода могут быть использованы лишь в лабораторных условиях.

Формулы для определения коэффициента контактного трения при прокатке

Определить аналитическим методом коэффициент контактного трения при прокатке весьма трудно, так как он является функцией многих переменных факторов. Многообразие факторов также затрудняет определение этой величины опытным путем. Поэтому методами, предложенными различными исследователями, можно только приближенно оценить величину коэффициента трения.

По общепринятым формулам Экелунда коэффициент трения определяется в зависимости от температуры металла и материала валков:

для стальных валков

$$f = 1,05 - 0,0005 t;$$

для чугунных валков

$$f = 0,8 (1,05 - 0,0005 t). \quad (12)$$

Так как в этих формулах не учитываются такие важные факторы, как скорость прокатки и влияние легирующих элементов прокатываемой стали, то их можно применить только для отдельных случаев прокатки. Формула Экелунда справедлива для случаев прокатки металла с небольшой скоростью в интервале 800—1250°.

Некоторые исследователи вывели формулы для определения коэффициента трения в зависимости от содержания углерода и температуры металла. Например, формула Молоткова имеет следующий вид:

$$f = 0,748 (C \cdot 10)^{-0,493} - K \left(1 - 0,25 \frac{1200 - t}{100} \right).$$

Коэффициент K находят из уравнения

$$K = 0,27 \cdot 23^{e-0,027 (C \cdot 100)},$$

где C — содержание углерода, %.

Формулу Молоткова нельзя использовать для практических целей, так как в ней не учитываются основные факторы, влияющие на коэффициент трения, и, кроме того, структура формулы весьма сложна.

Наиболее приемлема для практических целей формула Бахтинова:

$$f = K_1 K_2 K_3 (1,05 - 0,0005 t), \quad (13)$$

где K_1 — коэффициент, учитывающий состояние поверхности и материал валков;

K_2 — коэффициент, учитывающий влияние скорости прокатки (рис. 25);

K_3 — коэффициент, учитывающий влияние легирующих элементов (см. табл. 13).

Для стальных шероховатых валков $K_1 = 1,0$, а для чугунных $K_1 = 0,8$.

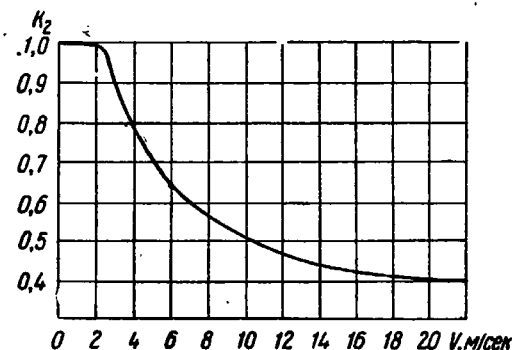


Рис. 25. Значения K_2 для расчетов коэффициента трения по уравнению (13) (по Б. П. Бахтинову)

Формула Бахтинова [13] отличается от формулы Экелунда [12] только коэффициентами, учитывающими основные факторы, влияющие на коэффициент трения.

Формула (13) не претендует на точное определение коэффициента трения, так как в нашем распоряжении имеется мало данных по коэффициентам K_2 и K_3 . Для сравнения мы определяли коэффициент трения по методу опережения и по формуле (13). Коэффициент трения по методу опережения определяли при прокатке заготовки прямоугольного сечения (162 × 135 мм) из стали марки Р18 в ящичном калибре (133 × 140 мм) на стане 600 при скорости валков 1,37 м/сек. Температура металла, определенная оптическим пирометром Пиропто, составляла 1200°.

Расстояние между кернами на стальном валке равнялось 600 мм, а расстояние между отпечатками керна на полосе 611 мм. После расчетов по формулам (10) и (11) получили: $\gamma = 6^\circ 50'$; $\alpha = 20^\circ 10'$. При рабочем диаметре валков $D_p = 474$ мм по формуле

$$f = \operatorname{tg} \beta = \operatorname{tg} \frac{\alpha^2}{2\alpha - 4\gamma}.$$

получили коэффициент трения f равным 0,605.

При расчете по формуле Бахтинова коэффициент трения оказался равным 0,495 (при $K_1 = 1$, $K_2 = 1$ и $K_3 = 1,1$).

Коэффициент трения при прокатке быстрорежущей стали был определен тем же методом на стане 300. Условия опыта: валки из стали марки ЭИ366 (1,38% C; 0,071% Cr; 1,12% Si; 0,42% Mn; 0,18% Ni; 0,28% Ti; 0,020% S; 0,024% P); температура металла 1200°; скорость прокатки 3,45 м/сек; сечение заготовки 36×36 мм; сечение готового профиля 27×39,5 мм; расстояние между кернами на валке 357 мм; расстояние между отпечатками кернов на полосе 365,35 мм; рабочий диаметр валков $D_p = 280$ мм.

После расчетов по указанным выше формулам получен коэффициент контактного трения, равный 0,367¹.

По формуле (13) при прокатке стали марки Р18 на стане 300, в указанных выше условиях, коэффициент трения равен 0,410 (при $K_1 = 1$, $K_2 = 0,83$ и $K_3 = 1,1$).

Несмотря на то, что величина коэффициента трения, полученная по методу опережения, имеет некоторое отклонение от величины, найденной по формуле (13), все же эту формулу можно рекомендовать для предварительных расчетов, так как она удобна по своей конструкции и по сравнению с формулами других авторов дает значения, более близкие к истинным. Коэффициент трения при прокатке быстрорежущей стали, полученный по методу опережения, колеблется в пределах 0,4—0,6.

5. Неравномерность деформации и образование разрывов в быстрорежущей стали

Сущность неравномерной деформации и основные факторы, на нее влияющие

Неравномерная деформация при прокатке часто приводит к образованию трещин, рванин и внутренних разрывов в центральной части полосы. Неравномерное распределение деформации обуславливается многими причинами, к основным из них по И. М. Павлову [24] относятся:

- 1) неоднородность свойств по объему деформируемого тела, вызванная различными причинами (химический состав, температура, структура, анизотропность, наклеп и др.);
- 2) форма тела в сочетании с формой инструмента;
- 3) трение между деформируемым телом и инструментом;
- 4) упругая деформация инструмента.

Вследствие этих причин в отдельных элементах тела создаются неодинаковые условия деформации. Так, некоторые ча-

сти тела при прокатке деформируются в условиях, способствующих уширению, а другие — в условиях, способствующих удлинению. Однако благодаря целостности металла и влиянию внешних частей все элементы тела вытягиваются в одинаковой мере. В результате выравнивания деформации в теле возникают дополнительные напряжения (по терминологии С. И. Губкина). Качественно возникающие дополнительные напряжения при прокатке могут быть охарактеризованы так называемой «диаграммой натуральных вытяжек» или, точнее, диаграммой высотной деформации по ширине калибра.

Сравнивая коэффициент высотного обжатия данной части полосы со средним арифметическим коэффициентом высотного обжатия полосы в целом, можно судить о том, какая часть полосы имеет большую или меньшую тенденцию к удлинению. Чем больше коэффициент высотного обжатия, тем больше данная часть полосы удлинилась бы, если бы не было связи между частями полосы. Более обжимаемые части полосы тянут за собой менее обжимаемые.

В результате взаимодействия различно обжимаемых частей в зонах повышенного обжатия возникают дополнительные продольные напряжения сжатия, а в зонах пониженного обжатия — дополнительные продольные напряжения растяжения.

Дополнительные напряжения увеличивают неравномерность распределения рабочих напряжений, т. е. напряжений, при которых деформируется тело, вследствие чего увеличивается сопротивление деформированию и понижается пластичность металла. Поэтому при проектировании технологического процесса обработки металла давлением необходимо создавать такие условия, которые обеспечили бы большую равномерность деформации.

После общих замечаний перейдем к анализу основных причин, вызывающих неравномерную деформацию при прокатке.

Рассмотрим влияние неравномерного распределения температуры в деформируемом теле на неравномерность деформации.

Перед прокаткой или в процессе прокатки металл может иметь более холодную сердцевину по сравнению с наружными слоями или, наоборот, более горячие наружные слои. Рассмотрим эти два случая подробнее.

При рассмотрении особенности деформации слитка быстрорежущей стали при условии, когда сердцевина холоднее наружных слоев, средняя часть его характеризуется более толстой карбидной сеткой, понижающей пластичность металла.

При прокатке такого слитка сердцевина, как менее нагретая часть, имеющая повышенное сопротивление деформации, получает «вынужденную» вытяжку, в результате чего в ней

¹ По данным инж. В. А. Исаева.

возникают дополнительные растягивающие напряжения, под влиянием которых в сечении, перпендикулярном направлению прокатки, могут образоваться разрывы (рис. 26).

Чтобы уменьшить опасность их образования, следует несколько охладить поверхность слитка, но не настолько, чтобы резко уменьшилась пластичность поверхностных слоев металла



Рис. 26. Внутренние разрывы в заготовке сечением 83×83 мм стали марки Р18, прокатанной из слитка круглого сечения весом 200 кг

Второй случай неравномерного распределения температуры по сечению слитка наблюдается при подстуживании металла в процессе прокатки.

При прокатке слитка с пониженной температурой наружных слоев в них возникают дополнительные растягивающие напряжения по двум причинам: во-первых, неравномерной деформации из-за разного сопротивления деформации средней и наружной частей слитка и, во-вторых, неравномерного охлаждения этих частей. Растягивающие напряжения могут вызвать образование рванин на поверхности полосы (рис. 27 и 28). Брак такого вида образуется при прокатке слитков быстрорежущей стали в последних пропусках, когда температура металла понижается (ниже 900°).

Рис. 27. Рванины на заготовке сечением 83×83 мм стали марки Р18, соответствующей донной части слитка (температура конца прокатки ниже 900°)



Рис. 28. Разрыв переднего конца квадратной полосы стали марки Р18 в результате подстуживания ее холодным воздухом, засасываемым в печь

Рассмотрим подробнее причины образований разрыва металла, представленного на рис. 29. Расщепление металла было



Рис. 29. Расщепление головной части слитка стали марки Р18, прокатанного до заготовки сечением 83×83 мм

впервые объяснено И. М. Павловым [37] при помощи простой модели (рис. 30). Мягкие слои свинца при деформации по выходе из валков не движутся прямолинейно,

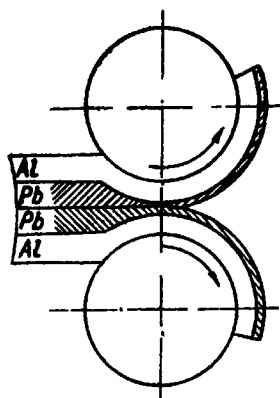


Рис. 30. Модель расщепления металла (по И. М. Павлову)

а задерживаются более жесткими слоями алюминия и следуют по направлению вращения валков. Средняя часть, как имеющая пониженное сопротивление деформации, расщепляется. Такой дефект довольно часто встречается при прокатке быстрорежущей стали и стали марок Х12М и Х12 [38].

Чтобы предотвратить получение такого брака, рекомендуется слиток выдерживать в томильной камере печи до тех пор, пока не выравнится температура по сечению слитка, а также прокатывать слиток в таких условиях, при которых его поверхностные слои не охлаждались бы, т. е. прокатывать металл на хорошо прогретых

валках, без поливки их бочки водой и в быстром темпе. Форма тела в сочетании с формой рабочей части инструмента также является одной из причин, вызывающих неравномерность деформации металла при прокатке.

Рассмотрим условия деформации слитка быстрорежущей стали круглого и квадратного сечений в ящичных калибрах, построенных без ограничения уширения.

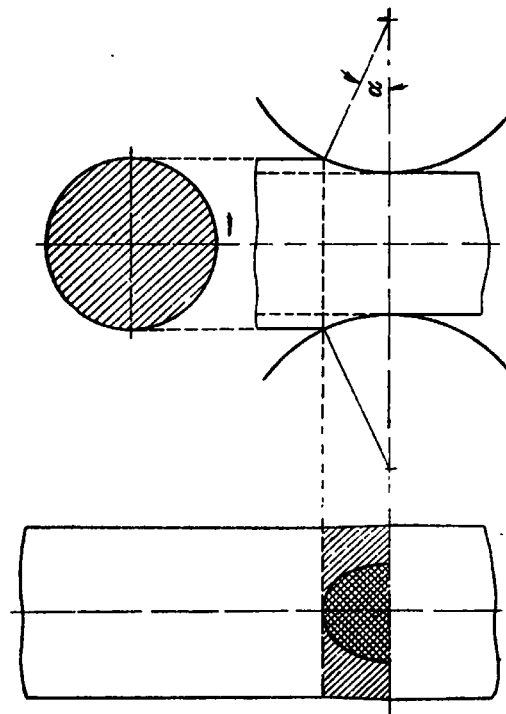


Рис. 31. Прокатка полосы круглого сечения в валках с гладкой бочкой (схема)

Процесс прокатки полосы круглого сечения в валках с гладкой бочкой (рис. 31) характеризуется по И. М. Павлову постоянством по ширине полосы следующих основных величин: μ , $(D_p + h)$, D_p и h . При этом переменными величинами являются: H , α и коэффициент высотного обжатия γ .

Вследствие внутриметаллической связи и действия внешних концов продольная деформация отдельных элементов полосы выравнивается. Это выражается в постоянстве вытяжки μ всех элементов по ширине полосы. Процесс выравнивания вытяжки приводит к появлению дополнительных растягивающих и сжимающих напряжений. Растягивающие напряжения действуют во внеконтактных частях полосы в зоне деформации.

Графический метод построения формы контактной поверхности позволяет установить величину площади внеконтактной области деформации ($S_{\text{вко}}$) и величину контактной области деформации ($S_{\text{кон}}$). Чем больше отношение проекции внеконтактной области к пропорции поверхности соприкосновения металла с валком, тем больше степень неравномерности пластической деформации и соответственно этому в контактной области увеличиваются сжимающие напряжения и уширение.

Для случая прокатки слитка быстрорежущей стали круглого сечения весом 200 кг в валках с гладкой бочкой и с раствором между валками $h = 190$ мм, рабочим диаметром $D_p = 420$ мм по данным рис. 31, внеконтактная область занимает площадь 11 860 мм², площадь контактной области — 9 200 мм² и площадь горизонтальной проекции очага деформации 21 060 мм². Следовательно, внеконтактная область составляет от площади горизонтальной проекции очага деформации 56,3%. Такое отношение площади внеконтактной области к площади горизонтальной проекции очага деформации характеризует неудовлетворительные условия деформации слитка круглого сечения в ящичных калибрах со свободным уширением.

Во внеконтактной области деформации принудительная вытяжка металла сопровождается вынужденной «высотной утяжкой» и вынужденной «поперечной утяжкой».

Таким образом, деформация слитка круглого сечения в валках с гладкой бочкой характеризуется значительной неравномерностью пластической деформации и растягивающими напряжениями во внеконтактных частях полосы в зоне деформации. Поэтому нерационально прокатывать слитки круглого сечения, особенно быстрорежущей стали, на гладкой бочке или в ящичных калибрах со свободным уширением.

Прокатка слитка квадратного сечения на гладкой бочке по И. М. Павлову характеризуется тем, что по ширине полосы остаются постоянными следующие величины: H , h , D_p , α , $(D_p + h)$ и μ ; переменные величины отсутствуют.

Коэффициент высотной деформации η также остается постоянным по всей ширине калибра. При прокатке квадратного слитка на гладкой бочке внеконтактная область деформации отсутствует, поэтому условия деформации такого слитка характеризуются отсутствием вынужденной «высотной утяжки» и вынужденной «поперечной утяжки» в отдельных частях полосы.

Из этого следует, что слитки быстрорежущей стали квадратного сечения по сравнению со слитками круглого сечения деформируются в ящичных калибрах с лучшими показателями по выходу годного и по производительности прокатного стана.

Влияние контактного трения между деформируемым телом и инструментом на неравномерность деформации при прокатке

достаточно велико, хотя и не в такой степени как при осадке [39, 40].

Наличие при прокатке сил трения по контактной поверхности приводит к неравномерному распределению поперечного напряжения σ_2 и, следовательно, к неодинаковым условиям деформации по ширине полосы. Однако, благодаря выравнивающему действию внутриметаллических связей и внешних частей полосы, изменение условий деформации полосы по ее ширине не приводит к значительной неравномерности деформации. Выравнивание продольной деформации вызывает в полосе дополнительные напряжения — в данном случае растягивающие по краям и сжимающие в середине.

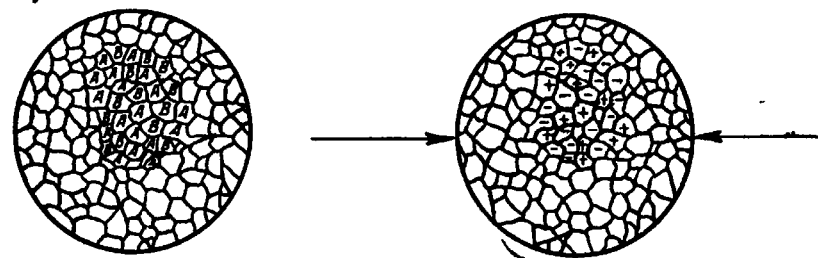


Рис. 32. Напряжения, возникающие при деформации неоднородного металла:

А — жесткие зерна; В — мягкие зерна (по И. М. Павлову)

Анализ условий деформации металла, имеющего неоднородную структуру, впервые был произведен И. М. Павловым в 1934 г. Сущность его сводится к следующему.

Допустим, что металл, имеющий зерна различной жесткости (зерно А — повышенной и зерно В — пониженной), подвергается обжатию (рис. 32). Зерна А и В деформируются различным образом: зерна В деформируются в большей степени, чем зерна А. Вследствие взаимной связанности деформаций отдельных частей тела в зернах возникают напряжения, искажающие то напряженное состояние, которое отвечает действию поверхностных деформирующих сил.

Так, зерна А, как более жесткие, испытывают напряжения растяжения (+), а зерна В — напряжения сжатия (—). Схема распределения напряжений в металле применительно к рассматриваемому случаю показана на рис. 32 (справа). В результате деформации возникают остаточные напряжения, а в некоторых случаях возможен разрыв зерен А.

Следует отметить, что приведенный анализ условий деформации металла, имеющего неоднородную структуру, автор считает

весьма упрощенным, так как структурные составляющие всегда находятся в условиях объемного напряженного состояния. То, что рассматривалось выше о растяжении (+), относится лишь к одной или двум осям в плоскости продольной и поперечной деформации. По вертикальной же оси всегда сохраняется сжатие (—).

Исследованием микроструктуры деформированных неоднородных сплавов наглядно обнаруживаются последствия неравномерной деформации.

При горячей прокатке быстрорежущей стали нерастворенные свободные карбиды, как более жесткие составляющие, испытывают напряжение растяжения, а зерна аустенита — напряжение сжатия. Если напряжение растяжения превышает предел прочности, то возможно образование микротрещин как внутри тела, так и на его поверхности, которые при дальнейшем воздействии внешних сил могут быть источником макротрещин.

Причины образования внутренних разрывов в заготовке быстрорежущей стали

В заготовке сечением 83×83 мм, прокатанной из слитка круглого сечения весом 200 кг, внутренние трещины обычно располагаются в центре сечения (см. рис. 26) и ориентированы в направлении прокатки (рис. 33).

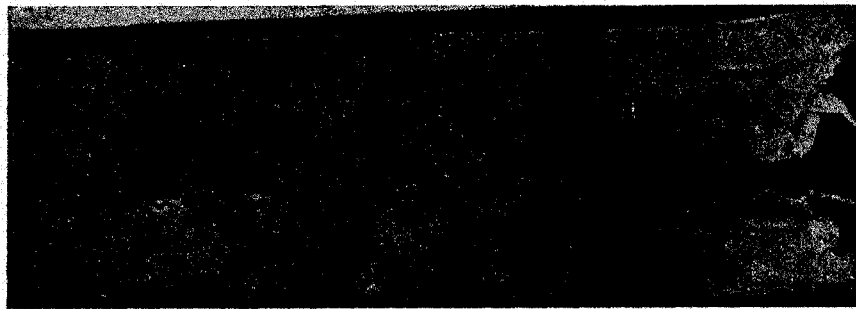


Рис. 33. Макро (продольное) заготовки сечением 83×83 мм, прокатанной из слитка круглого сечения весом 200 кг стали марки Р18 на валках с калибровкой по системе круг — круг

Такой брак принимает массовый характер в том случае, когда слиток круглого сечения прокатывают до сечения 83×83 мм по системе круг — круг, рекомендованной в свое время Ю. М. Чижиковым. В отдельных случаях внутренние разрывы

такого же характера образовывались и при прокатке по системе ящик — круг — круг — квадрат.

Довольно часто внутренние разрывы в заготовке быстрорежущей стали возникают при ковке шайб и круглых штанг. В настоящее время в результате изменения технологииковки шайб брак по внутренним разрывам доведен до минимума [41].

Природа образования данного дефекта еще недостаточно ясна, что подтверждается наличием значительного количества разноречивых гипотез. В последнее время, на основании опытных данных и работ советских ученых, касающихся вопросов объемного напряженного состояния деформируемого металла, представилась

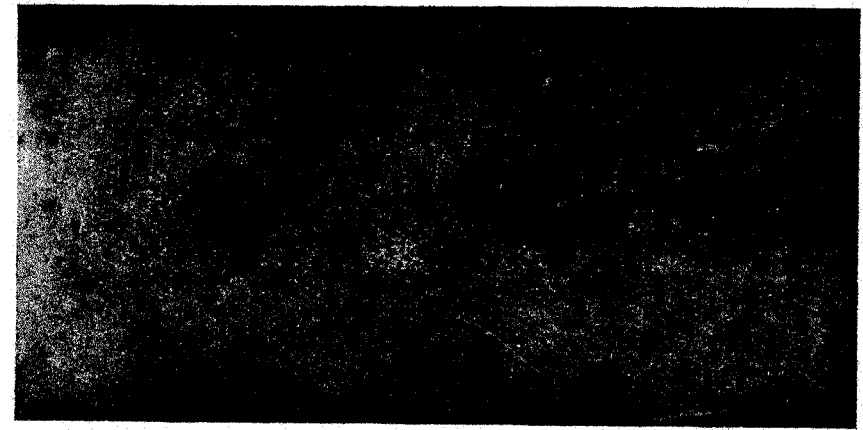


Рис. 34. Макро (продольное) заготовки сечением 83×83 мм стали марки Р18, прокатанной из слитка круглого сечения весом 200 кг

возможность до некоторой степени приблизиться к истинной причине образования внутренних разрывов в заготовке быстрорежущей стали.

Чтобы выяснить причины образования внутренних разрывов в заготовке сечением 83×83 мм, нами были проведены опыты, в которых исследовали влияние скорости разливки стали, температуры разливки, формы слитка, продолжительности нагрева, температуры нагрева, скорости прокатки, формы калибра, степени обжатия на образование трещин.

Из всех факторов на образование внутренних разрывов влияют, главным образом, следующие: температура разливки стали, форма слитка и калибра, режим нагрева и степень обжатия. Это подтверждается следующими опытными данными.

1. Заготовки сечением 83×83 мм, прокатанные из слитков стали марки Р18 круглого сечения, взятых нами от аварийно

холодных двух плавок, оказались браком по внутренним разрывам грубовыраженного характера (рис. 34). Слитки прокатывали по системе круг—круг.

2. Структура слитков круглого сечения весом 200 кг, взятых от плавок, разлитых со скоростью 15—50 сек., оказалась плотной, без дефектов. Качество стали оценивали по продольному макро двух произвольно взятых слитков. Заготовка размером 83×83 мм, прокатанная из этих слитков по системе круг—круг, оказалась с внутренними дефектами.

3. Прокатка слитков из стали марки P18, нагретых до 1260° и прокатанных до квадрата 83 мм по системе круг—круг, не дала положительных результатов; в изломе заготовки выявлены грубые рванины по центру сечения.

Одновременно исследовалось влияние температуры нагрева слитка перед прокаткой на оплавление ледебуритной эвтектики. Для этого от края и центра слитка на расстоянии 150 мм от прибыльной части вырезали образцы и нагревали их до различных температур (1220 — 1300°). Микроанализом установлено, что ледебуритная эвтектика края и центра слитка начинает оплавляться при одной и той же температуре, а именно при 1280 — 1300° . Следовательно, температура оплавления ледебуритной эвтектики значительно выше температуры нагрева слитка под прокатку (1210°).

4. Исследованием полуракатов из второго, третьего и пятого нижних калибров, полученных при прокатке слитков по системе круг—круг, установлено, что надрывы образуются в первых пропусках, а в последующих количество и размеры их увеличиваются. Перед прокаткой слитки были нагреты в соответствии с технологической инструкцией.

5. Уменьшение числа оборотов до 50 об/мин не оказало влияния на уменьшение внутренних разрывов.

6. Заготовки сечением 83×83 мм стали марки P18, прокатанные из слитков двух плавок на валках с ящичными калибрами (см. рис. 49), в результате 100%-ного контроля на излом оказались годными, без внутренних разрывов. От слитков второй плавки были отобраны полуракаты из третьего нижнего калибра, в которых после прострожки в центре сечения не было обнаружено внутренних разрывов.

7. Более 2000 слитков квадратного сечения стали марок P18 и P9 было прокатано до квадрата сечением 83×83 мм на валках с ящичными калибрами (см. рис. 49). После контроля на излом все заготовки оказались годными, без внутренних разрывов.

8. Слиток круглого сечения стали марки P9, посаженный сразу в зону с температурой 1000° (форсированный нагрев — 8 час. вместо 15—20 час.), прокатали на валках с ящичными

калибрами в заготовку сечением 83×83 мм. В заготовке внутренних разрывов не обнаружено.

9. Слитки круглого сечения первой половины плавки стали марки P9 были прокатаны на заготовку сечением 83×83 мм по системе круг — круг за 11 пропусков, т. е. с повышенными обжатиями, а слитки второй половины этой же плавки — за 21 пропуск. В обоих случаях слитки нагревали в соответствии с технологической инструкцией.

В результате 100%-ного контроля на излом установлено, что заготовка, прокатанная с увеличенными обжатиями, оказалась без внутренних разрывов, а вся заготовка, прокатанная с уменьшенными обжатиями, была забракована из-за внутренних разрывов, расположенных в центре сечения.

Заготовки сечением 83×83 мм, прокатанные на валках с ящичными калибрами из слитков квадратного сечения, разлитых при нормальной температуре и нагретых перед прокаткой до 1210° (сталь марки P18) и 1170° (сталь марки P9), оказались годными, тогда как заготовки такого же сечения, прокатанные из круглых слитков стали тех же марок по системе круг—круг, особенно при низкой температуре разлива и перегрева перед прокаткой, всегда имели в центре сечения внутренние разрывы. Таким образом были определены условия появления внутренних разрывов в заготовке, но не вскрыт механизм их образования.

Чтобы получить ясное представление о механизме разрушения в объеме, расположенном по оси деформируемого слитка, рассмотрим модель деформации слитка в круглых калибрах.

Слиток круглого сечения представим в виде цилиндра, состоящего из ряда элементарных концентрических слоев, плотно вставленных друг в друга и скрепленных по соприкасающимся поверхностям. При воздействии на такое тело сосредоточенных внешних сил от валков происходит деформация концентрических слоев. Наиболее энергично деформируются наружные слои. По мере удаления от мест приложения нагрузки соответствующие ей скалывающие напряжения уменьшаются, а следовательно, уменьшается интенсивность пластической деформации. Наружные концентрические слои, увеличиваясь в диаметре, тянут за собой концентрические слои, находящиеся ближе к середине, в результате этого возникают дополнительные радиальные растягивающие напряжения. Они являются, видимо, следствием неравномерной деформации.

Для опытного подтверждения того, что наружные кольца деформируются интенсивнее внутренних, было проведено небольшое исследование.

Два слитка круглого сечения стали марки P18 весом 200 кг каждый прокатали на валках с калибровкой, представленной на рис. 49. Один слиток прокатан до черногового круга $d_0 = 138$ мм,

а затем, после отжига, обточен на токарном станке до правильного круга $d_1 = 130$ мм. На торцевой стороне этой штанги резцом нанесли концентрические окружности. После нагрева до 1210° штангу прокатали на стане 600 до круга диаметром $d = 123,5$ мм в один пропуск. После прокатки со стороны торцевой части штанги отрезали темплет для определения размеров концентрических окружностей. Результаты измерений приведены в табл. 14.

Таблица 14

Изменение размеров концентрических окружностей при прокатке круга 130 до круга 123,5 мм стали марки P18

№ концентрической окружности	Размер осей, мм				Относительная степень высотной деформации $\eta = \frac{a_1 - a_2}{a_1} 100, \%$	Отношение $\frac{a_2}{b_2}$
	до прокатки		после прокатки			
	a_1	b_1	a_2	b_2		
1	130	130	123,5	131,5	5,0	0,939
2	104	104	101	106	2,836	0,905
3	78	78	76	78	2,564	0,974
4	52	52	61,4	53	1,153	0,969
5	26	26	25,8	26	0,769	0,992

Другой слиток прокатали до круга $d_0 = 122$ мм, затем после отжига проточили до круга $d_1 = 120$ мм, нанесли с торцевой стороны штанги концентрические окружности и прокатали в один пропуск до круга $d = 102,5$ мм.

После прокатки со стороны торцевой части штанги отрезали темплет для определения размеров концентрических окружностей. Результаты измерений приведены в табл. 15 и на рис. 35.

Таблица 15

Изменение размеров концентрических окружностей при прокатке круга 120 до круга 102,5 мм стали марки P18

№ концентри- ческой окружности	Размеры осей, мм				$\eta = \frac{a_1 - a_2}{a_1} 100, \%$	Отноше- ние $\frac{a_2}{b_2}$
	до прокатки		после прокатки			
	a_1	b_1	a_2	b_2		
1	120	120	102,5	113,5	14,58	0,903
2	98,5	98,5	84,52	93,5	14,18	0,904
3	73,5	73,5	63,5	68,0	13,61	0,934
4	48,6	48,5	42,0	44,0	13,40	0,977
5	23,5	23,5	21,2	21,3	9,74	0,995

В первом случае относительное высотное обжатие составляло 5%, а во втором 14,58%.

Эти опытные данные подтверждают правильность выводов В. С. Смирнова [43] о том, что в осевой зоне искажение сечения (овальность элементарных цилиндра) отсутствует, а на периферии овальность имеет максимум.

В осевой части поперечного сечения полосы радиальные растягивающие напряжения могут оказаться больше сжимающих

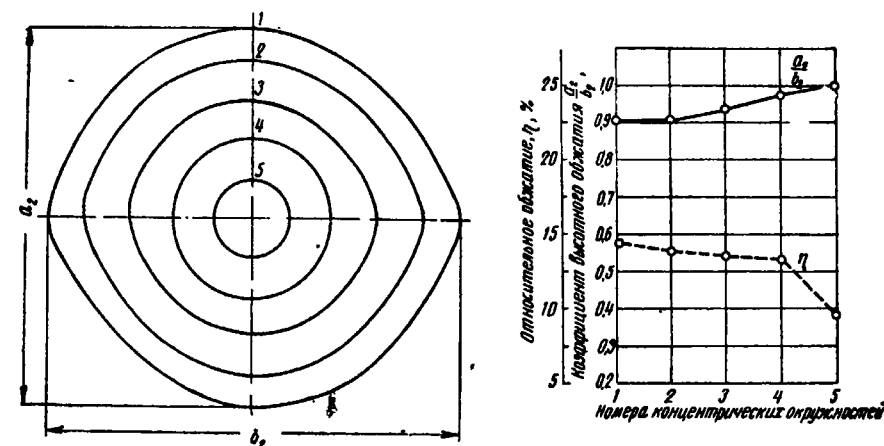


Рис. 35. Изменение размеров осей концентрических окружностей круга $d_0 = 120$ мм быстрорежущей стали марки P18 при прокатке до круга $d_1 = 102,5$ мм

напряжений от валков. Это особенно вероятно при прокатке слитка круглого сечения в круглых калибрах с малыми обжатиями. Тогда в осевой зоне результирующие радиальные напряжения будут растягивающие.

Деформация цилиндра неравномерна и в продольном направлении. От действия нагрузки в большей степени деформируются периферийные слои. Длина периферийных концентрических слоев увеличивается значительно больше внутренних. К тому же, если радиальные растягивающие напряжения имеют в осевой части заготовки достаточно большую величину, то под их воздействием элементарные цилиндры в осевой зоне могут утолщаться, и при этом, согласно закону постоянства объема, длина их в осевом направлении сокращается. В результате при прокатке круглой заготовки торцы ее приобретают чашеобразную вогнутость.

При прокатке образца круглого сечения количество частиц, смещаемых вдоль оси на периферии, велико, и они увлекают за собой частицы осевой зоны, т. е. частицы осевой зоны подвергаются при этом принудительной вытяжке. В силу этого в осевой зоне

возникают растягивающие напряжения, а как реакция по отношению к ним, в периферийной зоне — сжимающие напряжения.

Приняв за основу описанную выше модель, условия деформации круглого слитка быстрорежущей стали в валках с калибровкой по системе круг — круг характеризуются следующим.

Слиток деформируется в условиях явно выраженной неравномерной деформации. Элементарный объем металла, выделенный в центре сечения, подвергается действию растягивающих напряжений по трем осям. Следовательно, разрушение в осевой зоне слитка происходит не путем среза, а путем отрыва.

Если слиток перегрет или взят от плавок, разлитых при пониженной температуре, прокатан в валках с калибровкой по системе круг — круг с малыми обжатиями, то разрушение в осевой зоне его происходит значительно быстрее. Практика подтверждает, что разрушение в осевой зоне слитка наблюдается не только при прокатке слитков быстрорежущей стали, но и других сталей, характеризующихся повышенным сопротивлением деформации, и особенно слитков, пораженных осевой усадочной рыхлостью.

П. А. Александров рекомендует, в целях избежания образования внутренних дефектов в блуках, производить прокатку с линейными обжатиями, равными (или большими) квадрату толщины раската до задачи в валки, разделенного на удвоенную величину диаметра вала. Эта рекомендация вполне выполнима при прокатке быстрорежущей стали даже на валках диаметром меньше 800 мм. Так, например, при $H=230$ мм и $D=600$ мм из условия, предложенного П. А. Александровым,

$$\Delta h > \frac{H^2}{2D} \quad \text{или} \quad \alpha > \frac{H}{D}, \quad (14)$$

обжатие равно 44,1 мм и угол захвата равен $21^\circ 30'$.

Другой пример: $H=350$ мм, $D=900$ мм. Тогда из условия (14) $\Delta h=67,5$ мм, $\alpha=22^\circ$.

Из того, что слиток малопластичных сталей не должен, из чисто металлургических соображений, иметь размеры сечения более 350×350 мм, следует, что для прокатки слитков быстрорежущей стали и других малопластичных сталей нет никакой необходимости увеличивать диаметр валков блуминга выше 950 мм.

6. Захват металла валками

На основании практики одного из наших заводов, а также ранее высказанных положений о факторах, влияющих на коэффициент трения, нетрудно определить оптимальные условия захвата быстрорежущей стали.

Для улучшения условий захвата быстрорежущей стали необходимо на обжимных станах уменьшать скорость прокатки до 1,5—

2 м/сек, так как при больших скоростях коэффициент трения резко падает. Кроме того, слиток следует задавать в калибр более тонкой, донной частью. В этом случае, минуя процесс захвата, сразу начинается установившийся процесс прокатки, когда имеет место следующая зависимость угла захвата от угла трения.

$$\alpha < 2\beta.$$

Большое влияние на условия захвата оказывает понижение температуры быстрорежущей стали. Нельзя допускать подстуживания слитка в процессе его прокатки ниже 1000° , так как снижение температуры слитка ухудшает условия захвата вследствие резкого повышения сопротивления деформации металла. И. М. Павлов и Н. Н. Гет [27] опытным путем установили, что с повышением сопротивления деформации коэффициент трения уменьшается и, следовательно, условия захвата ухудшаются.

По данным А. А. Преснякова [44], с увеличением удельного давления, необходимого для осуществления деформации, что соответствует условию прокатки слитка при пониженной температуре, угол захвата резко падает. Зависимость угла захвата от удельного давления, необходимого для осуществления деформации металла, А. А. Пресняковым выражена в виде формулы

$$\alpha = \arcsin \left(\frac{Q}{2Fp} \sqrt{1 + f^2} \right), \quad (15)$$

где Q — сила, с которой слиток или полоса задаются в валки;

F — площадь соприкосновения металла с валками;

p — удельное давление, необходимое для осуществления деформации;

f — коэффициент трения.

Однако следует заметить, что по этой формуле рассчитать угол захвата практически невозможно, так как неясно, каким образом можно определить контактную площадь. Кроме того, формула (15) выведена исходя из того, что чистого процесса прокатки без заталкивающего усилия Q не существует.

Чтобы улучшить условия захвата и повысить пластичность быстрорежущей стали марки Р18, слитки прокатывают с двумя промежуточными подогревами, а стали марки Р9 в отдельных случаях с одним промежуточным подогревом. Более того, после очередной смены валков нельзя начинать прокатку с быстрорежущей стали. Следует разогреть валки до 150 — 200° , для этого прокатывают несколько заготовок малоуглеродистой стали, так как холодные валки не обеспечивают нормального захвата быстрорежущей стали.*

В редких случаях, с целью увеличения угла захвата, допускается подсыпка сухой окалины на поверхность конца слитка, задаваемого в валки.

Из всех указанных рекомендаций, обеспечивающих нормальные условия захвата металла валками, наиболее важной является та, которая касается вопроса регулировки скорости валков за период прокатки. Прокатка слитков быстрорежущей стали, особенно увеличенного веса (500—700 кг), не может дать положительных результатов, если двигатель прокатного стана не имеет регулировки числа оборотов валков.

Иногда при прокатке быстрорежущей стали, чтобы обеспечить захват металла валками, используют «пушку», при помощи которой создается необходимое усилие Q для вталкивания металла в зев валков.

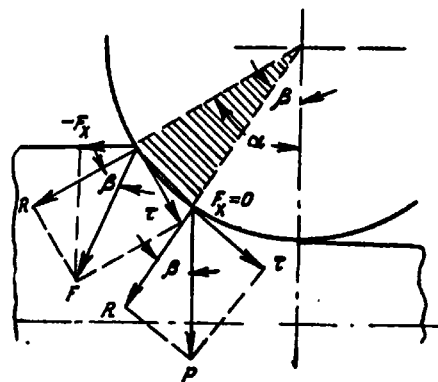


Рис. 36. Растягивающие напряжения переднего конца при задаче полосы в валки (по И. М. Павлову)

А. П. Чекмарев и П. Ф. Врля [45] предложили для обжимной клетки сортопрокатного стана автоматический секционный подъемно-качающийся стол с пневматическим заталкивателем. Несмотря на целесообразность использования пневматического заталкивателя, позволяющего значительно повысить производительность прокатных станов, при прокатке быстрорежущей стали и других малопластичных

сталей и сплавов принудительная задача металла в валки совершенно недопустима.

Недостатком такой задачи И. М. Павлов считает повышение возможности разрушения обрабатываемого металла в зоне растяжения пояса деформации протяженностью от β до α (рис. 36).

Максимальный угол захвата, встречающийся на практике при прокатке слитков быстрорежущей стали, равен почти 27° (см. табл. 27).

Все рассмотренные выше факторы, создающие оптимальные условия захвата быстрорежущей стали валками, остаются в силе, хотя и в меньшей степени, и при прокатке быстрорежущей стали на среднесортных и мелкосортных станах.

При прокатке полосы на среднесортных и мелкосортных станах резко увеличивается после каждого пропуска отношение поверхности полосы к ее объему, что в значительной степени отражается на снижении температуры полосы с последующим повышением ее твердости (рис. 37). В силу этого по мере уменьшения сечения готового проката следует увеличивать число оборотов валков.

На проволоочном стане одного из заводов, состоящего из трех

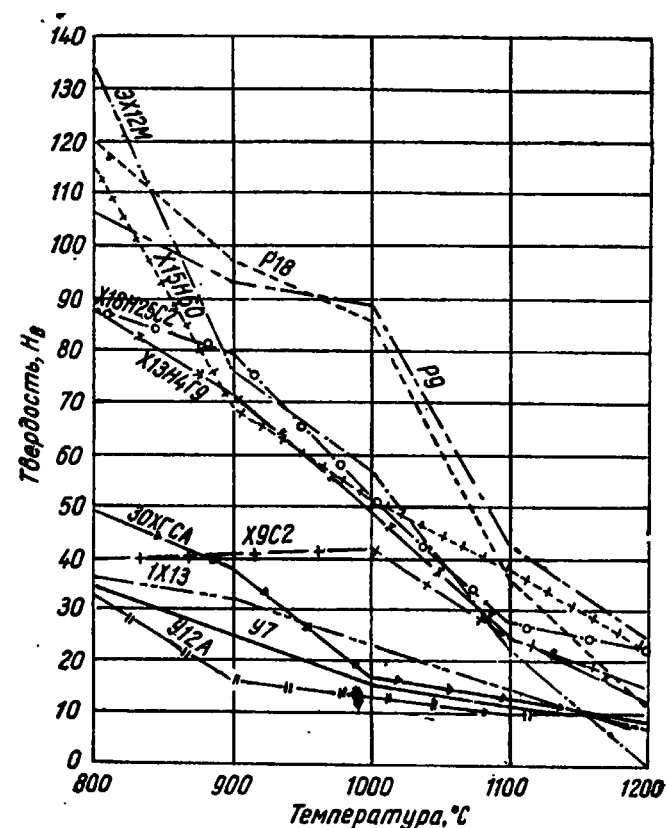


Рис. 37. Зависимость твердости от температуры стали различных марок

линий, проволоку из быстрорежущей стали прокатывают при следующих числах оборотов (табл. 16).

Таблица 16

Линия става	Число оборотов в/лков об/мин	Диаметр валков последней клетки, мм	Число оборотов валков в минуту в зависимости от размера проволоки, мм			
			5	6	7,5	9
Черновая	120	465	120	120	120	120
Средняя	490/215	308	401	380	380	360
Чистовая	590/255	285	540	480	480	460

На другом заводе на линии стана 300 (допель-дуо), состоящего из шести клетей, в зависимости от размера круга числа оборотов валков меняются следующим образом:

Диаметр круга, мм : . 8 9 10 12 14 16 18 20 22 23 25 28 30
Число оборотов в минуту 230 220 210 200 190 190 180 180 170 170 160 160 160

Затрудненная задача металла в валки на среднесортных и мелкосортных станах может быть лишь в двух случаях: во-первых, когда передний, задаваемый в валки, конец заготовки подстужен и, во-вторых, когда начинается прокатка быстрорежущей стали на холодных, неразогретых валках.

На практике применяют следующие углы захвата.

На стане допель-дуо 300 одного завода круглые и квадратные профили размером 8—32 мм прокатывают с углами захвата до 19° в квадратных калибрах и до 18,5° в овальных калибрах.

7. Уширение быстрорежущей стали при прокатке

Поперечная деформация (уширение) Δb металла зависит от очень многих факторов, к основным из них относятся: коэффициент контактного трения, линейное обжатие, степень неравномерности деформации, форма и размер прокатываемой полосы, диаметр валков и форма инструмента.

По данным И. Я. Тарновского [46] показатель уширения является функцией четырех переменных

$$\frac{\Delta b}{\Delta h} = \varphi \left(\frac{\Delta h}{H_0}, \frac{H_0}{D}, \frac{B_0}{D}, f \right).$$

Эта зависимость справедлива только при прокатке на гладкой бочке. При прокатке же в калибрах большое влияние на уширение оказывает степень неравномерности деформации.

Определение уширения металла до сих пор является еще задачей будущего. С помощью современной математической теории пластичности прокатчики пока еще не в состоянии при заданных параметрах прокатки определить истинное значение поперечной деформации металла. Поэтому при решении практических задач калибровщику, к сожалению, приходится прибегать к эмпирическим или полуэмпирическим формулам, корректируя результаты подсчета в каждом отдельном случае после пробной прокатки. Это приводит к излишним потерям металла и снижению производительности труда.

Из имеющихся 22 формул для определения уширения по данным анализа Ю. М. Чижикова [47] и данным практики наиболее

точной оказалась формула С. И. Губкина:

$$\Delta b = \left(1 + \frac{\Delta h}{H} \right) \left(f \sqrt{\frac{r}{H} \frac{\Delta h}{H} - \frac{\Delta h}{2H}} \right) \Delta h. \quad (16)$$

Ввиду разноречивых данных по вопросу уширения в 1946 г. группой заводских исследователей (А. А. Протасов, Т. Г. Пегова с участием Н. И. Сведе-Швец) была выполнена работа [48] по определению уширения при прокатке быстрорежущей стали. Одновременно, используя данные этой работы, проверили формулу (16).

Образцы прокатывали на гладких валках чистовой клетки стана допель-дуо с диаметром валков 300 мм при скорости валков 4,5 м/сек.

Испытание проводили на образцах, изготовленных на строгальном станке из стали марки Р18 размером $H_0=20$ мм; $B_0=30$ мм; $L_0'=500$ мм.

До прокатки на образцах керном наносили углубления на расстоянии $l_0=250$ мм. Расстояние между кернами после прокатки l_1 .

Образцы нагревали в трубах диаметром 150 мм. Температуру в трубах измеряли платинородиевой термопарой, а перед задачей в валки — оптическим пирометром Пиропто. Режим нагрева для всех образцов был одинаковый. Образцы прокатывали при 1200, 1150, 1000 и 900° с относительными обжатиями 15; 25; 35; 45 и 60%.

После прокатки на основании закона постоянства объема определяли ширину образца по формуле:

$$B_1 = \frac{B_0 l_0 H_0}{l_1 H_1}.$$

Данные опытной прокатки представлены в табл. 17.

По этим данным составлены кривые (рис. 38), из которых следует, что показатель уширения не подчиняется закону прямолинейной зависимости от обжатия. При температурах прокатки 900, 1150, 1100 и 1200° показатель уширения в пределах относительных обжатий от 15 до 25% падает, и тем быстрее, чем ниже температура прокатки. При относительных обжатиях от 25 до 60% показатель уширения имеет тенденцию быстрого роста, особенно с понижением температуры прокатки. Максимальное значение показателя уширения получено при увеличении относительно обжатия от 25 до 60% и температуре прокатки 900°.

Увеличение показателя уширения при температурах 900° в сравнении с температурами прокатки 1200, 1150 и 1110° находится в полном соответствии с кривой изменения коэффициента трения в зависимости от температуры.

Показатель уширения $\frac{\Delta b}{\Delta h}$ по данным опытной прокатки образцов
быстрорежущей стали марки Р18

Темпе- ратура прокат- ки, °С	№ об- разца	Высота, мм		Обжатие		Ширина, мм		Уши- рение Δb мм	$\frac{\Delta b}{\Delta h}$	$\frac{B_1}{B_0}$
		H_0	H_1	мм	%	B_0	B_1			
1200	1	20,8	17,5	3,3	15,8	26,0	27,8	1,8	0,545	1,06
1200	2	20,3	17,0	3,3	16,2	26,0	27,8	1,8	0,545	1,06
1120	3	20,6	17,3	3,3	16,0	26,5	28,2	1,7	0,515	1,06
1120	4	21,0	18,0	3,3	14,3	25,4	27,0	1,6	0,485	1,06
1020	5	20,5	17,5	3,0	14,6	26,2	27,9	1,7	0,566	1,065
1020	6	20,3	17,5	2,8	13,8	25,8	27,3	1,5	0,535	1,060
900	7	20,0	17,5	2,5	12,5	26,0	27,6	1,6	0,641	1,060
900	8	20,0	17,5	2,5	12,5	25,5	27,0	1,5	0,600	1,060
1190	1	20,6	15,5	5,1	24,7	26,5	29,3	2,3	0,550	1,050
1190	2	20,5	15,5	5,0	24,3	25,4	28,0	2,6	0,520	1,10
1100	5	20,5	15,5	5,0	24,3	25,0	27,6	2,6	0,520	1,105
1100	6	20,6	15,6	5,0	24,2	25,8	28,6	2,8	0,560	1,110
900	7	20,6	16,0	4,6	22,3	25,4	27,8	2,4	0,522	1,094
900	8	21,0	16,5	4,5	21,4	25,4	27,8	2,4	0,532	1,094
1180	1	20,8	14,2	6,6	31,7	26,0	30,0	4,0	0,606	1,151
1180	2	20,6	14,2	6,4	31,0	26,2	30,5	4,3	0,672	1,162
1150	3	20,6	14,0	6,6	32,0	25,6	30,0	4,4	0,665	1,170
1150	4	21,0	14,0	7,0	33,3	26,0	30,2	4,2	0,600	1,160
1095	5	20,4	14,0	6,4	31,3	26,0	31,0	5,0	0,779	1,180
1095	6	20,8	14,0	6,8	32,6	26,0	30,6	4,6	0,676	1,175
900	7	20,5	14,5	6,0	29,2	26,3	30,4	4,1	0,682	1,155
900	8	20,6	14,3	6,3	30,5	26,5	30,5	4,0	0,635	1,150
1080	3	20,2	11,0	9,2	45,5	26,1	31,3	5,3	0,575	1,200
1080	4	20,6	11,0	9,6	46,6	26,1	33,0	6,7	0,696	1,260
1020	5	20,2	11,0	9,2	45,5	26,0	33,5	7,5	0,815	1,280
1020	6	20,5	11,0	9,5	46,3	26,3	34,8	8,1	0,850	1,285
900	7	20,0	11,5	8,5	42,5	25,5	33,1	7,6	0,895	1,30
900	8	20,0	11,5	8,5	42,5	25,0	32,5	7,5	0,882	1,284
1190	1	20,5	7,5	13,0	63,3	25,0	35,2	10,2	0,785	1,41
1190	2	20,5	8,5	12,0	58,5	26,0	35,5	9,5	0,793	1,36
1140	3	20,0	8,8	11,2	56,0	26,2	37,4	11,2	1,00	1,42
1140	4	20,0	8,5	11,5	57,5	25,0	35,0	10,0	0,872	1,40
1000	5	20,0	8,0	12,0	60,0	25,0	35,0	10,5	0,875	1,42
1000	6	20,0	8,2	11,8	59,0	26,0	36,0	10,0	0,850	1,38
860	7	20,5	8,5	12,0	58,5	26,5	39,0	12,5	1,04	1,47
860	8	21,0	8,5	12,5	59,5	25,5	38,0	12,5	1,00	1,48

Коэффициент поперечной деформации $\frac{B_1}{B_0}$ в зависимости от обжатия изменяется довольно плавно, почти по прямой. С увеличением обжатия увеличивается и коэффициент поперечной деформации.

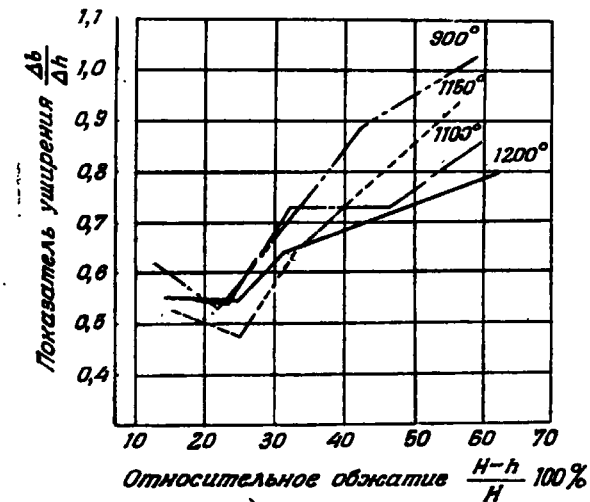


Рис. 38. Изменение показателя уширения при прокатке стали марки Р18 в зависимости от обжатия и температуры

Опытные данные Ю. М. Чижикова [38], полученные им в 1935 г. при прокатке полосы сечением 30×30 мм быстрорежущей стали на стане 300, аналогичны нашим.

Нагрев образцов Ю. М. Чижиков производил в нагревательной печи стана допель-дуо 300, служащей для промежуточного подогрева. Температура образцов определялась по температуре печи, измеряемой кружкой Сименса и оптическим пирометром Ручо. Число оборотов стана определялось тахометром.

Результаты исследования сведены в табл. 18.

По данным Ю. М. Чижикова показатель уширения быстрорежущей стали колеблется в пределах 0,3—0,70, а в отдельных случаях снижается до 0,3 и повышается до единицы. В условиях нашего опыта (см. табл. 17) показатель уширения быстрорежущей стали при прокатке на гладкой бочке с обжатием от 15 до 30% колеблется в пределах 0,5—0,80.

По данным Ю. М. Чижикова [38] уширение Δb уменьшается с увеличением скорости прокатки. Результаты его опытов совпали с выводами Метца [48].

Таблица 18

Влияние величины обжатия на уширение быстрорежущей стали

Ширина полосы, мм		Уширение $\Delta b = B_1 - B_0$ мм	Высота полосы, мм		Линейное обжатие Δh , мм	Температура прокатки °С	Число оборотов валков в мин.	$\frac{\Delta b}{\Delta h}$	$\frac{\Delta b}{H_0} 100, \%$
до про-пуска	после про-пуска		до про-пуска H_0	после про-пуска H_1					
30,52	32,0	1,48	31,12	26,9	4,22	1100	235	0,351	13,5
30,52	38,84	8,32	31,12	17,24	13,88	1100	235	0,599	44,6
30,52	42,86	12,34	31,12	12,24	18,88	1100	235	0,653	60,6

При разных скоростях прокатки, но при одинаковых остальных условиях, как то: температура прокатки, линейное обжатие, Ю. М. Чижилов прокатал быстрорежущую сталь на стане дoppel-дуо 300. При этом были получены результаты, указанные в табл. 19.

Таблица 19

Уширение при прокатке быстрорежущей стали в зависимости от скорости прокатки

Ширина до про-пуска мм	Высота до про-пуска, мм	Температура °С	Число оборо-тов валков об/мин	Скорость прокатки м/сек	Ширина после про-пуска, мм	Высота после про-пуска, мм	Линейное об-жатие Δh , мм	Δb , мм	$\frac{\Delta b}{\Delta h}$
30,52	31,12	1100	170	2,48	32,5	26,78	4,34	1,98	0,456
30,52	31,12	1100	235	3,45	32,0	26,9	4,29	1,48	0,351
30,52	31,12	1100	285	4,18	31,32	26,78	4,34	0,80	0,184

Уменьшение показателя уширения $\frac{\Delta b}{\Delta h}$ с увеличением скорости прокатки объясняется тем, что с увеличением скорости прокатки уменьшается продолжительность неподвижного контакта и, в результате этого, уменьшается коэффициент трения.

Ю. М. Чижилов установил, что быстрорежущая сталь (табл. 18) дает почти такое же уширение, как и малоуглеродистая сталь. Для испытания им были взяты образцы из углеродистой стали (0,34% С; 0,28% Si; 0,50% Mn; 0,33% Ni; 0,15% Cr) и прокатаны в условиях, аналогичных условиям прокатки быстрорежущей стали. Температура прокатки 1100°, число оборотов валков 235 об/мин. Данные приведены в табл. 20.

Таблица 20

Влияние обжатия на уширение углеродистой стали

Высота полосы, мм		Ширина полосы, мм		Δh , мм	Δb , мм	$\frac{\Delta b}{\Delta h}$
до про-пуска	после про-пуска	до про-пуска	после про-пуска			
31,10	25,56	30,20	32,14	5,54	1,99	0,350
31,10	15,88	30,20	39,92	15,22	9,72	0,638
31,10	10,92	30,20	45,1	20,18	14,90	0,738

И. Я. Тарновский [46], изучая влияние окислы на величину коэффициента трения, установил, что показатель уширения при прокатке быстрорежущей стали марки Р18 с относительным обжатием 36% равен 0,68. Из этого следует, что и по данным И. Я. Тарновского быстрорежущая сталь имеет такое же уширение, как и углеродистая сталь. И. Я. Тарновский равенство уширения быстрорежущей и углеродистой сталей объясняет тем, что при горячей прокатке быстрорежущей стали требуется гораздо большее удельное давление, чем при прокатке углеродистой стали при одинаковой температуре и при прочих равных условиях. Этот фактор понижает коэффициент внешнего трения при прокатке быстрорежущей стали. Хром и, возможно, вольфрам и ванадий увеличивают коэффициент трения.

В результате на коэффициент трения влияют противоположно два фактора, вследствие чего он остается довольно близким к таковому при прокатке углеродистой стали.

8. Специфические особенности прокатки слитка быстрорежущей стали

При прокатке слитков быстрорежущей стали необходимо учитывать ее следующие специфические особенности:

- 1) наличие в литой структуре стали хрупкой ледебуритной эвтектики в виде сетки, окружающей твердый раствор с островками сорбитной структуры;
- 2) значительную склонность к хрупкому разрушению, особенно при температурах ниже 1100°;
- 3) резкое увеличение сопротивления деформации с увеличением скорости деформации;
- 4) большую чувствительность к резкому нагреву вследствие низкой теплопроводности стали;
- 5) узкий температурный интервал пластичности стали;

6) склонность стали при малых обжатиях (менее 15%) к образованию внутренних разрывов и при обжатиях более 20% поверхностных рванин, особенно при температурах ниже 1000°;

7) склонность прибыльной части слитка, особенно круглого сечения, к отделению от тела слитка в процессе его прокатки;

8) затрудненность захвата металла валками при снижении температуры слитка, особенно ниже 1150°, а также резкое ухудшение условий захвата с увеличением числа оборотов валков;

9) значительное снижение пластичности стали в условиях неравномерной деформации, особенно при температурах ниже 1100°;

10) большие трудности выполнения требования ГОСТ 5952—51 по карбидной неоднородности;

11) склонность быстрорежущей стали к обезуглероживанию при увеличенном угаре металла, достигающем до 5,5% от веса слитка;

12) склонность стали к образованию закалочных трещин.

III. КАЛИБРОВКА ВАЛКОВ ДЛЯ ПРОКАТКИ БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ

Требования, предъявляемые к рациональной калибровке валков для прокатки заготовки и сорта быстрорежущей стали, сводятся к следующему.

1. Соответствие профиля и размеров сечения нормам, установленным для круглого и квадратного профилей (ГОСТ 5650—51) и для полосы (ГОСТ 4405—48).

2. Соответствие балла по карбидной неоднородности нормам, установленным ГОСТ 5952—51.

3. Возможно минимальные затраты энергии, валков и времени на прокатку одной тонны годного проката.

4. Минимальные потери металла по вине калибровки от брака следующих видов:

- а) поверхностных рванин;
- б) внутренних разрывов;
- в) свертышей, закатов и др.

5. Рациональное распределение калибров на бочке валков, обеспечивающее удобство в работе и планировании прокатки всего сортамента стана с минимальными простоями на перевалки и настройки стана.

Наиболее важными из указанных требований следует считать те, которые связаны с получением проката высокого качества и уменьшением потерь дорогостоящей быстрорежущей стали по вине калибровки. Поэтому все рассматриваемые ниже калибровки оцениваются, главным образом, по результатам потерь металла от брака при прокатке.

Все анализируемые калибровки оцениваются по основным показателям, позволяющим характеризовать условия деформации металла при прокатке. К таким показателям относятся следующие:

Высотная деформация	$\eta = \frac{H}{h}$
Линейное обжатие, мм	$\Delta h = H - h$
Относительная высотная деформация, %	$u = \frac{H - h}{H} \cdot 100$
Относительное обжатие, %	$a = \frac{\omega_0 - \omega_1}{\omega_0} \cdot 100$
Коэффициент вытяжки	$\mu = \frac{\omega_0}{\omega_1}$

Угол захвата, град.	$\alpha = 57,3 \sqrt{\frac{\Delta h}{R}}$
Средний коэффициент вытяжки	$\mu_{\text{ср}} = \sqrt[n]{\mu_{\text{об}}}$
Секундное растяжение, мм/сек	$\psi' = \frac{\pi n}{60} (D'_p - D''_p)$
Выпуск калибра, %	$\varphi = \frac{B_1 - B_2}{2h} 100$
где B_1 — ширина у дна калибра; B_2 — ширина калибра у разъема валков; h — глубина вреза.	
Отношение толщины полосы к ее ширине	$\frac{H}{B}$
Отношение толщины задаваемой полосы к рабочему диаметру	$\frac{H}{D_p}$
Радиус закруглений в глубине ручья, мм	R_1
Радиус притупления на буртах, мм	R_2

1. Калибровка валков для прокатки слитков

Формы и размеры слитков

На большинстве металлургических заводов быстрорежущую сталь разливают в изложницы круглой формы и, в редких случаях, квадратной формы.

Вес и размеры слитков быстрорежущей стали приведены в табл. 21.

Таблица 21

Вес и размеры слитков быстрорежущей стали

Вес слитка с прибылью кг	Размеры слитка, мм			Конусность %	Форма сечения слитка
	нижний диаметр	верхний диаметр	длина до прибыли		
200	160	230	640	5,47	Круглая
327	190	280	770	5,84	»
100	130	175	600	3,75	»
250	205	255	750	3,33	»
230	165	225	650	4,61	Квадратная
540	255	305	920	2,71	Круглая
1000	360	400	670	2,99	»
700	360	390	650	2,31	»

Пригодность слитка быстрорежущей стали к прокатке прежде всего определяется качеством макроструктуры слитка. В макроструктуре слитка должны отсутствовать:

- 1) пористость как общая, так и центральная;
- 2) центральная рыхлость и в особенности нарушения сплошности;
- 3) подкорковые пузыри и инородные включения;
- 4) пустоты усадочного происхождения ниже прибыльной части слитка;
- 5) ярко выраженные паукообразные пустоты, расположенные вблизи прибыльной части слитка.

Макроструктура слитков, применяемых для прокатки, не удовлетворяет полностью этим требованиям, что объясняется природой литой быстрорежущей стали и несовершенством техники разлива стали.

Макроструктура слитков, прокатываемых на обжимных станах, показана на рис. 39, 40 и 41. Такая макроструктура считается удовлетворительной, хотя в центре этих слитков имеется рыхлость. Металл, расположенный на значительном расстоянии от поверхности слитков, плотный, без пузырей и инородных включений. Паукообразные пустоты расположены на значительном расстоянии от прибыльной части слитка и поэтому не представляют больших опасений с точки зрения отделения головной части его при прокатке.

Значительной разницы между макроструктурой круглых и квадратных слитков не наблюдается.

Наиболее рациональной формой слитка следует считать квадратную.

Слиток квадратного сечения при всех равных условиях имеет целый ряд преимуществ по сравнению со слитком круглой формы. К основным из них относятся следующие:

- 1) вероятность образования продольных трещин при охлаждении металла в изложнице резко уменьшается;
- 2) степень неравномерной деформации в ящичном калибре значительно снижается (см. рис. 31);
- 3) захват металла валками в ящичных калибрах облегчается, что следует также из формулы (15);
- 4) при прокатке слитка образование внутренних разрывов менее вероятно (стр. 76);
- 5) затрудняется образование поверхностных рванин при прокатке слитка в ящичных калибрах с ограниченным уширением;
- 6) складирование и транспортировка на рольганге удобнее.

Данные, указанные выше, подтверждаются заводской практикой. По предложению А. А. Протасова, Н. А. Ширяева и Т. Т. Петовой на одном из наших заводов было отлито более 2000 слитков квадратного сечения и прокатано до квадрата 85×85 мм на обжимном стане трио 600. Результаты прокатки подтвердили целесообразность отливки слитков в изложницы квадратного сечения.

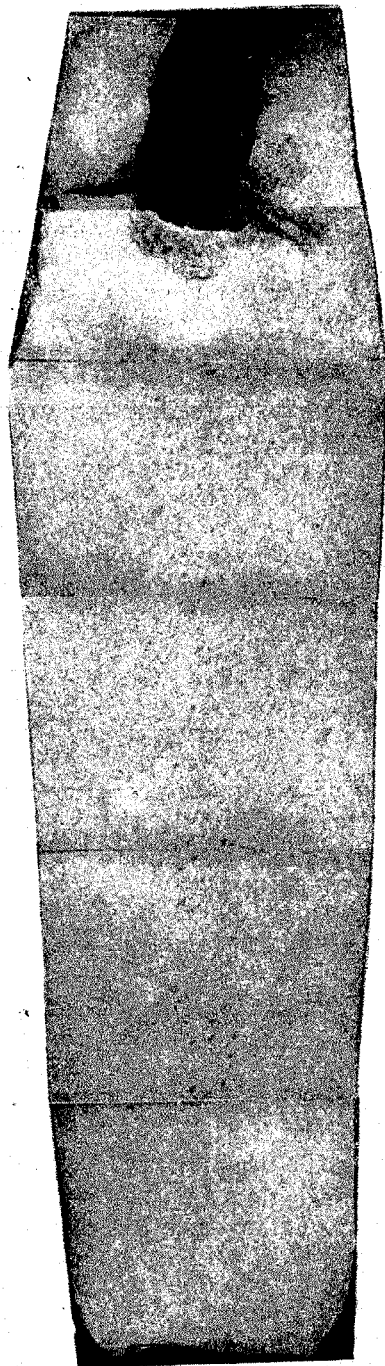


Рис. 39. Макроструктура квадратного слитка весом 250 кг стали марки Р18 (продольное сечение)

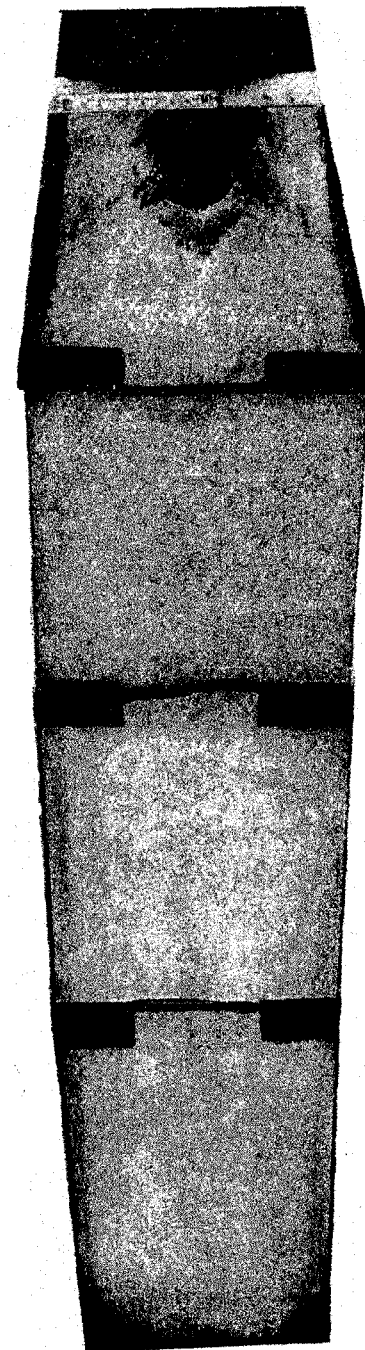


Рис. 40. Макроструктура круглого слитка весом 200 кг стали марки Р9 (продольное сечение)

Анализ калибровок

Рассмотрим семь вариантов калибровки. Эти калибровки применялись на заводе при прокатке быстрорежущей стали в той же последовательности, в какой мы их будем рассматривать.

К а л и б р о в к а № 1 (рис. 42) состоит из комбинации двенадцати ящичных, четырех ромбических (с углом 92°) и двух квадратных калибров, размещенных на бочке валков первой клетки трио обжимного стана 600. Размеры слитка стали марок Р18 и Р9 приведены ниже, мм:

Высота:

слитка (без прибыли) 640
прибыли 240

Диаметр:

верха слитка 230
низа » 160
верха прибыли 165

Слитки стали марки Р18 прокатывали с двумя промежуточными подогревами, а слитки стали марки Р9— с одним; число оборотов валков не превышало 50 об/мин. Вращение валков осуществлялось от мотора мощностью 1200 л. с. с числом оборотов 300/600 об/мин через редуктор с передаточным числом 8 и шестеренную клеть. Число оборотов валков может изменяться в пределах 37,5—75 об/мин.

По калибровке № 1 в основном прокатывали высоколегированные стали, в том числе такие, как: силхромовую с содержанием до 9,5% Сг; 3,2% Si и 0,5% С; магнитную с содержанием 0,5—0,6% С; 5,0—6,5% W; хромовольфрамовую с содержанием до 9% W; 2,7% Сг; высокоуглеродистую с содержанием до 1,4% С и др.

Результаты расчетов основных величин, характеризующих калибровку № 1, приведены в табл. 22.

Прокатка слитков быстрорежущей стали по калибровке № 1 не дала положительных результатов. Слитки, по данным Ю. М. Чижикова, в первых опытах нагревали 5—6 час., что явно недостаточно, так как в результате непрогрева металла в первых же пропусках на слитках появлялись поперечные трещины, при дальнейшей прокатке размеры их увеличивались. Результаты прокатки были улучшены за счет увеличения продолжительности нагрева металла до 20—30 час. При прокатке в первых пропусках на слитках появлялись небольшие трещины, но начиная с восьмого калибра трещины появлялись по углам полосы; при дальнейшей прокатке металл разрушался.

После применения подогрева в течение 15—25 мин. раската размером 142×142 мм результаты прокатки улучшились, так как

Рис. 41. Макроструктура квадратного слитка весом 235 кг стали марки Р9 (продольное сечение)

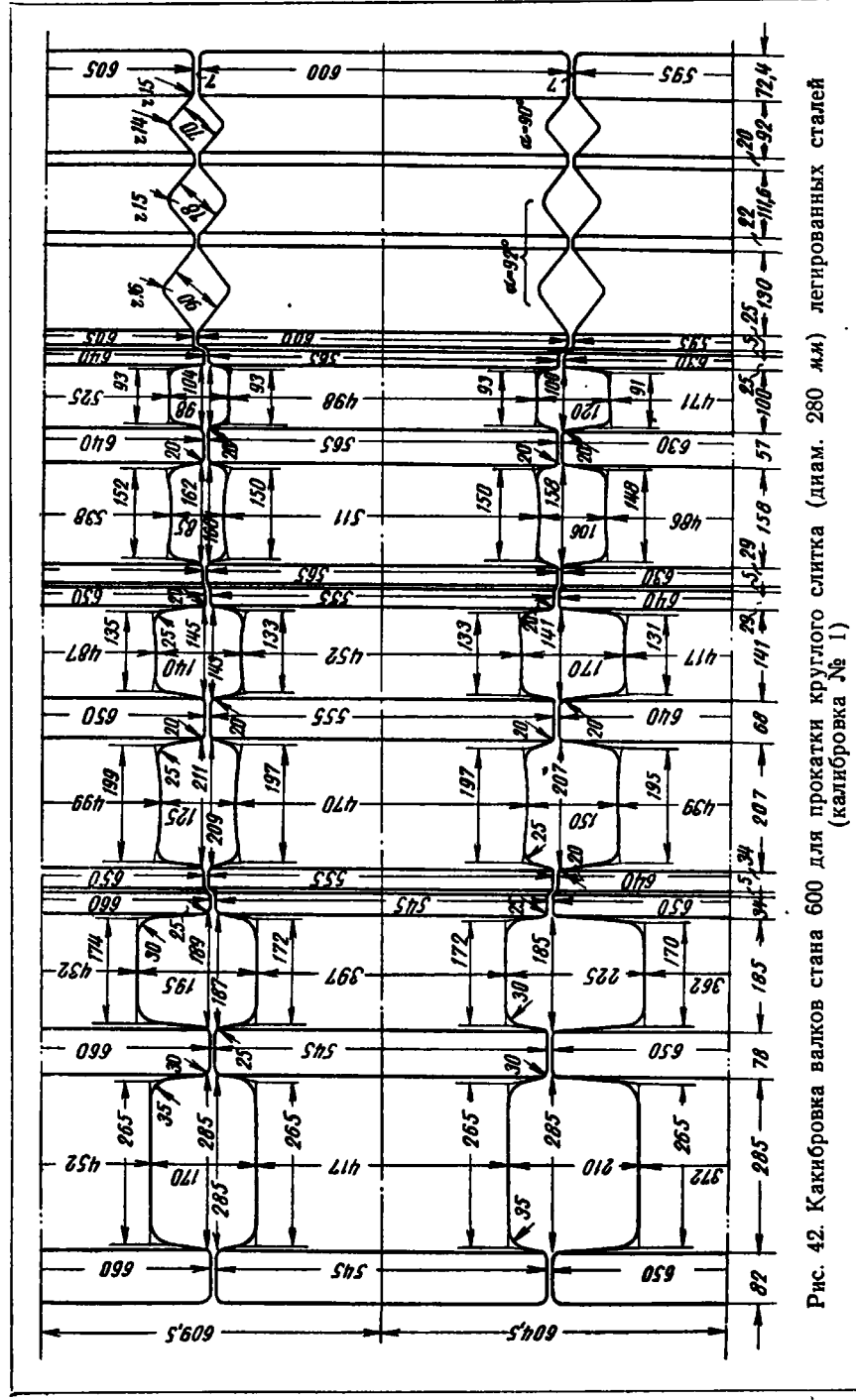


Рис. 42. Какировка валков стана 600 для прокатки круглого слитка (диам. 280 мм) легированных сталей (калибровка № 1)

Таблица 22

Анализ калибров № 1

№ калиб-ра	Форма калиб-га	γ	μ	α	ψ' мм/сек	$\frac{H}{B}$	Δh мм	σ %	σ %	ρ_1 мм	ρ_2 мм	$\frac{H}{D_p}$
1	Ящичный	1,095	1,01	18,2	0,317	117,9	0,905	0,48	7,2	35	30	0,583
2	»	1,235	1,05	24,4	0,426	117,9	0,717	4,6	10,1	35	30	0,478
3	»	1,053	1,09	14,5	0,253	91,7	1,301	8,6	5,2	30	25	0,819
4	»	1,154	1,07	21,9	0,382	91,7	1,124	6,7	6,6	30	25	0,542
5	»	1,180	1,15	19,7	0,344	81,2	0,739	13,1	5,0	25	20	0,428
6	»	1,200	1,16	18,3	0,319	76,0	0,603	13,7	7,9	25	20	0,309
7	»	1,217	1,13	23,3	0,406	91,7	1,297	11,1	4,5	25	20	0,483
8	»	1,214	1,17	20,6	0,360	91,7	1,022	14,7	6,1	25	20	0,405
9	»	1,292	1,21	20,2	0,352	65,5	0,726	17,2	7,1	25	20	0,281
10	»	1,247	1,20	16,2	0,283	70,7	0,563	17,0	9,8	25	20	0,202
11	»	1,258	1,18	20,5	0,358	70,7	1,318	15,9	5,7	25	—	0,332
12	»	1,228	1,19	16,3	0,293	70,7	1,054	16,2	9,5	25	—	0,234
13	Ромбический	1,067	1,177	10,5	—	—	—	8	—	—	—	—
14	»	1,100	1,098	17,6	—	—	—	24	—	—	—	—
15	Квадратный	1,104	1,20	11,1	—	—	—	14	—	—	—	—

Примечание. Средний коэффициент вытяжки $\mu_{ср} = 1,137$.

уменьшилось общее количество трещин и их размеры, но на большинстве слитков во время прокатки все еще образовывались рванины, а некоторые слитки целиком разваливались.

Средний коэффициент вытяжки при прокатке слитка начиная с пятого калибра равен 1,17, а с первого 1,137.

Калибровка № 1 характеризуется следующими существенными недостатками:

1. Прокатка слитка круглого сечения в первых ящичных калибрах производится в условиях ярко выраженной неравномерной деформации.

2. Из 12 ящичных калибров в семи калибрах (1—8) угол захвата (в радианах) оказался меньше отношения $\frac{H}{D}$ или $\Delta h < \frac{H^2}{2D}$, поэтому в центральной части слитка могут возникать растягивающие напряжения.

3. В первых ящичных калибрах слиток деформируется в условиях свободного уширения, так как эта калибровка рассчитана для прокатки слитка диаметром 280 мм.

4. Отмечается неравномерный характер распределения вытяжек по пропускам (рис. 43).

5. Значение среднего коэффициента вытяжки велико.

6. Прокатка в последних ромбических калибрах способствует появлению растягивающих напряжений в горизонтальных углах ромба вследствие неравномерной высотной деформации по ширине калибра и изменения скорости прокатки от вершины ромба до разъема валков.

Острые углы охлаждаются быстро даже в ромбе крупного сечения, вследствие чего пластичность металла быстро уменьшается и на ребрах полосы образуются рванины.

7. Во всех ящичных калибрах секундное растяжение колеблется от 70,7 до 117,7 мм/сек вместо практически рекомендуемого 40—60 мм/сек. Значительная величина секундного растяжения способствует возникновению растягивающих напряжений в металле и ухудшению условия эксплуатации муфт, шпинделей и других деталей стана.

8. В третьем пропуске слиток деформируется в весьма неудовлетворительных условиях, так как

$$\frac{H}{D} = 1,301 \quad \text{и} \quad u = 5,1\%.$$

В том случае, когда $\frac{H}{D} > 1$ и $u < 15\%$, деформация не распространяется до центра слитка, и большая часть металла, находящаяся в средних частях полосы, не деформируется от действия внешних сил, а принудительно увлекается деформируемыми частями, что приводит к возникновению растягивающих напряже-

ний в осевой зоне, а в периферийной зоне — сжимающих напряжений.

Калибровка № 2. После неудачной опытной прокатки круглого слитка быстрорежущей стали по калибровке № 1, была

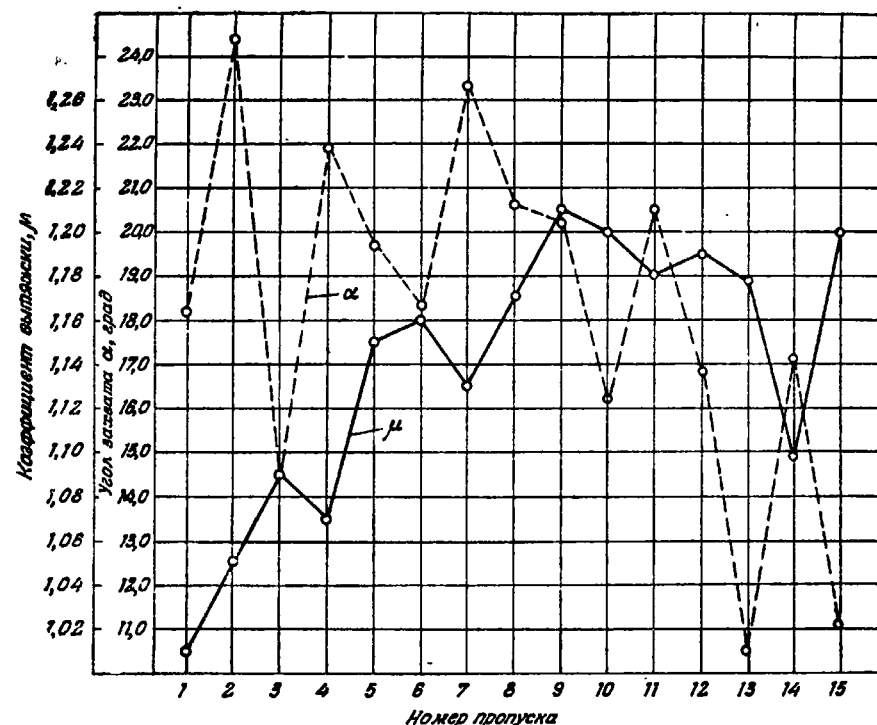


Рис. 43. Угол захвата и коэффициент вытяжки по пропускам (калибровка № 1)

спроектирована и опробована новая — калибровка № 2 (рис. 44), специально предназначенная только для прокатки слитков весом 200 кг стали марок Р9 и Р18.

Опытная прокатка слитков по этой калибровке также не увенчалась успехом: по углам полосы появлялись рванины, которые по мере уменьшения сечения увеличивались, что в конечном итоге приводило профиль к браку.

Чтобы установить причины образования рванин при прокатке слитка по калибровке № 2, воспользуемся основными данными, характеризующими ее (табл. 23).

Принципиально калибровка № 2 ничем не отличается от калибровки № 1, так как в обоих случаях как форма калибров, так и число их одинаково. Калибровка № 2 состоит так же, как и ка-

либровка № 1, из двенадцати ящичных, двух ромбических и одного квадратного калибра. В обоих случаях коэффициенты вытяжек по пропускам распределены неравномерно (рис. 45).

Слиток круглого сечения по обеим калибровкам в четырех первых ящичных калибрах прокатывается в условиях неравно-

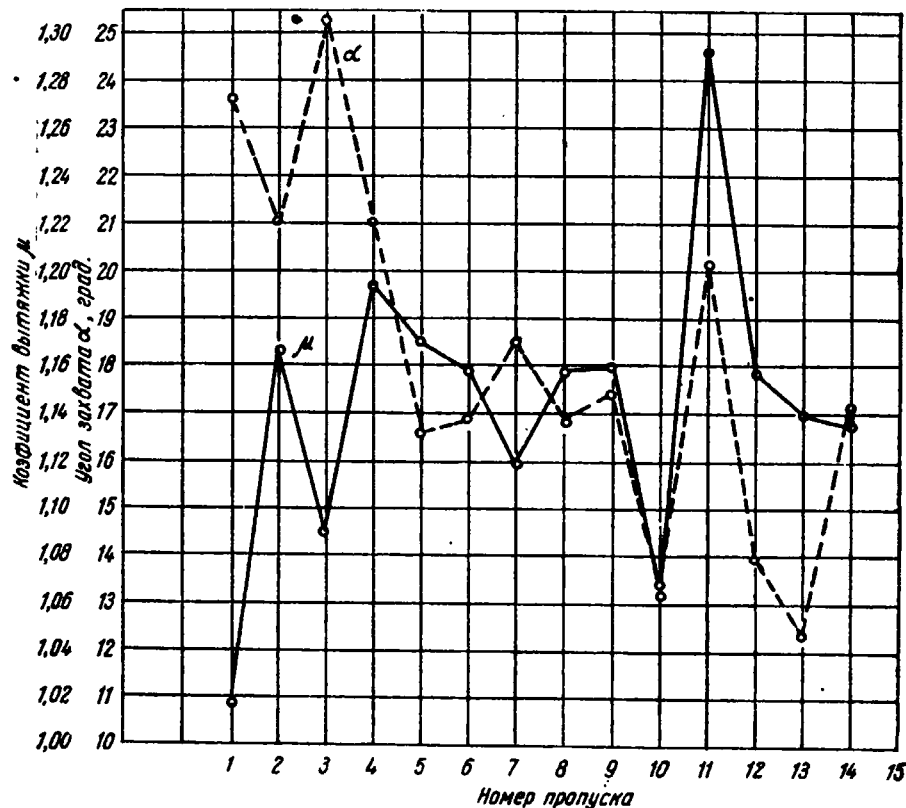


Рис. 45. Угол захвата и коэффициент вытяжки по пропускам (калибровка № 2)

мерной деформации. Это приводит к вынужденной деформации части объема слитка с возникновением при этом в ней растягивающих напряжений и рванин.

Однако калибровка № 2 имеет некоторое преимущество перед калибровкой № 1, заключающееся в том, что она проектировалась специально для прокатки круглого слитка быстрорежущей стали и поэтому размеры по ширине первых ящичных калибров задавались такие, при которых простор на уширение получался

значительно меньше, чем в первых ящичных калибрах калибровки № 1.

Необходимо отметить, что ящичные калибры, построенные с достаточным простором на уширение для круглого слитка, нельзя считать рациональными для прокатки малопластичной быстрорежущей стали. При пятикратной вытяжке слитка в ящичных калибрах качество поверхности быстрорежущей стали оказывается неудовлетворительным ввиду наличия поверхностных рванин главным образом по ребрам полосы.

В калибровке № 2 в последних пропусках, начиная с девятого, слиток прокатывается с меньшим коэффициентом вытяжки по сравнению с калибровкой № 1, но не настолько, чтобы вытяжка соответствовала пластичности быстрорежущей стали при температуре конца прокатки, особенно в 11-м пропуске, в котором коэффициент вытяжки слишком велик ($\mu_{11} = 1,292$).

Таким образом, основные причины образования рванин при прокатке слитка по калибровке № 2 те же, что и при прокатке по калибровке № 1.

Калибровка № 3. Неудовлетворительные результаты прокатки слитка быстрорежущей стали по калибровкам № 1 и № 2 заставили разработать третью, более рациональную схему прокатки слитка с использованием двух рабочих клетей стана 600.

По этой схеме слиток вначале прокатывался в первой клетке по калибровке № 1 (см. рис. 42) до полосы квадратного сечения (142×142 мм), а затем во второй клетке по системе круг — круг (рис. 46).

В связи с затруднениями при захвате полосы квадратного сечения (142×142 мм) в восьмигранном калибре (рис. 46) пришлось изменить размеры заготовки до сечения 125×142 мм, захват которой осуществлялся значительно легче. Заготовки данного размера получены в результате прокатки полосы по калибровке № 1 (рис. 46) с двумя дополнительными пропусками: одним холостым через калибр размером 150×207 мм и одним рабочим через калибр размером 125×209 мм. Заготовку сечением 125×142 мм прокатывали по системе круг — круг до круга диаметром 86 мм за 15 пропусков при среднем коэффициенте вытяжки 1,074. Прокатка большинства слитков проходила нормально. Данные анализа калибровки № 3 приведены в табл. 24.

Прокатка быстрорежущей стали по калибровке № 3 (система круг — круг) по сравнению с калибровками № 1 и № 2 производится в более благоприятных условиях деформации металла. Это подтверждается следующими данными.

1. Коэффициент вытяжки распределен по пропускам равномернее (рис. 47) и коэффициент высотной деформации η значительно меньше.

Анализ калибровки № 3

№ калиб- ра	Форма калибра	H мм	B мм	Δh мм	γ	μ %	ω_{n-1} см ²	ω_n см ²	μ	α		ψ' мм/сек	$\frac{H}{B}$
										градус	радиан		
1	Круглый	138	126	4,0	1,03	2,83	169	150	1,126	7,5	0,131	15,7	1,025
2	»	130	128	8,0	1,10	5,8	150	141	1,06	10,37	0,180	15,7	1,002
3	»	121,6	131	8,4	1,07	6,45	141	133,8	1,06	10,71	0,188	15,7	0,927
4	»	121,6	125	9,4	1,075	7,7	133,8	121,3	1,082	11,17	0,194	15,7	0,973
5	»	111,4	124,5	13,6	1,12	10,85	121,3	113,0	1,082	13,50	0,235	15,7	0,894
6	»	111,4	113,0	13,1	1,125	10,50	113,0	103,8	1,09	13,10	0,228	15,7	0,985
7	»	101,3	113,0	11,7	1,115	10,35	103,8	95,0	1,09	12,38	0,215	15,7	0,896
8	»	101,3	105	11,7	1,113	10,35	95,0	86,8	1,10	8,69	0,151	15,7	0,965
9	»	96,2	104	8,8	1,09	8,3	86,8	79,0	1,10	6,99	0,122	15,7	0,925
10	»	96,2	98,2	7,8	1,08	7,5	79,0	75,0	1,058	9,34	0,163	15,7	0,979
11	»	91,2	98,2	7,0	1,08	7,12	75,0	71,0	1,058	9,34	0,163	15,7	0,978
12	»	91,2	93,2	7,0	1,075	7,14	71,0	67,2	1,056	9,9	0,172	15,7	0,923
13	»	86,1	93,2	7,1	1,080	7,55	67,2	64,0	1,056	9,3	0,162	15,7	0,977
14	»	86,1	88,1	7,1	1,080	7,50	64,0	61,0	1,042	5,75	0,100	15,7	0,995
15	»	86,1	86,4	2,0	1,02	2,27	61,0	58,5	1,042				

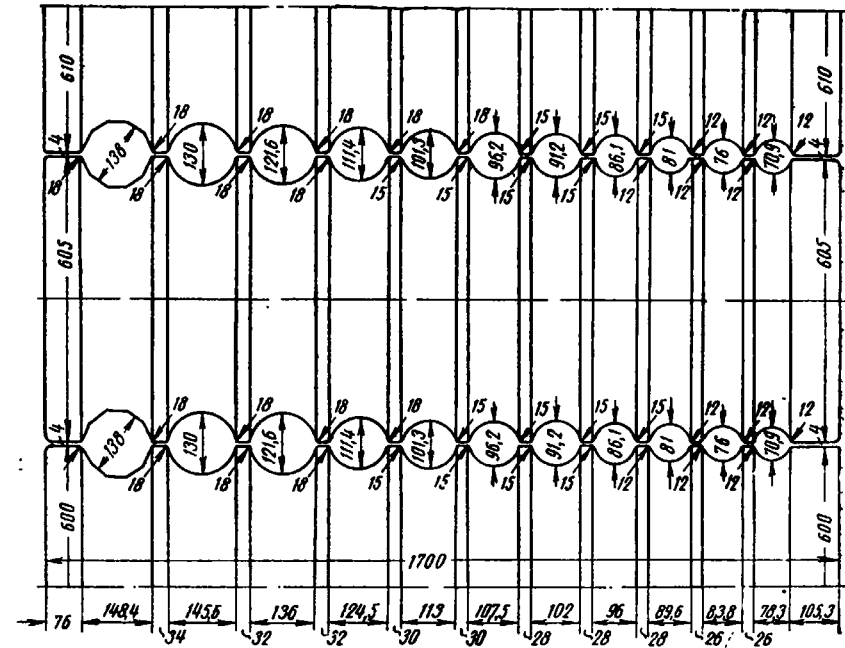
Примечание. Средний коэффициент вытяжки $\mu_{ср} = 1,074$.

Рис. 46. Калибровка валков второй клетки стана 600 (калибровка № 3).

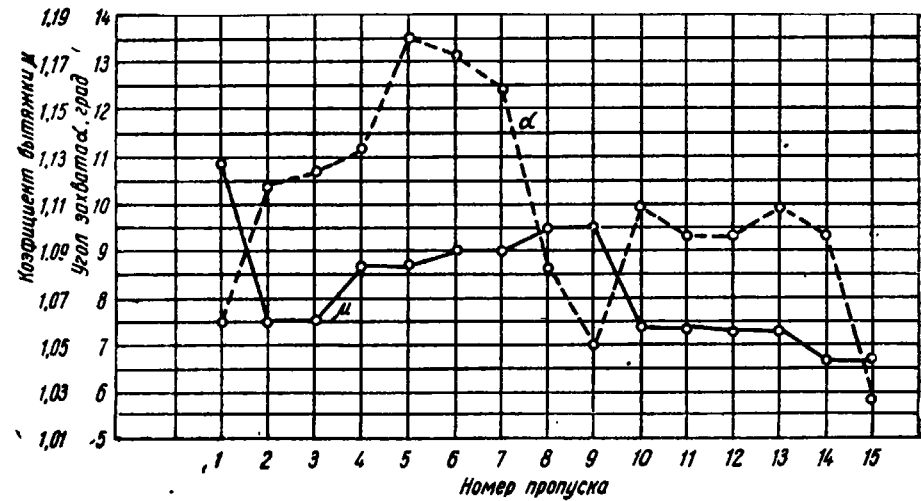


Рис. 47. Угол захвата и коэффициент вытяжки по пропускам (калибровка № 3).

2. Круглая форма калибра, как вогнутая форма калибра, обеспечивает согласованное действие горизонтальных сил P_x и T_x , направленных против движения деформируемого тела в поперечном направлении, что влияет на увеличение сопротивления деформации металла, а следовательно, и на сопротивление его против разрушения.

Наряду с достоинствами, калибровка № 3 имеет и недостатки, которые не позволяют применять ее для прокатки слитка, имеющего литую структуру. Прокатка же катаной или ковальной заготовки в круглых калибрах вполне допустима и гарантирует получение металла после деформации без внутренних разрывов.

Калибровка № 3 не получила практического применения вследствие неполного использования бочки валков первой и второй клетей. Кроме того, полоса после прокатки имела круглое сечение, что создавало большие затруднения при ее дальнейшей обработке.

Выявление недостатков калибровок 1—3 позволило создать более рациональную калибровку № 4.

К а л и б р о в к а № 4. Анализ этой калибровки (рис. 48) был произведен Ю. М. Чижиковым. Результаты его приведены в табл. 25.

Результаты прокатки по калибровке № 4 оказались достаточно удовлетворительными, но все же на значительном количестве прокатанных заготовок (83×83 мм) имелись поверхностные дефекты — рванины, которые зачищали на наждачных станках подвешного типа.

Слитки по калибровке № 4 прокатывали в течение нескольких лет. Она используется и в настоящее время с некоторым изменением, а именно: восьмигранный калибр (138 мм) заменен круглым (140 мм); размеры остальных круглых калибров соответственно увеличены (рис. 49).

К существенным недостаткам калибровки № 4 следует отнести:

1) повышенные коэффициенты вытяжки во втором и шестом пропусках (рис. 50);

2) неравномерная деформация круглого слитка в первых трех ящичных калибрах,

3) весьма неудовлетворительные условия деформации металла в седьмом калибре;

4) несимметричное расположение шестого ящичного калибра приводит к изгибу полосы, и, кроме того, на отдельных полосках получается подрез металла, что в последующих калибрах ведет к образованию заката;

5) затруднительная задача металла в седьмой и восьмой восьмигранные калибры, вызванная использованием для этой цели коробки, что приводило к подстуживанию металла. После заме-

Таблица 25

Анализ калибровки № 4

№ про- пуска	Размеры калибра мм	Высота по- лосы, мм		Сбжатие		ω мм ²	μ	α град.—мин.
		H	h	мм	%			
1	190×235	230	190	40	17,4	38800	1,07	23—42
2	155×235	190	155	35	18,4	31200	1,24	22—38
3	170×190	235	190	45	19,2	29000	1,08	26—56
4	—	Первый подогрев						
5	—	Холостой пропуск после первого подогрева						
6	155×171	190	155	35	18,4	23300	1,24	22—38
7	135×168	155	135	20	12,9	20300	1,14	16—46
8	133×140	168	133	35	20,8	17000	1,19	22—06
9	—	Холостой пропуск после второго подогрева						
10	—	То же						
11	138×148,4	133	144	—	—	15000	1,13	—
12	131,8×145,6	144	131,8	12,2	8,5	14100	1,06	12—02
13	131,8×145,6	135	131,8	3,2	2,47	13300	1,06	8—08
14	121,6×136	132,4	121,6	10,8	8,2	12315	1,08	12—12
15	121,6×136	133,6	121,6	12,0	9,0	11300	1,08	12—53
16	111,4×124,5	123,6	111,4	12,2	9,9	10380	1,09	12—47
17	111,4×124,5	123,6	111,4	12,2	9,9	9500	1,09	12—52
18	101,3×113,0	113,4	101,3	12,1	10,7	8680	1,10	12—38
19	101,3×113,0	113,4	101,3	12,1	10,7	7900	1,10	12—41
20	96,2×107,5	103,3	96,2	7,1	6,9	7500	1,06	9—36
21	96,2×107,5	102,5	96,2	6,3	6,15	7100	1,06	9—06
22	80	96,2	97,0	—	—	6100	1,17	—
23	80	103	97,0	—	—	6000	1,02	8—00

Примечание. Средний коэффициент вытяжки $\mu_{ср} = 1,107$.

ны восьмигранника черновым кругом результаты прокатки были значительно улучшены: температура конца прокатки повысилась и поверхность конечного профиля стала чище, без рванин.

Следует отметить, что прокатка по калибровке № 4 слитка квадратного сечения весом 230 кг по сравнению с прокаткой слитка круглого сечения весом 200 кг дала лучшие качественные показатели, а именно: из 2000 слитков квадратного сечения, прокатанных на квадрат 85×85 мм, не было ни одного случая брака по внутренним разрывам и поверхностным рванинам; при прокатке по калибровке № 4 слитка круглого сечения внутренние разрывы на квадрате 85×85 мм обнаруживались в отдельных случаях, а поверхностные рванины, особенно по ребрам квадрата, встречались чаще.

К а л и б р о в к а № 5. В целях увеличения выхода годного при прокатке слитка за счет уменьшения потерь металла от бра-

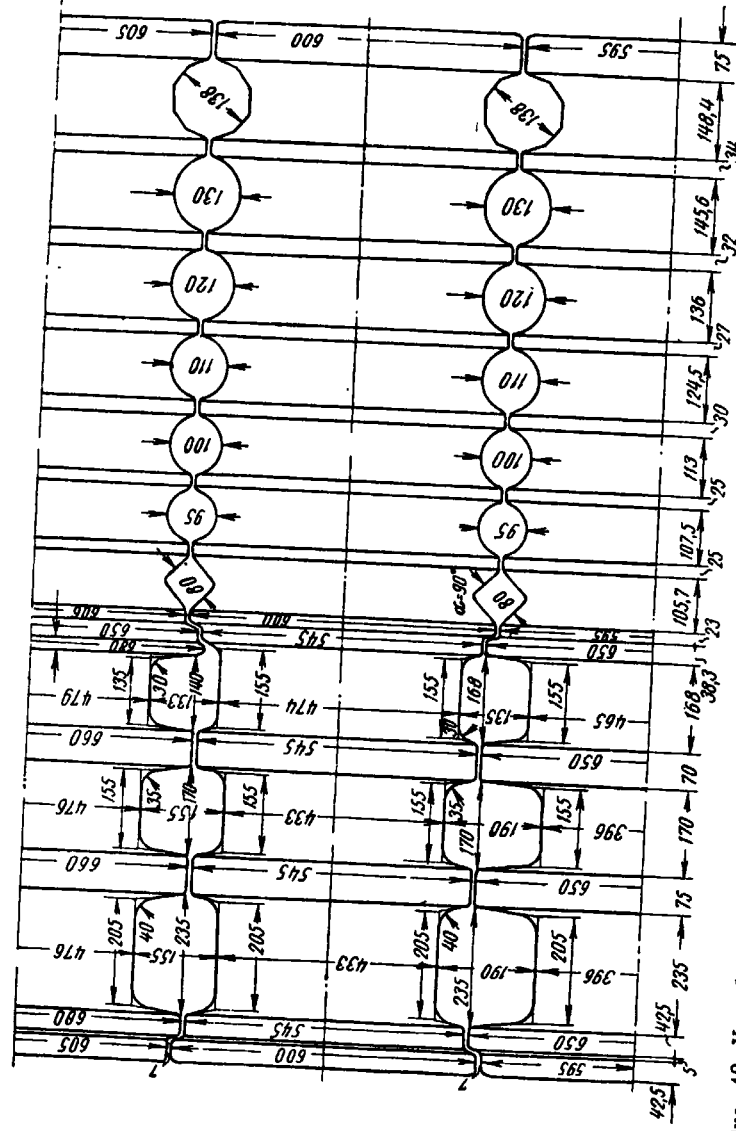


Рис. 48. Калибровка валков стана 600 для прокатки круглых слитков (диам. 230 мм) быстрорежущей стали (калибровка № 4)

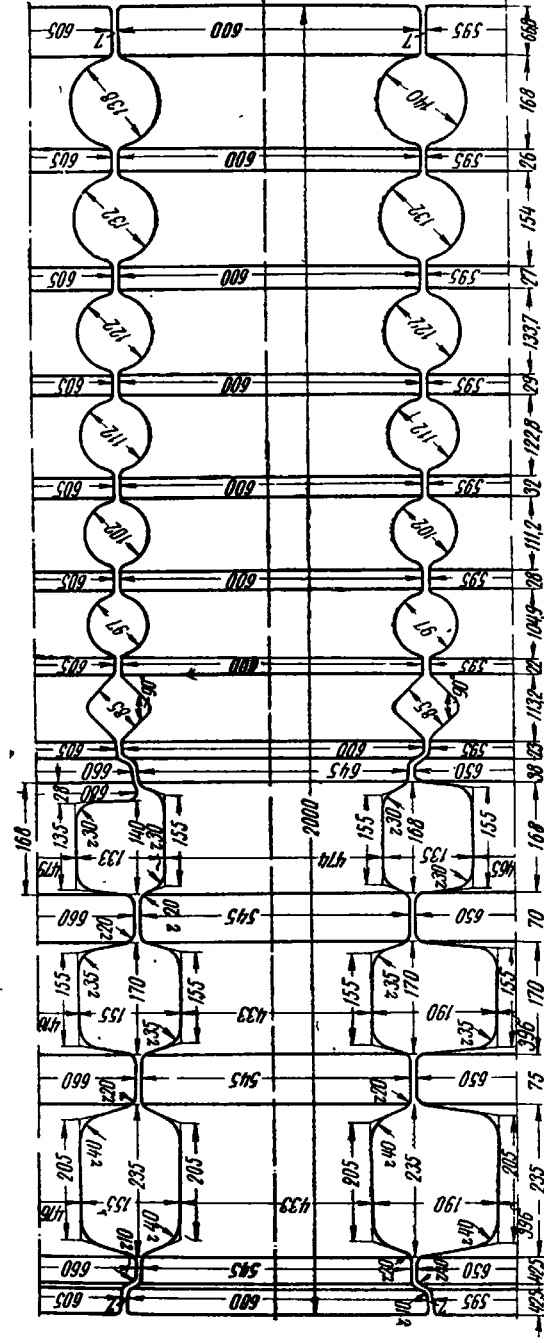


Рис. 49. Калибровка валков стана 600 для прокатки круглых слитков (диам. 230 мм) быстрорежущей стали (калибровка № 4, измененная)

ка по вине калибровки в 1944 г. была опробована калибровка № 5 (рис. 51), построенная по системе круг — круг, рекомендованная Ю. М. Чижиковым.

Прокатка слитка по системе круг — круг позволила резко улучшить качество поверхности заготовки (квадрат 83×83 мм). При этом выполнение норм выработки по зачистке заготовки быстрорежущей стали доходило до 300%, главным образом, благодаря отсутствию поверхностных дефектов. Вся работа в адъюстаже сводилась к контролю качества поверхности заготовки методом «змейки». Несмотря на резкое улучшение качества поверхности заготовки, все же пришлось от нее отказаться и возвратиться к калибровке № 4 из-за появления внутренних разрывов в заготовке. В связи с этим калибровка № 5 имеет только теоретический интерес.

Результат анализа калибровки № 5 приводится в табл. 26.

Таблица 26

Анализ калибровки № 5

№ про- пуска	Размеры ка- либра, мм	Высота полосы, мм		Обжатие		ω см ²	μ	α , град.
		H	h	мм	%			
1	210×242	230	210	20	8,7	386	1,075	13,8
2	210×242	234	210	24	10,2	354,2	1,13	14,0
3	192×221	215	192	23	10,7	324,0	1,093	13,4
4	192×221	215	192	23	10,7	297,7	1,088	13,2
5	176×203	197	176	21	10,6	272,2	1,093	12,6
6	176×203	197	176	21	10,6	250,1	1,088	12,0
7	161×185	181	161	20	11,04	227,3	1,10	12,1
8	161×185	180	161	19	10,55	208,5	1,09	12,0
9	147×169	165	147	18	10,9	189,1	1,10	11,3
10	147×169	164	147	17	10,36	175,4	1,08	11,0
11	133×153	147	133	14	9,5	159,6	1,096	9,7
12	133×153	153	133	20	13,1	142,0	1,12	11,7
13	120×138	136	120	16	11,7	130,0	1,09	10,3
14	120×138	138	120	18	13,0	118,0	1,10	11,1
15	109×123	125	109	16	12,0	105,2	1,12	10,2
16	109×123	123	109	14	11,3	97,5	1,078	9,6
17	101×112	114	101	13	11,4	88,8	1,098	9,1
18	101×112	112	101	11	9,8	74,0	1,20	8,3
19	Квадрат 84	110	105	5	4,54	60,0	1,23	5,7

Примечание. Площади круглых калибров по металлу подсчитаны по формуле $\omega = \frac{\pi}{4} bh$.

Из данных табл. 26 следует, что слиток деформируется по системе круг — круг при более равномерном распределении ко-

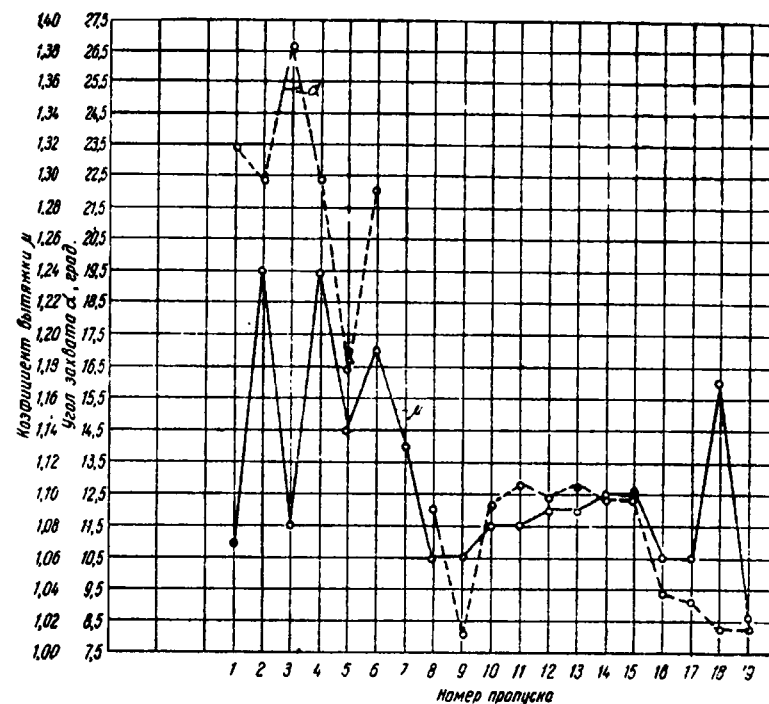


Рис. 50. Угол захвата и коэффициент вытяжки по пропускам (калибровка № 4)

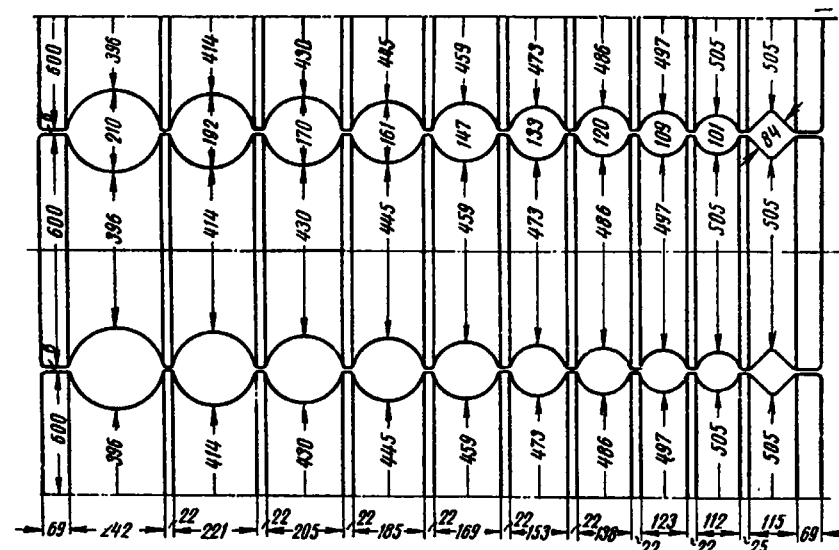


Рис. 51. Калибровка валков для прокатки круглых слитков (диам. 230 мм) быстрорежущей стали (калибровка № 5)

эффицентом вытяжки по проходам (рис. 52) и при меньших относительных обжатиях и углах захвата.

Для сопоставления основные характеристики рассмотренных калибровок приведены в табл. 27.

Из данных анализа этих калибровок можно сделать следующие выводы.

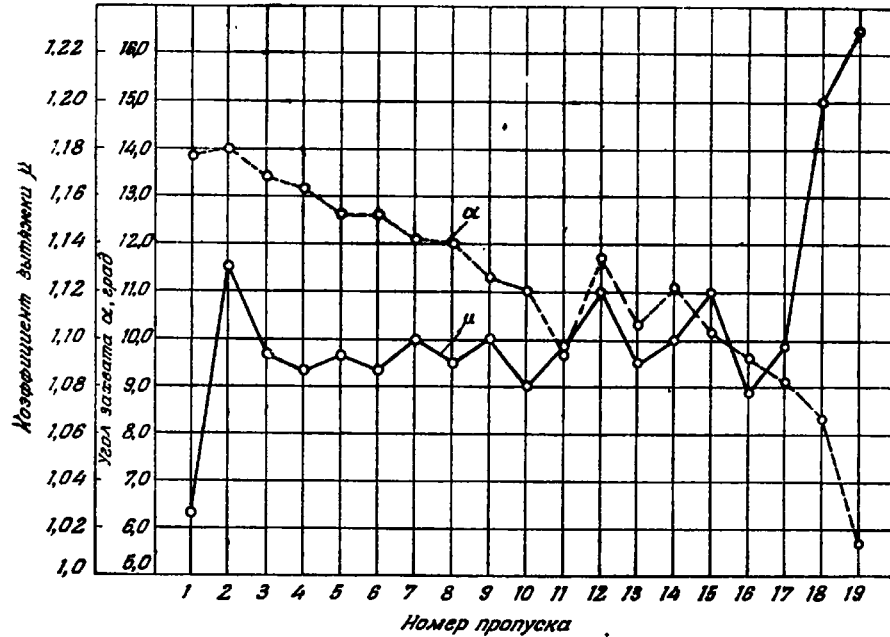


Рис. 52. Угол захвата и коэффициент вытяжки по пропускам (калибровка № 5)

1. Ввиду неравномерного охлаждения металла по сечению и быстрого остывания ребер ромбических полос при незначительном сопротивлении отрыву систему калибровки ромб — ромб нельзя считать рациональной, хотя ромбические калибры и являются более выгодными по сравнению с ящичными, рассчитанными без ограничения уширения, так как ромб способствует большему ужесточению условий объемного напряженного состояния при деформации.

2. Система калибровки круг — круг также нерациональна ввиду образования внутренних разрывов в сечении заготовки (квадрат 83×83 мм), прокатанной из круглого слитка весом 200 кг.

3. Систему калибровки ящик — ромб — квадрат нельзя считать рациональной по тем же причинам, что и систему ромб — ромб.

Таблица 27

Основные показатели калибровок № 1—5

№ про-пуска	Коэффициент вытяжки и при ка-либровке номер:					Угол захвата α , град., при калибровке номер:					Линейное обжатие Δh , мм, при калибровке номер:					Среднее растяжение ϕ , мм/сек, при калибровке номер:				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
1	1,01	1,017	1,126	1,07	1,026	18,2	23,7	1,5	23,7	13,8	20	35	4	40	20	117,9	91,4	11,1	96,6	0
2	1,05	1,166	1,06	1,24	1,13	24,4	21,0	10,37	22,63	14,0	40	30	8	35	24	117,9	91,4	11,1	112,2	0
3	1,09	1,09	1,06	1,08	1,093	14,5	25,3	10,71	26,93	13,4	12	40	8,4	45	23	91,7	91,4	11,1	96,6	0
4	1,07	1,193	1,082	1,24	1,088	21,9	21,0	11,17	22,63	13,2	30	30	9,4	35	23	91,7	91,4	11,1	112,2	0
5	1,15	1,17	1,082	1,14	1,093	19,7	16,6	13,50	16,77	12,6	27	22	13,6	20	21	81,2	86,1	11,1	23,5	0
6	1,16	1,158	1,09	1,19	1,088	18,3	16,8	13,10	22,10	12,6	25	21	13,1	35	21	76,0	65,3	11,1	11,1	0
7	1,13	1,119	1,09	1,13	1,10	23,3	18,5	12,38	—	12,1	37	34	11,7	—	20	91,7	70,4	11,1	11,1	0
8	1,17	1,157	1,10	1,06	1,09	20,6	16,8	8,69	12,03	12,0	30	21	11,7	12,2	19	91,7	65,3	11,1	11,1	0
9	1,21	1,159	1,10	1,06	1,10	20,2	17,4	6,99	8,13	11,03	31	23	8,8	3,2	18	65,5	54,8	11,1	11,1	0
10	1,20	1,069	1,058	1,08	1,08	16,2	13,3	9,34	12,2	11,0	21	14	7,8	10,8	17	70,7	54,8	11,1	11,1	0
11	1,18	1,292	1,058	1,08	1,098	20,5	20,2	9,34	12,88	9,7	31	15	7,0	12,0	14	70,7	49,6	11,1	11,1	0
12	1,19	1,157	1,056	1,09	1,12	16,8	13,9	9,34	12,78	11,7	22	12	7,1	12,2	16	70,7	54,8	11,1	11,1	0
13	1,177	1,140	1,056	1,09	1,09	10,5	12,3	9,90	12,87	10,3	8	12	7,1	12,1	18	—	—	—	—	0
14	1,098	1,135	1,042	1,10	1,10	17,6	17,2	9,30	12,63	11,1	24	23	7,1	12,1	16	—	—	—	—	0
15	1,20	1,143	1,042	1,10	1,12	11,1	11,5	5,75	12,68	10,2	24	12	2,0	12,1	14	—	—	—	—	0
16	—	—	—	1,06	1,078	—	—	—	9,6	9,6	—	—	—	—	13	—	—	—	—	0
17	—	—	—	1,06	1,098	—	—	—	9,1	9,1	—	—	—	—	11	—	—	—	—	0
18	—	—	—	1,17	1,20	—	—	—	—	8,3	—	—	—	—	5	—	—	—	—	0
19	—	—	—	1,02	1,23	—	—	—	8,47	5,7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0

4. Наиболее удовлетворительной оказалась калибровка, построенная по системе ящик — круг — квадрат, хотя и она имеет недостатки, а именно в ящичных калибрах:

- а) довольно большое секундное растяжение (112,2 мм/сек);
- б) завышенный коэффициент вытяжки (1,24) и увеличенный угол захвата (26,93°).

Тенденция отдельных калибровщиков проектировать калибровки с более интенсивными обжатиями и с использованием ящичных калибров в сочетании с ромбическими не привела к положительным результатам, так как при прокатке круглых слитков быстрорежущей стали по этой калибровке выход годного, по данным инж. И. В. Шуралева, составлял не более 74% вместо 76%-ного, полученного на другом заводе при прокатке по калибровке № 4.

К а л и б р о в к а № 6. Исходя из требований, предъявляемых к рациональной калибровке валков для прокатки слитков быстрорежущей стали, [В. О. Белозеров] составил проект шестого варианта калибровки (рис. 53).

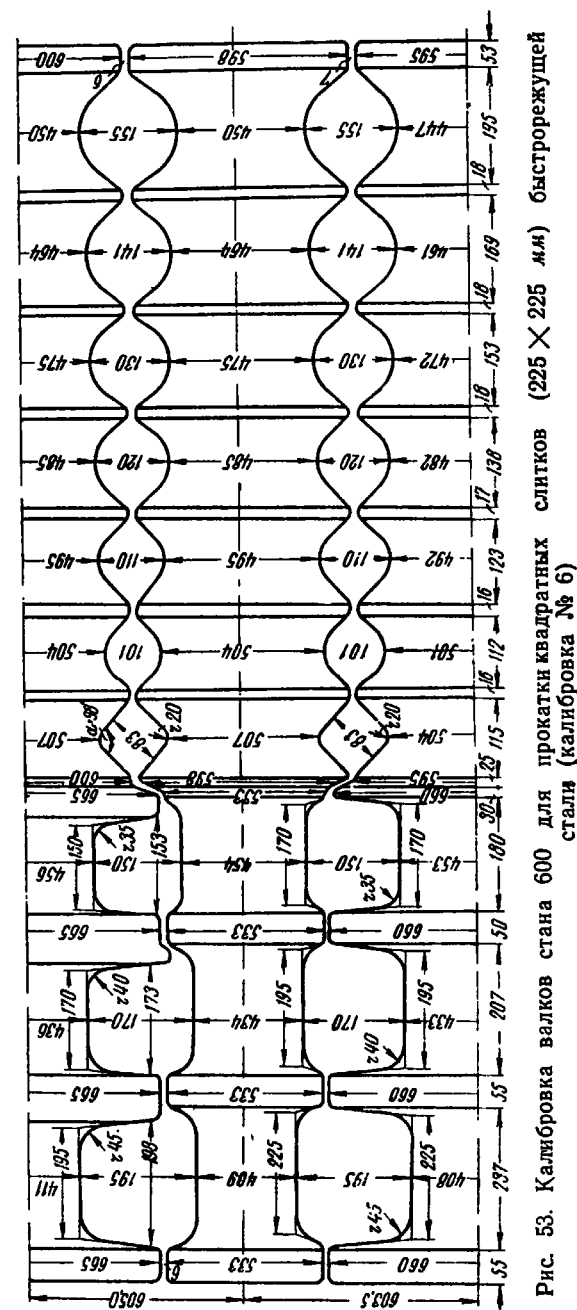
В условиях производства калибровка № 6 не была опробована. Несмотря на это, она все же представляет значительный интерес, так как автор сумел учесть все требования, предъявляемые к рациональной деформации малопластичных сталей и сплавов.

Результаты анализа калибровки № 6 приведены в табл. 28.

Калибровка № 6, рассчитанная на прокатку слитка квадратного сечения (225×225 мм), имеет следующие достоинства по сравнению с калибровками № 1—5: более равномерно распределен коэффициент вытяжки по пропускам (рис. 54): небольшое секундное растяжение (менее 7,53 мм/сек); ящичные калибры построены с выпуском, не превышающим 5,28%; во всех ящичных калибрах отношение высоты к ширине менее единицы ($\frac{H}{D} < 1$); углы захвата обеспечивают нормальную работу вальцовщиков при ручной задаче слитка в калибр.

Единственный недостаток калибровки № 6, который не может служить основанием к ее забракованию, — необходимость кантовки полосы после каждого пропуска.

К а л и б р о в к а № 7. В целях ликвидации брака по внутренним разрывам, возникающего при прокатке круглых слитков быстрорежущей стали, особенно стали марки Р18, и увеличения производительности прокатного стана на одном из наших заводов в последнее время внедрена в производство калибровка валков с использованием ящичных и ромбических калибров (рис. 55). По данным М. В. Шуралева, в результате внедрения этой калибровки в производство ликвидирован брак по внутренним надрывам, а выход годного увеличен до 72—74%.



Анализ калибровки № 6

№ по- пуска	Форма калибра	η	μ	α	ψ' мм сек	$\frac{H}{B}$	Δh мм	α %	φ %	r_1 мм	r_2 мм	$\frac{H}{D_p}$
				градус	ра- диан							
1	Ящичный	1,154	1,13	21,9	0,381	0,844	30	12,0	4,76	45	30	0,559
2	»	1,179	1,13	23,6	0,411	0,911	35	11,9	1,18	45	30	0,549
3	»	1,147	1,14	19,5	0,339	0,850	25	12,7	5,28	40	25	0,450
4	»	1,200	1,17	23,0	0,400	0,944	34	14,3	1,304	40	25	0,469
5	»	1,139	1,13	17,0	0,296	0,857	20	15,3	4,41	35	20	0,375
6	»	1,173	1,13	19,5	0,339	0,990	26	11,6	1,43	35	20	0,386
7	Круглый	—	1,19	21,0	0,365	—	—	15,9	—	—	—	—
8	»	1,099	1,16	14,0	0,244	—	14	13,7	—	—	—	—
9	»	1,085	1,05	13,0	0,226	—	12	4,2	—	—	—	—
10	»	1,100	1,13	13,0	0,226	—	13	11,4	—	—	—	—
11	»	1,100	1,04	14,0	0,244	—	13	3,9	—	—	—	—
12	»	1,091	1,11	12,5	0,218	—	11	10,1	—	—	—	—
13	»	1,091	1,05	13,0	0,226	—	12	5,0	—	—	—	—
14	»	1,100	1,14	12,0	0,209	—	11	12,3	—	—	—	—
15	»	1,100	1,04	13,0	0,226	—	12	4,0	—	—	—	—
16	»	1,099	1,19	12,0	0,209	—	10	16,0	—	—	—	—
17	»	1,108	1,02	12,0	0,209	—	11	2,6	—	—	—	—
18	Квадратный	1,052	1,19	—	—	—	—	16,5	—	—	—	—
19	»	1,080	1,04	—	—	—	—	4,0	—	—	—	—

Примечание. Средний коэффициент вытяжки $\mu_{ср} = 1,102$.

По калибровке № 4, действующей в настоящее время на одном из отечественных заводов, достигается при том же весе слитка выход годного 76—77,5%¹.

Таким образом, калибровка № 7 по выходу годного является нерентабельной, но она имеет определенное теоретическое значение, так как при ее анализе нетрудно установить причины

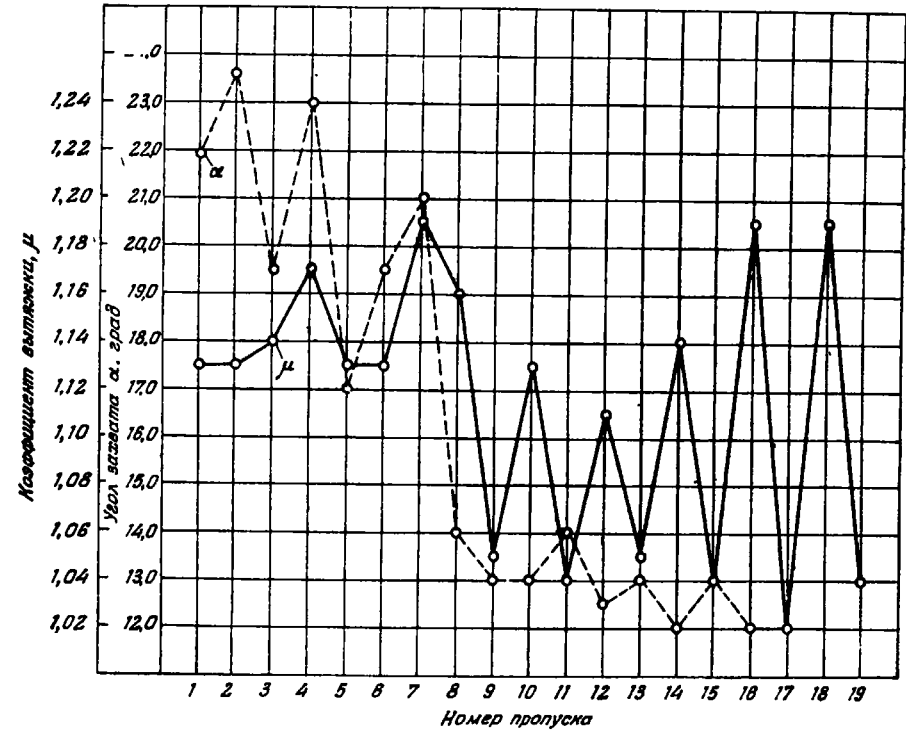


Рис. 54. Угол захвата и коэффициент вытяжки по пропускам (калибровка № 6)

устранения брака по внутренним надрывам и понижения выхода годного. Данные анализа калибровки № 7 приведены в табл. 29.

Калибровка № 7 имеет некоторое сходство с калибровкой № 2. Обе калибровки построены для прокатки слитков одного и того же размера с использованием ящичных и ромбических калибров. Средний коэффициент вытяжки, как в калибровке № 7, так и в калибровке № 2, одинаков ($\mu_{ср} = 1,142$).

Калибровка № 2 была опробована раньше калибровки № 7 на 20 лет. За этот довольно значительный период времени тех-

¹ Потери металла складываются из отходов на обрезь прибыльной части слитка (18%), из отходов на обрезь донной части слитка (1,5%) и угара (4,5%).

Таблица 29

Анализ калибровки № 7

№ про- пуска	Форма калибра	γ	u l_0	w_{n-1} с/с2	w_n с/с2	μ	α		ψ' мм/сек	$\frac{H}{B}$	Δh мм	a °/о	φ °/о	p_1 мм	p_2 мм	$\frac{H}{D_p}$
							градус	радиан								
1	Ящичный	1,24	20,6	415	374	1,11	26,62	0,463	61,25	—	47,8	9,87	—	20	25	0,522
2	»	1,15	13,3	374	338	1,105	18,48	0,322	66,15	—	25,0	9,62	—	20	25	0,401
3	»	1,34	25,5	338	286	1,18	29,5	0,513	46,55	1,053	60	15,38	12,7	30	20	0,528
4	»	1,13	11,3	286	255	1,12	16,6	0,289	56,35	0,897	20	10,84	16,2	30	20	0,375
5	»	1,23	22,1	255	222	1,15	20,3	0,353	46,55	0,850	38	12,94	20,8	30	20	0,368
6	»	1,15	12,7	222	195	1,14	15,27	0,266	46,55	0,723	18	11,89	28,6	0	20	0,281
7	»	1,26	24,9	195	163	1,20	18,99	0,330	56,35	1,019	42	16,41	17,5	30	15	0,345
8	»	1,18	15,6	163	137	1,187	16,23	0,282	51,45	0,830	21	15,95	27,0	30	15	0,261
9	»	1,18	19,4	137	119	1,148	17,47	0,304	12,25	0,91	26	13,13	29,5	25	15	0,261
10	Ромбический	1,25	17,0	119	102	1,173	17,53	0,305	—	—	24	14,28	—	—	—	—
11	»	1,30	19,8	102	87	1,173	19,48	0,339	—	—	29,8	14,71	—	—	—	—
12	»	1,44	29,3	87	75	1,164	23,98	0,417	—	—	44	13,79	—	—	—	—
13	»	1,30	20,6	75	66	1,135	18,3	0,318	—	—	27,4	14,66	—	—	—	—
14	Квадратный	1,35	21,1	66	58	1,130	19,75	0,344	—	—	32	12,12	—	—	—	—
15	»	1,19	12,1	58	55,9	1,02	13,9	0,242	—	—	16	1,9	—	—	—	—

Примечание. Средний коэффициент вытяжки $\mu_{cp} = 1,141$.

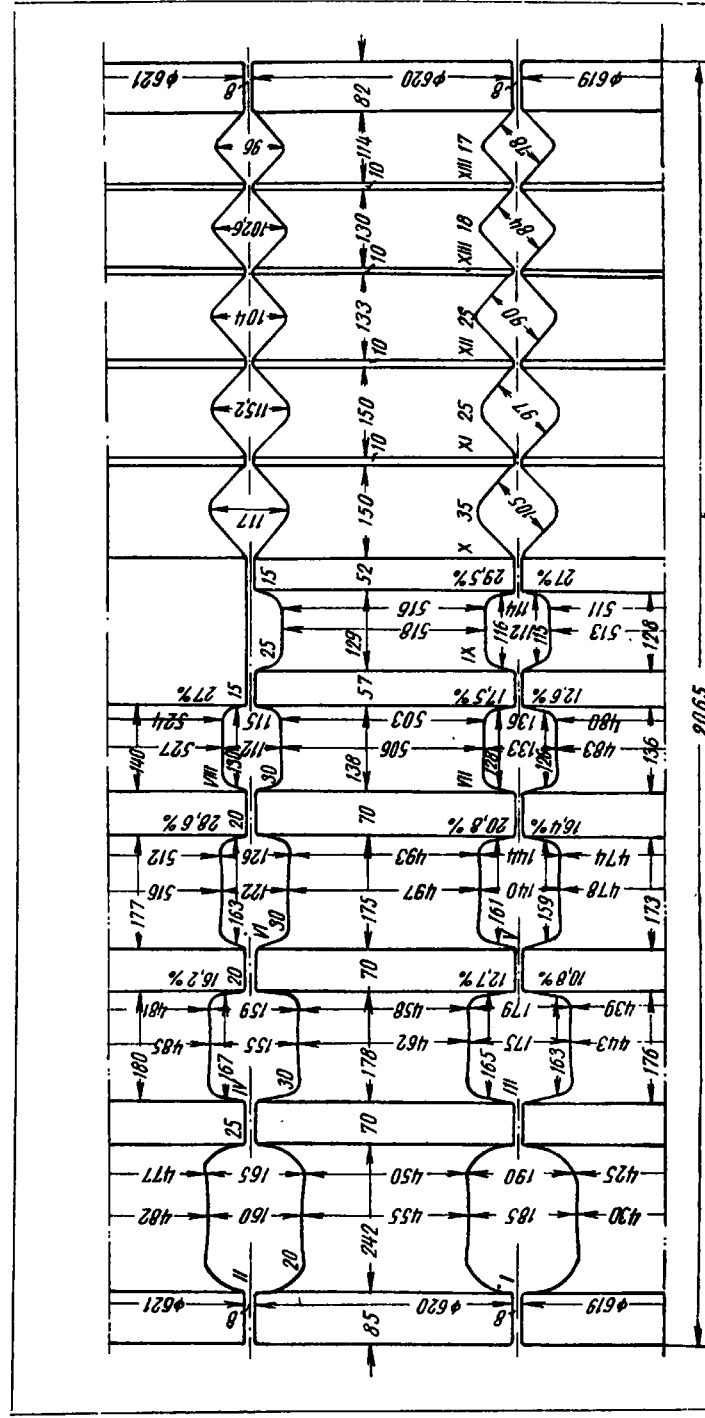


Рис. 55. Калибровка валков для прокатки круглых слитков (диам. 230 мм) быстрорежущей стали (калибровка № 7)

нология выплавки и разливки быстрорежущей стали была улучшена, а вместе с этим и качество слитка повышено, что позволило вновь вернуться к старой системе калибровки: ящик — ромб — квадрат, как к наиболее производительной по сравнению с прочими системами. Автором калибровки № 7 были учте-

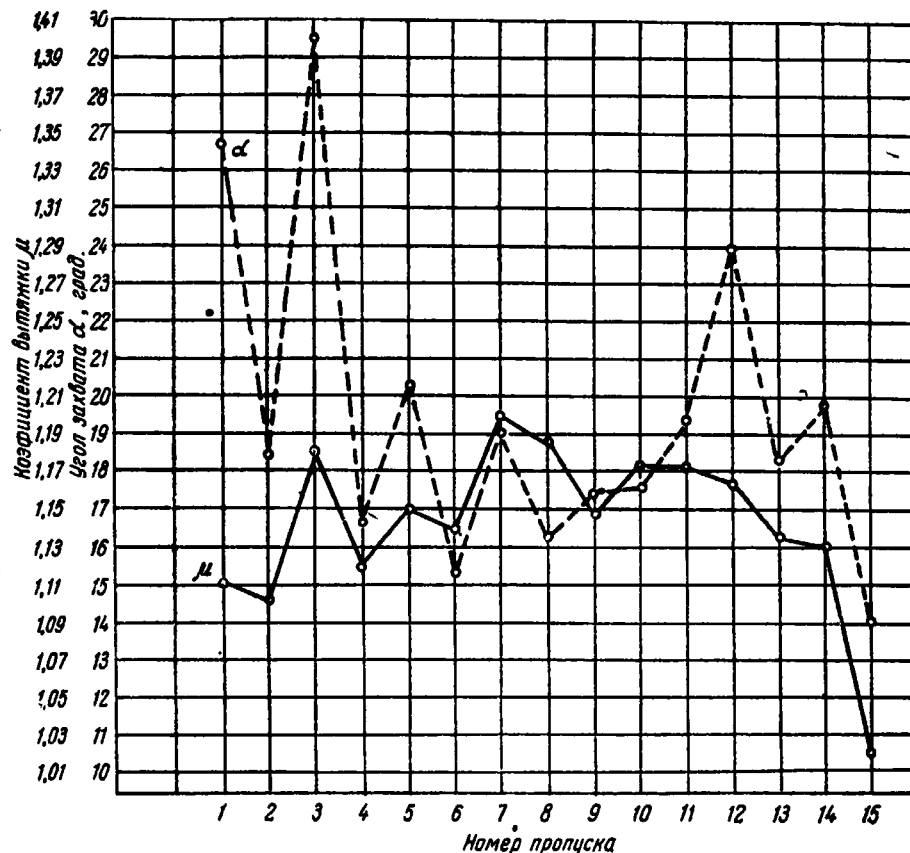


Рис. 56. Угол захвата и коэффициент вытяжки по пропускам (калибровка № 7)

ны недостатки калибровки № 2, приводившие к сплошному браку.

В калибровке № 7 коэффициенты вытяжки по проходам распределены более равномерно (рис. 56); максимальный коэффициент вытяжки в этой калибровке равен 1,20, вместо 1,292 в калибровке № 2; отношение высоты калибра к его ширине во всех калибрах принято менее единицы ($\frac{H}{D} < 1$), а секундное растяжение в ящичных калибрах не превышает 66 мм/сек; первые два

ящичных калибра по форме приближаются к овальным и, кроме того, несколько увеличены радиусы закруглений в вершине ромбов и квадратов.

Основная причина заниженного выхода годного при прокатке по калибровке № 7 заключается в том, что после ящичных калибров следуют ромбические, которые, на основании многолетнего опыта, нельзя использовать для прокатки слитка быстрорежущей стали по причинам, указанным выше. Помимо этого, завышен средний коэффициент вытяжки против нормального на 2,42%, недопустимо велики углы захвата в третьем и двенадцатом пропусках (29,5 и 23,98°) и мала степень стеснения в пятом, седьмом и девятом ящичных калибрах.

При незначительных нарушениях технологии выплавки, разливки и нагрева металла при прокатке слитка по калибровке № 7 неизбежны рванины по углам ромбической полосы, приводящие к потере металла вследствие их удаления, а в некоторых случаях и к браку.

Калибровка валков блуминга. В связи с увеличением потребления быстрорежущей стали заводами машиностроительной промышленности перед прокатчиками встал вопрос об увеличении выпуска продукции из этой стали. Наиболее эффективное мероприятие по увеличению выпуска быстрорежущей стали — отливка слитков повышенного веса (до 1000 кг) и прокатка их на блумингах.

Для примера рассмотрим действующую на одном из заводов калибровку валков блуминга 900 для прокатки слитка быстрорежущей стали весом 750 кг (рис. 57). Слиток сечением

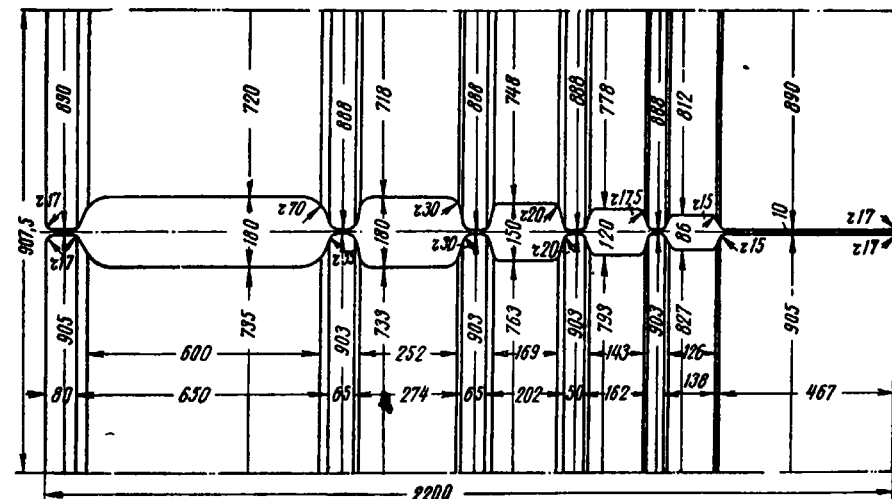


Рис. 57. Калибровка валков блуминга 900

285×285 мм и высотой 1300 мм прокатывают до квадрата 112×112 мм за 21 пропуск при среднем коэффициенте вытяжки, равном 1,0918. Режим обжатия приведен в табл. 30.

Таблица 30

Режим обжатия при прокатке слитка быстрорежущей стали на блуминге 900

№ пропуска	№ калибра	Размер полосы, мм		Кантовка	μ	Обжатие		Отношение $\frac{B}{H}$ перед кантовкой	α град. мин.
		H	B			мм	%		
1 } 2 }	I	285	285	K	1,04	10	3,5	1,036	9—45
		275	285		1,06	15	5,45	—	11—50
		260	285						
3 } 4 }	II	270	260	K	1,06	15	5,26	—	11—50
		255	260		1,06	15	5,55	1,019	11—50
5 } 6 }	II	245	257	K	1,05	15	5,76	—	11—50
		225	260		1,07	20	8,16	1,155	13—40
7 } 8 }	II	240	228	K	1,07	20	7,69	—	13—40
		220	232		1,07	20	8,33	—	13—40
		200	236		1,08	20	9,09	—	13—40
9 } 10 }	II	200	236	K	1,08	20	9,09	—	13—40
		180	240		1,09	20	10,00	1,333	13—40
11 } 12 }	III	220	184	K	1,08	20	8,33	—	13—20
		200	188		1,07	20	9,09	—	13—20
		180	192		1,09	20	10,00	—	13—20
13 } 14 }	III	180	192	K	1,09	20	10,00	—	13—20
		160	195		1,11	20	11,11	1,218	13—20
15 } 16 }	III	170	165	K	1,11	25	12,82	—	15—20
		150	170		1,10	20	11,76	1,133	13—20
17 } 18 }	IV	145	154	K	1,15	25	14,70	—	14—30
		120	158		1,17	25	17,24	1,317	14—30
19 } 20 }	V	133	125	K	1,14	25	15,82	—	14—20
		108	130		1,18	25	18,78	1,259	14—20
21 }	V	112	112	K	1,12	18	13,84	—	12—00

Прокатка слитков на блумингах, по сравнению с прокаткой полос на обжимных станах трио, имеет целый ряд преимуществ и недостатков. Преимущества заключаются в том, что имеется возможность изменять число оборотов валков блуминга и регулировать обжатия в зависимости от сложившихся условий. Деформация же в первом калибре со свободным уширением является существенным недостатком прокатки слитков на блуминге.

Работа блуминга при прокатке слитков быстрорежущей стали весом 700—1000 кг весьма нерентабельна по сравнению с прокаткой слитков обычных сталей весом более 2 т.

Наиболее рациональной технологией производства быстрорежущей стали следует считать такую, при которой потери металла минимальны, а применяемое оборудование имеет небольшую стоимость. С этой точки зрения наиболее выгоден следующий технологический процесс производства сортового металла из быстрорежущей стали:

- 1) отливка слитка квадратного сечения весом не более 750 кг;
- 2) отжиг и зачистка слитка;
- 3) ковка (лучше всего под прессом) на заготовку сечением 190×190 мм;
- 4) зачистка поверхности заготовки;
- 5) прокатка заготовки сечением 190×190 мм на обжимном стане трио на заготовку сечением 85×85 мм;
- 6) прокатка заготовки сечением 85×85 мм на другие профили.

В заключение необходимо отметить, что при прокатке слитка увеличенного веса на блуминге потребуются значительные расходы по зачистке блумов, так как в условиях свободного уширения на заготовке образуются рванины. Кроме того, при прокатке на блуминге слитков трудно удовлетворить требования ГОСТ 5952—51 по карбидной неоднородности.

2. Оптимальные условия деформации слитка

Пользуясь данными анализов калибровок и принимая во внимание качество слитков, отливаемых в настоящее время, можно установить основные параметры рациональной калибровки валков, обеспечивающие оптимальные условия деформации слитка быстрорежущей стали. Эти условия можно сформулировать в следующем виде.

1. Вес слитка не должен превышать 300 кг для обжимных станов трио и 750 кг для блумингов 900.

2. Сечение слитков, как наиболее оптимальное, должно быть квадратным.

3. Прокатывать слитки только после отжига и удаления местных дефектов. Глубина местных выточек не должна превышать 12% от диаметра слитка или стороны квадрата.

4. Обжатия по пропускам должны быть распределены в соответствии с кривой, приведенной на рис. 12. При весе слитка до 300 кг и в первых проходах давать обжатия не более 15%, увеличивая их до максимума (20%) и под конец снижая по кривой до минимума (10%). При прокатке на малых блумингах слитков весом 750 кг в первых проходах давать обжатия не более 10%, увеличивая их до максимума (15%) и затем снижая по кривой до минимума (8%).

Обжатия, указанные в табл. 32 и применяемые на блуминге 900, при прокатке слитка быстрорежущей стали весом 750 кг по нашему мнению несколько занижены.

5. Наиболее оптимальной схемой прокатки следует считать комбинацию калибров: не менее шести ящичных, остальные круглые; ромбические калибры недопустимы. Ящичные калибры должны быть выполнены с минимально возможным выпуском, не превышающим 6%. Эту схему калибровки рационально применять для прокатки стали и сплавов, весьма склонных к интеркристаллическому излому, по следующим причинам:

а) в ящичных калибрах создаются условия, благоприятствующие наиболее равномерному распределению напряжений в деформируемом металле;

б) в круглых калибрах деформация металла происходит в условиях почти трехосного сжатия.

6. Секундное растяжение в ящичных калибрах должно быть доведено до минимума (не более 60 мм/сек). Оно может быть равным нулю в двух случаях:

а) когда разность между расстоянием осей нижнего и среднего валков и среднего и верхнего была равна разности высот нижних и верхних сопряженных калибров, т. е. величине линейного обжатия;

б) если расстояния между осями валков равны между собой, то для того, чтобы верхние давления были равны нулю, необходимо иметь равенство высот сопряженных калибров.

7. Для обеспечения прокатки заготовки без внутренних разрывов не допускать прокатку по схеме круг — круг.

8. Для обеспечения равномерной деформации слитка по его сечению желательно, чтобы в каждом ящичном калибре соблюдалось отношение $\frac{H}{D} \leq \alpha$ при обжатии не менее 15%.

9. При задаче слитка в валки донной частью допустим угол захвата в 23°, а для последующих пропусков 12°.

10. Удельное давление металла на валках увеличивается с ростом суммарной степени обжатия металла, поэтому с увеличением сопротивлений деформации металла соответственно должна уменьшаться окружная скорость валков.

11. Средний коэффициент вытяжки может быть не менее 1,10 и желателен не более 1,125.

12. Коэффициент контактного трения для быстрорежущей стали должен колебаться в пределах 0,40—0,60.

13. Валки для обжимных станов следует изготавливать из кованной стали марки 40ХН.

3. Калибровка валков для прокатки простейших профилей из заготовки

По аналогии с другими сталями, имеющими повышенную пластичность, некоторые прокатчики считали, что при прокатке заготовки быстрорежущей стали на профили средних и мелких размеров необходимо пользоваться значительно меньшими коэффициентами высотной деформации, т. е. прокатывать быстрорежущую сталь на валках со специальной калибровкой. Такой взгляд опровергнут практикой. Быстрорежущую сталь с деформированной структурой можно успешно катать на валках с калибровкой, применяемой для прокатки стали с повышенной пластичностью.

Несмотря на незначительную разницу в пластичности быстрорежущей и углеродистой сталей при температурах выше 1000°, все же при прокатке профилей средних и мелких размеров из стали марок Р18 и Р9 имеются значительные трудности, которые следует учитывать при проектировании калибровки валков.

Причины, затрудняющие прокатку профилей быстрорежущей стали, следующие:

а) захват быстрорежущей стали валками с понижением температуры резко ухудшается;

б) по ГОСТ 2591—50 требуется, чтобы углы у квадратных профилей со стороной до 100 мм включительно были острыми, что трудно выполнить вследствие подстуживания этих углов и образования рванин;

в) имеются трудности при выполнении требования ГОСТ 5952—51 по карбидной ликвации для профилей крупного размера (см. рис. 8);

г) условия эксплуатации валков при прокатке быстрорежущей стали, особенно ленты и полосы, менее благоприятны по сравнению с прокаткой углеродистой стали. Быстрый износ калибров, особенно в чистовых и предчистовых клетях, вызывает излишние простои стана в связи со сменой калибров и валков.

Из изложенного следует, что при прокатке быстрорежущей стали на линейных прокатных станах необходимо принимать все меры, способствующие повышению температуры конца прокатки. Для этого прибегают к следующим средствам:

а) квадратные и круглые профили мелких размеров прокатывают с промежуточным подогревом квадратной заготовки (36—38 мм);

б) с увеличением поверхности прокатываемой полосы увеличивают скорость прокатки;

в) с уменьшением сечения готового профиля уменьшают вес заготовки. Для профилей, прокатываемых на немеханизированных станах, круглого или квадратного сечения со стороной 8—15 мм вес заготовки должен быть в пределах 15—20 кг.

Система калибров, используемая для вытяжки металла, как это будет видно из приводимых ниже данных, является основным фактором, влияющим на результаты прокатки быстрорежущей стали. Неправильный выбор системы калибров для прокатки профилей различных форм и размеров всегда приводит к отрицательным показателям. Поэтому остановимся на разборе существующих основных систем калибров, применяемых для прокатки среднесортных и мелкосортных профилей из быстрорежущей стали.

Системы вытяжных калибров

Не считая системы ящичных калибров, для вытяжки металла используют следующие системы: квадрат — квадрат; ромб — квадрат; ромб — ромб; овал — квадрат; шестиугольник — квадрат; овал — круг; овал — овал и др.

Применяют также системы, состоящие из комбинации калибров, перечисленных выше.

Системы квадрат — квадрат, ромб — квадрат и ромб — ромб имеют ряд одинаковых положительных и отрицательных черт. Они характеризуются тем, что можно получить большое количество полос квадратного сечения (в системе ромб — ромб путем двойного пропуска в калибр с кантовкой) различного размера при ограниченном количестве калибров, размеры которых можно регулировать подъемом и опусканием валков. При прокатке по этим системам полоса хорошо удерживается в калибрах, и поэтому не требуется применение сложной валковой арматуры. Форма ромбических и квадратных калибров оказывает препятствие деформации металла в поперечном направлении, что положительно влияет на пластичность металла, но увеличивает сопротивление деформации.

К недостаткам систем, состоящих из ромбических и квадратных калибров, относятся, прежде всего, плохие условия сбива окалины, неравномерное охлаждение сечения вследствие более интенсивного понижения температуры ребер полосы, неравномерный износ поверхности калибров и значительное ослабление прочности валков по сравнению с валками с ящичными калибрами.

Неравномерное охлаждение и неравномерная деформация по ширине калибра при прокатке малопластичного материала, в том числе и быстрорежущей стали, может привести к образованию рванин по ребрам полосы. Следовательно, эти системы калибров мало пригодны для прокатки малопластичной стали.

Помимо общих черт, каждая из этих систем имеет свои индивидуальные особенности.

Система квадрат — квадрат в последнее время в значительной степени потеряла свое практическое значение, так как после специализации прокатных станков сортамент черновых

клетей, выпускающих квадратные заготовки правильной формы, значительно сужен.

В условиях непрерывного роста прокатного производства эту систему нельзя считать рациональной, так как невозможно прокатывать металл с вытяжкой более 1,20; в большинстве случаев вытяжка составляет 1,08—1,15. При применении большей вытяжки возникает опасность образования заусенцев.

На одном из наших заводов качественных сталей применение вытяжной системы квадрат — квадрат объясняется благотворным

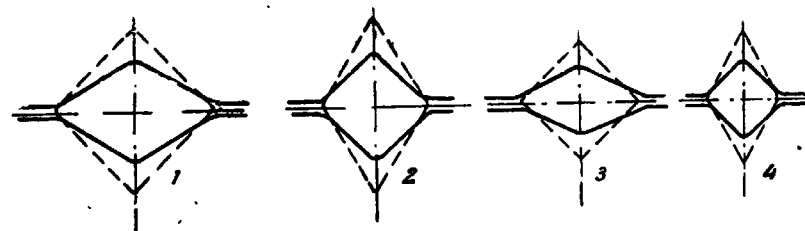


Рис. 58. Система ромб — квадрат

влиянием этой системы на качество поверхности прутков, которые после прокатки калибруют.

Для прокатки быстрорежущей стали систему калибров квадрат — квадрат применять нельзя в связи с неравномерным охлаждением полос, неравномерной деформацией на ширине калибра и невозможности прокатывать металл с большими обжатиями. Последнее обстоятельство имеет особенно важное значение при прокатке профилей малого сечения.

Система ромб — квадрат (рис. 58) применяется в качестве вытяжной, а также для получения чистового квадратного профиля. Эта система калибров имеет следующие преимущества:

а) возможно получение геометрически точных квадратов с правильно выполненными гранями;

б) благодаря наличию промежуточных квадратов обеспечиваются нормальные условия планирования прокатки чистовых квадратов или заготовок различных размеров;

в) более равномерная относительная высотная деформация по ширине калибра;

г) возможно применять увеличенные вытяжки по сравнению с системой квадрат — квадрат и ромб — ромб.

К недостаткам системы ромб — квадрат следует отнести то, что ее нельзя использовать для прокатки малопластичных сталей и сплавов с узким интервалом пластичности по тем же причинам, что и систему квадрат — квадрат.

Система ромб — ромб (рис. 59) применяется, в основном, на обжимных клетях линейных станков для прокатки заготовки квадратного сечения, предназначенной для дальнейшей об-

работки на средне- или мелкосортных станах, а также изготовления поковок для кузнечно-прессовых цехов.

Основное достоинство этой системы — настройка валков с ромбическими калибрами при переходе на прокатку другого профиля или стали другой марки очень проста. Это имеет большое значение при прокатке легированных сталей, обладающих различным сопротивлением деформации и уширением. К тому же для манипулирования с полосами ромбического сечения требуется сравнительно простой инструмент.

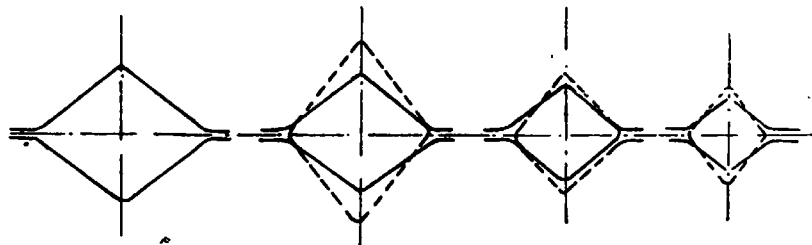


Рис. 59. Система ромб — ромб

Однако необходимо учитывать, что квадратная заготовка получается с выпуклыми гранями и не точными размерами вследствие пропуска ее через ромбический калибр дважды. Выпуклость граней затрудняет проталкивание заготовки в длинных методических печах (заготовка легко выдавливается вверх). Поэтому квадратный профиль целесообразно катать в ромбических калибрах лишь в тех случаях, когда он передается в следующую клеть или на другую линию без промежуточного нагрева.

Удаление окалины при прокатке полосы в ромбических калибрах затруднено, но при комбинации с ящичными можно получать полосу без вдавленной окалины. В этом случае прямоугольные калибры следует проектировать с большими выпусками, а прокатку полосы вести с кантовкой после каждого пропуска.

Вытяжки в системе ромб — ромб меньше, чем в системе ромб — квадрат и, как правило, редко превышают 1,3.

Система овал — квадрат (рис. 60) применяется главным образом на проволочных, мелкосортных и среднесортных станах при прокатке простых профилей. Как правило, прокатка по этой системе начинается не раньше, чем когда размеры сторон прокатываемой полосы уменьшатся до 75—50 мм, а при прокатке быстрорежущей стали — до 36—40 мм.

Практикой установлено, что прокатка квадрата в овальном калибре сопровождается меньшим появлением трещин при по-

ниженной пластичности металла, чем прокатка с той же вытяжкой на гладкой бочке, обеспечивающей условия деформации со свободным уширением. С помощью кривой естественных вытяжек для случая прокатки квадрата в овальном калибре можно объяснить, почему при деформации, особенно малопластичного металла, вероятность образования рванин в овальном калибре весьма мала. Вытяжка растет от середины полосы к ее краям. Благодаря взаимному воздействию отдельных частей полосы, края ее получают напряжение сжатия (—), а середи-

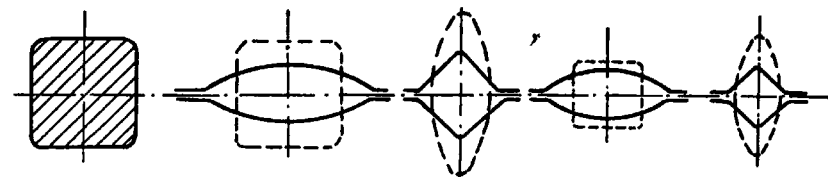


Рис. 60. Система овал — квадрат

на — напряжение растяжения (+). Вынужденное уширение по краям полосы не проявляется, так как стенки овала оказывают сопротивляющее действие поперечной деформации металла.

Овалы строят трех типов:

- 1) в виде правильных овалов, ограниченных дугами круга;
- 1) в виде усеченных овалов, которым иногда придают также вогнутость в середине;
- 3) в виде трапециoidalных калибров.

Для прокатки быстрорежущей стали овал первого типа следует считать наиболее целесообразным, как лучше ограничивающий уширение.

Основные преимущества системы овал — квадрат следующие:

а) система позволяет получать большие вытяжки (в овале до 2,0, в квадрате до 1,8), обеспечивающие быстрое уменьшение сечения прокатываемой полосы;

б) применение овальных калибров обеспечивает систематическое обновление углов прокатываемой полосы, тогда как в системах ромб — квадрат и ромб — ромб этого не наблюдается. Обновление граней способствует равномерному охлаждению металла по всему периметру полосы;

в) схема изменения направлений обжатий при прокатке по системе овал — квадрат (рис. 61) оказывает благотворное действие на структуру металла и повышает его качество;

г) устойчивое положение овальной полосы в квадратном калибре и квадратной полосы в овальном калибре позволяет применять сравнительно простую валковую арматуру.

Недостатки системы овал — квадрат следующие:

а) при прокатке полосы в квадратном и овальном калибрах, в результате неравномерной деформации металла по ширине калибра, дополнительные напряжения в металле велики. С увеличением площади поперечного сечения полосы неравномерность деформации по ее ширине увеличивается, вследствие чего на практике быстрорежущую сталь по данной системе прокатывают только до круга и квадрата небольших размеров (6—14 мм);

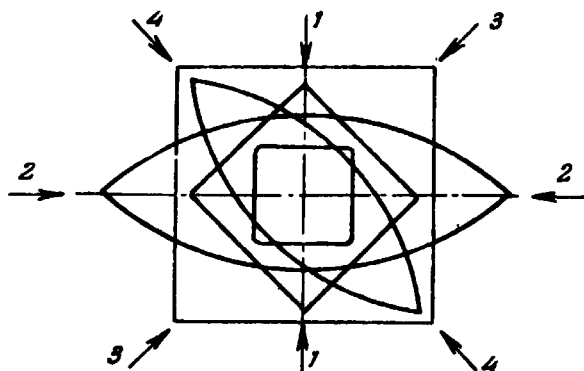


Рис. 61. Схема изменения направления обжатий по системе овал — квадрат; цифры обозначают последовательность обжатий (по Б. П. Бахтинову и М. М. Штернову)

при больших размерах стороны квадрата или диаметра круга применяется система овал — круг — овал;

б) овальные и квадратные калибры изнашиваются не в одинаковой степени — овальные калибры изнашиваются быстрее квадратных.

Система шестиугольник — квадрат может быть использована для прокатки круглых и квадратных профилей средних и мелких размеров и проволоки. Применение шестиугольника вместо овала дает целый ряд преимуществ:

- а) равномерное обжатие полосы по всей ширине калибра;
- б) меньшие удельные давления металла на валок;
- в) одинаковые условия уширения в шестиугольном и квадратном калибрах (боковые стенки всех калибров имеют уклон 45°);
- г) большая устойчивость профиля в момент захвата;
- д) более устойчивое положение профиля в проводках и более легкая настройка валков;
- е) при равных площадях в овальном калибре глубина вреза в валки несколько меньше.

Недостатки данной системы те же, что и системы овал — квадрат, но они не так резко выражены.

Система овал — круг (рис. 62) применяется главным образом при прокатке малоуглеродистых сталей и сплавов в круглые профили средних размеров.

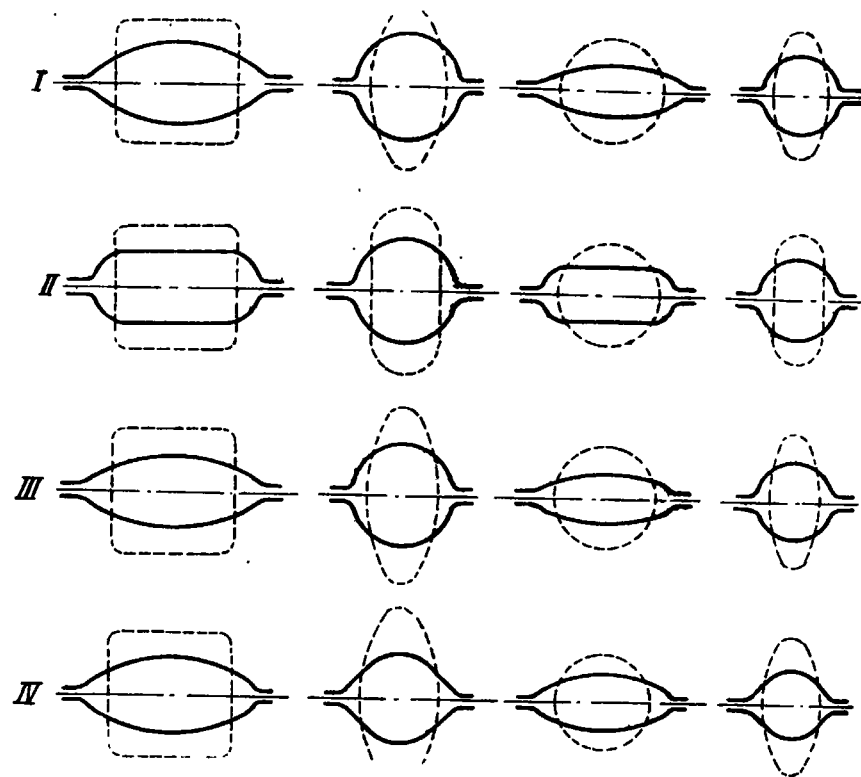


Рис. 62. Разновидности системы овал — круг

Система овал — круг менее пригодна для прокатки малоуглеродистых сталей, особенно на механизированных станах, так как она не обеспечивает высокой производительности станов. В случае же прокатки дорогостоящих сталей и сплавов эта система экономически целесообразна вследствие уменьшения потерь металла.

Система овал — круг имеет следующие преимущества перед ранее рассмотренными:

- а) форма калибров предохраняет металл от появления местных напряжений;

б) обеспечивается равномерное остывание полосы, что достигается отсутствием острых углов;

в) поверхность прокатываемого профиля хорошо освобождается от окалины в основном при задаче овала в круг;

г) устраняется в большей степени образование складок и складочных трещин;

д) в черновых и подготовительных клетях круг легко и просто передается в овал по обводке.

Наряду с преимуществами, система овал—круг имеет и существенные недостатки:

а) низкая, по сравнению с некоторыми рассмотренными системами, вытяжка, не превышающая 1,3—1,4;

б) требуемая более тщательная настройка стана, так как круглые калибры способствуют образованию заусенцев даже при незначительном избытке металла;

в) овальная полоса недостаточно устойчива в круглом калибре, поэтому требуется применение пропусков.

Система овал—круг проектируется в четырех вариантах (рис. 62). Варианты II—IV представляют собой попытку устранить или ослабить недостатки варианта I. Вариант II отличается от варианта I лишь конфигурацией овала: если в варианте I овал получается пересечением двух дуг, то в варианте II применяются плоские овалы, чтобы облегчить удержание овала в проводках при задаче его в круглый калибр. При использовании плоских овалов несколько уменьшается неравномерность деформации в круге и облегчается захват полосы.

Наряду с достоинствами, плоский овал имеет и недостатки:

а) при деформации круга в плоских овалах неравномерность деформации увеличивается по сравнению с обычным овалом (рис. 63);

б) вытяжки в овальном калибре больше, чем в круглом.

В варианте III, являющемся промежуточным между вариантами I и II, применяется двухрадиусный овал или эллипс. Эллиптические или двухрадиусные овальные калибры, имея преимущества плоских овалов, одновременно обеспечивают равную вытяжку в овале и круге и меньшую неравномерность деформации. Овалы второго и третьего типов имеют общий недостаток: при незначительном переполнении овального калибра неизбежно образование заусенцев. Чтобы предупредить переполнение круглого калибра, размеры его берут несколько больше расчетных или же скругляют фаски буртов у раздела калибра. Увеличение размеров хотя и предупреждает образование заусенцев, но вместе с этим увеличивает область свободного уширения, что может вредно сказаться на качестве боковой поверхности профиля.

В варианте IV для предупреждения образования заусенцев промежуточные круглые калибры заменены квадратными, углы

которых скруглены большими радиусами. Такая форма калибра гарантирует получение профиля без заусенцев, позволяет несколько увеличить вытяжки и облегчает удержание овальной полосы.

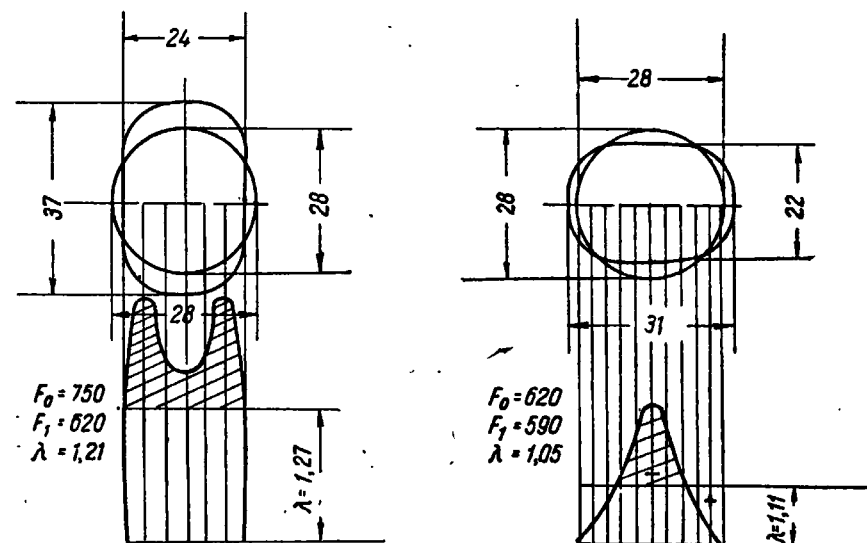


Рис. 63. Неравномерность деформации по ширине при прокатке по системе овал—круг

Система овал—овал (рис. 64), несмотря на ряд преимуществ по сравнению с другими системами, в прокатном производстве применяется весьма редко, так как имеет много существенных недостатков. К основным из них относятся:

а) неустойчивость овальной полосы в овальном калибре, которая влечет за собой опасность свертывания, а невозможность применения автоматических обводок;

б) глубокий врез вертикальных овалов в валки, вследствие чего уменьшается прочность валков;

в) чрезвычайно трудная настройка валков, так как из-за отсутствия простора на уширение при незначительном избытке металла образуется заусенец;

г) требуется тщательный контроль за проводками (пропусками), так как при малейшем отклонении вертикальной оси овала от своего нормального положения неизбежен брак (ус с последующим закатом);

д) ввиду большой трудности захвата и отсутствия достаточного простора на уширение ограничивается возможность прокатки круглых профилей с большими вытяжками.

Наряду с отмеченными недостатками эта система имеет весьма серьезные достоинства по сравнению с другими системами — возможна прокатка малопластичных сталей и сплавов вследствие:

- а) отсутствия резкого формоизменения в каждом пропуске;
- б) удовлетворительного охвата профиля калибром при отсутствии углов и резких переходов;
- в) ужесточения условий объемного напряженного состояния деформируемого металла.

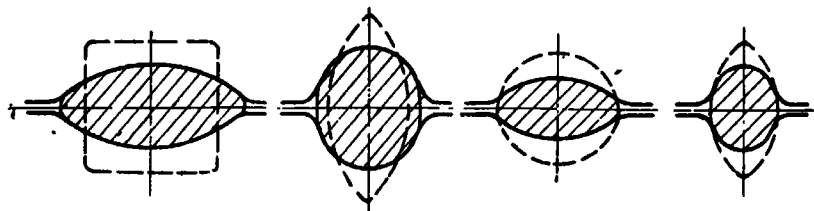


Рис. 64. Калибровка по системе овал — овал

Остановимся еще на одной системе калибров, которые применяются при прокатке круга и калибры которой являются завершающими.

Система квадрат — полоса — ребро — овал — круг (рис. 65) применяется в двух вариантах [50]. Как видно из рис. 65, разница между вариантами I и II заключается в том, что в первом случае предотделочный квадрат поступает в ступенчатые валки или на площадку, тогда как во втором случае стрельчатый или квадратный профиль задается в специальный овальный калибр, в котором получается профиль, очень близкий к овалу, но с сильно скругленными боками. В результате такой формы второго калибра все последующие сечения имеют скругленные бока, что позволяет избавиться от недостатков системы овал — квадрат. После кантовки на 90° этот профиль задается в ребровый калибр, подобный овальному калибру.

Достоинства данной системы:

- а) чистая поверхность прокатываемой полосы благодаря хорошему удалению окалины в ребровых калибрах;
- б) устранена возможность образования складок и морщин, так как полоса, заданная в чистовой овал из ребрового калибра, обжимается меньше и равномернее, чем предчистовой квадрат в овале по системе квадрат — овал — круг;
- в) при прокатке стали и сплавов с узким интервалом пластичности резко снижена вероятность образования разрывов на ребрах полосы ввиду отсутствия острых углов на чистовом и промежуточных профилях;
- г) более устойчивый овал в круге по сравнению с системой овал — круг или овал — овал, не считая плоского овала.

Наряду с достоинствами рассматриваемая нами система имеет недостатки:

- а) в стрельчатом калибре вероятность свертывания полосы больше, чем в квадратном;
- б) в ребровых калибрах нельзя использовать коэффициенты вытяжки более 1,18—1,24;

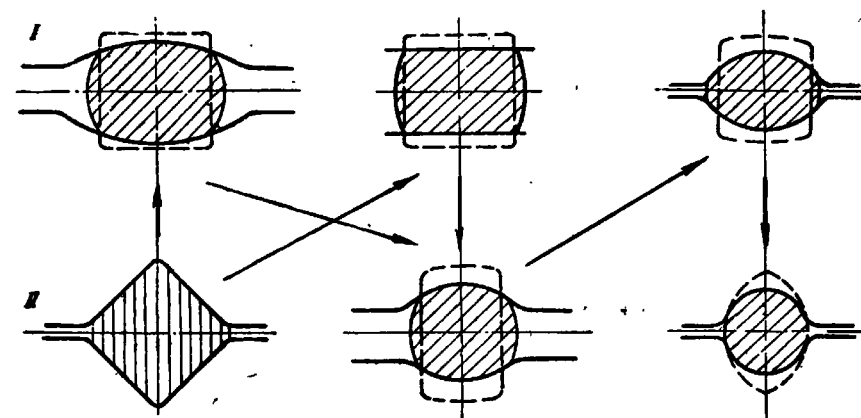


Рис. 65. Система квадрат — ступенька — ребро — овал — круг

- в) значительная неравномерность деформации по ширине профиля в ребровом, овальном и круглом калибрах особенно при прокатке по варианту I данной системы.

Несмотря на отмеченные недостатки, эта система за последнее время получила широкое распространение при прокатке легированных сталей, так как поверхность полосы получается чистой, а сечение профиля правильным.

При выборе системы и расчете калибров для прокатки простых профилей быстрорежущей стали необходимо пользоваться данными, приведенными в табл. 31.

Табл. 31 составлена на основании опытных данных передовых заводов, выпускающих быстрорежущую сталь в виде простых профилей (круг, квадрат и полоса).

На мелкосортных и проволочных станах при прокатке стали в последующих пропусках применяют системы:

- а) для круглого профиля — овал — квадрат — овал — круг;
- б) для квадратного профиля — ромб — квадрат — овал — квадрат;
- в) для полосового профиля — ромб — квадрат — ромб — квадрат — ступенька — ребро — ступенька.

На основе опытных данных установлено, что крупный сорт целесообразно не прокатывать, а ковать. Ковкой слитков весом

Таблица 31

Основные данные, характеризующие системы калибров, используемые при прокатке сортовых профилей

Система	Прокатываемая полоса	Размер диаметра или стороны мм	Коэффициенты вытяжки, наиболее часто употребляемые	Условия деформации быстрорежущей стали при данной системе калибровки	Сфера применения квадрата или круга быстрорежущей стали, мм
Квадрат—квадрат	Квадрат	30—120	1,08—1,20	Неудовлетворительные	8—50
Ромб—квадрат	То же	30—150	1,15—1,30	То же	8—50
Ромб—ромб	» »	30—150	1,10—1,35	» »	8—50
Овал—квадрат	Круг, квадрат	8—70	1,50—2,2	Удовлетворительные	8—15
Шестиугольник—квадрат	То же	8—70	1,3—1,80	То же	8—30
Овал—круг:	» »	15—70		Хорошие	15—70
I вариант			1,10—1,30		
II »			1,20—1,40		
III »			1,15—1,35		
IV »			1,15—1,35		
Овал—овал	Круг или квадрат	8—30	1,10—1,25	То же	15—30
Квадрат—полоса—ребро—овал:	Круг	20—70		» »	15—70
I вариант			1,10—1,15		
II »			1,12—1,17*		

* В ребровых $\mu = 1,18 - 1,24$, исключая полосы с отношением $\frac{B}{H} = 3 \div 5,0$, для которых $\mu = 1,08 - 1,15$.

500—750 кг под молотом достигается в чистовом сорте балл по карбидной неоднородности значительно ниже, чем при прокатке.

4. Действующие калибровки валков для прокатки сортовых профилей быстрорежущей стали

Прокатка круглой стали диаметром 26 мм

Круглую сталь диаметром 26 мм прокатывают в пять пропусков из исходного ромба (рис. 66), имеющего диагонали 45,6 и 54,4 мм и площадь 1430 мм², по схеме квадрат — полоса — ребро — овал — круг при среднем коэффициенте вытяжки 1,218.

Величины, характеризующие данную калибровку, определены по темплетам, взятым после каждого пропуска (табл. 32).

Таблица 32

Анализ калибровки круглой стали диаметром 26 мм из стали марки Р18

№ про-пуска	Форма калибра	Размер калибра мм	Размер полосы мм	h_0 мм	h_1 мм	$\frac{h_0 - h_1}{h_1}$ мм	$\frac{h_0 - h_1}{h_0} \cdot 100$ %	$\frac{h_0}{h_1}$	$\frac{b_1 - b_0}{h_0 - h_1}$ мм	$\frac{b_1 - b_0}{h_1}$ мм	$\frac{w_{n-1}}{w_n} \cdot 100$ %	$\frac{w_{n-1}}{w_n}$	мм — диаметр
1		36	46,7 × 46,7 37,5 × 36,0	54,4	46,7	7,7	14,2	1,17	1,1	0,14	9,7	1,11	5—40
2		22 × 48,5 28 × 31	24,8 × 44,2	37,5	24,8	12,7	33,8	1,51	8,2	0,65	25,8	1,35	7—50
3			32,8 × 28,7	44,2	32,8	11,4	26,0	1,35	3,9	0,34	20,0	1,25	19—40
4		23 × 36,3	24,4 × 35,5	32,8	24,4	8,4	25,6	1,34	6,8	0,81	16,4	1,20	14—00
5		26	26,2 × 26,8	35,5	26,2	9,3	26,2	1,36	2,4	0,26	16,4	1,20	15—00

Схема овал — круг вполне обеспечивает получение чистой поверхности конечного профиля; рванины или трещины появляются в редких случаях, например, при неполадках на стане, вызывающих резкое снижение температуры конца прокатки.

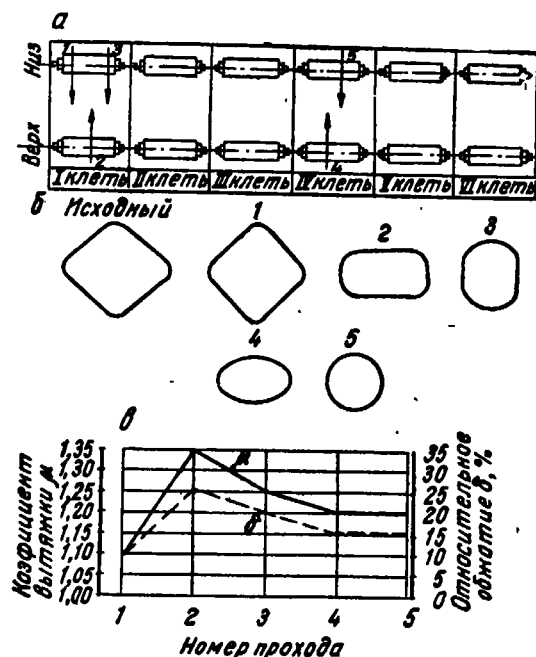


Рис. 66. Схема прокатки круглой стали диам. 20 мм на стане 300 (сталь марки Р18): а — схема расположения калибров по клетям; б — темплеты; в — изменение коэффициента вытяжки и абсолютного обжатия по проходам

Прокатка круглой стали диаметром 9 мм

Круглую сталь мелких размеров (8—14 мм) прокатывают по системе ромб — квадрат — овал — круг. Специальной калибровки для прокатки круглого профиля указанного размера из быстрорежущей стали нет, поэтому его прокатывают по калибровке, разработанной для круга диаметром 9 мм из стали марки У12А. Анализ калибровки приведен в табл. 33.

Прокатка круглой стали диаметром 9 мм производится в 13 пропусков из исходной заготовки площадью 1415 мм² при среднем коэффициенте вытяжки 1,263. При таком достаточно высоком среднем коэффициенте вытяжки обеспечивается получение чистой поверхности конечного профиля вследствие хорошей пластичности и высокого предела прочности быстрорежущей стали при тем-

пературах прокатки. Такое сочетание свойств можно объяснить только значительной раздробленностью литой структуры. При прокатке круглой стали диаметром 9 мм с указанными обжатиями наблюдается разогрев металла и этим обеспечивается температура конца прокатки не ниже 800°. Кроме того, указанная температура конца прокатки также получается благодаря уменьшению веса

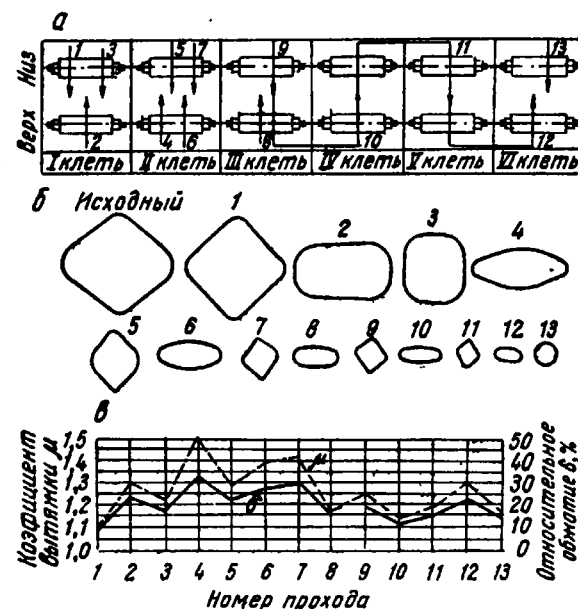


Рис. 67. Прокатка круглой стали диаметром 9 мм на стане 300 (сталь марки У12А): а — схема прокатки; б — темплеты; в — изменение коэффициента вытяжки и абсолютного обжатия по проходам

исходной заготовки (квадрат 38×38 мм) быстрорежущей стали (10—15 кг) по сравнению с весом заготовки углеродистой стали (до 200 кг).

Прокатка катанки диаметром 6 мм

На одном из наших заводов катанку диаметром 6 мм прокатывают на проволочном стане, состоящем из трех линий (три клетя трио 500, семь клетей дуо 300 и шесть клетей дуо 250).

А. Б. Брусиным и В. Н. Плеховым была освоена прокатка катанки по следующей схеме:

1) на линии 500 квадрат 83×83 мм прокатывали в I клетя до квадрата 42×42 мм в 6 пропусков;

Таблица 33

Анализ калибровки круглой стали диаметром 9,5 мм из стали марки У12А

№ про-пуска	Форма калибра	Размер калибра мм	Размер полосы мм	h_0 мм	h_1 мм	$h_0 - h_1$ мм	$\frac{h_0 - h_1}{h_0} \cdot 100$ %	$\frac{h_0}{h_1}$	$\frac{b_1 - b_0}{h_0 - h_1}$ мм	$\frac{b_1 - b_0}{h_0 - h_1}$ мм	$\frac{w_{m-1}}{w_m} \cdot 100$ %	$\frac{w_{m-1}}{w_m}$	Техн. усл. 'о
Исходная заготовка													
1	◆	36	45,7×45,5	49,8	45,7	4,1	8,2	1,09	0,7	0,17	1415	1,09	10—15
2	●	22×48,5	36,7×37,2	36,7	24,2	12,5	34,0	1,52	7,0	0,56	1296	1,30	17—05
3	●	26×29	24,2×44,2	44,2	33,8	10,4	23,6	1,30	4,0	0,38	998	1,22	15—40
4	●	13,5×46,5	33,8×28,2	28,2	16,0	12,2	43,2	1,76	8,9	0,73	816	1,50	10—40
5	◆	20	16×42,7	42,7	27,5	15,2	35,6	1,55	6,1	0,40	543	1,29	19—05
6	◆	10×35,7	20,5×21,3	20,5	12,0	8,5	41,5	1,71	8,9	1,05	421	1,39	13—50
7	◆	15	12×30,2	30,2	19,7	10,5	34,8	1,53	5,3	0,50	302	1,42	15—40
8	◆	8×30	14,5×15,3	14,5	9,5	5,0	34,5	1,53	5,5	1,10	213	1,18	10—30
9	◆	12	9,5×20,8	20,8	15,5	5,3	25,5	1,34	5,1	0,96	181	1,25	11—00
10	◆	6×20	11,4×12,8	11,4	6,7	4,7	41,2	1,70	7,0	1,49	145	1,15	10—10
11	◆	10	6,7×19,8	19,8	13,2	6,6	33,3	1,50	4,8	0,73	126	1,20	12—10
12	◆	6,7×14,5	9,7×10,6	9,7	7,3	2,4	24,8	1,33	2,7	1,12	105	1,31	7—20
13	◆	9,3	7,3×13,3	13,3	9,3	4,0	30,1	1,43	1,9	0,47	80	1,18	9—25

2) на линии 500 квадрат 42×42 мм прокатывали в III клету до овала $11,5 \times 38$ мм в 5 пропусков;

3) на линиях 300 и 250 овал $11,5 \times 38$ мм прокатывали до круга диаметром 6 мм в 13 пропусков.

Таким образом прокатки катанки диаметром 6 мм производилась с квадрата 83×83 мм за 24 пропуска при среднем коэффициенте вытяжки 1,255.

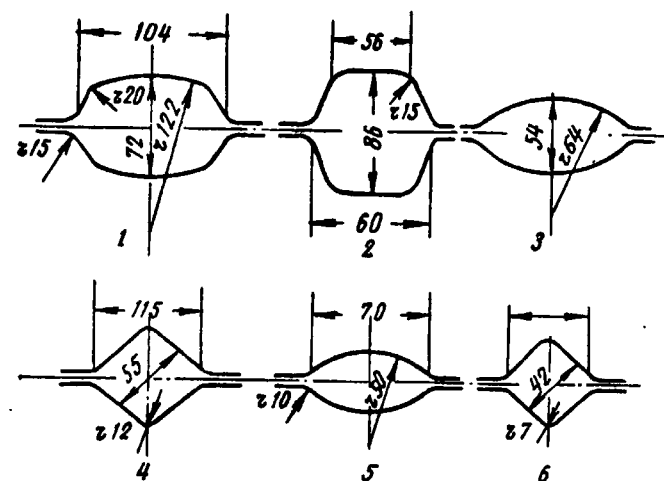


Рис. 68. Конструкция и размеры калибров в обжимной клету 500 проволочного стана 250

Прокатка с такими интенсивными обжатиями оказалась возможной только благодаря переходу на первой линии стана 500 с системы ромб—ромб на систему овал—квадрат. Размеры и форма калибров, применяемых в этой системе, указаны на рис. 68. По системе ромб—ромб прокатку квадрата 83×83 мм до квадрата 42×42 мм производили в двенадцать пропусков при среднем коэффициенте вытяжки, равном 1,121. Несмотря на то, что деформация заготовки по системе ромб—ромб происходила при значительно меньших обжатиях по сравнению с системой овал—квадрат, на ребрах промежуточных квадратов и квадрате 42×42 мм получались рванины.

Образование рванин по ребрам квадратной стали, полученной при прокатке по системе ромб—ромб, с достаточной наглядностью демонстрирует преимущество применения системы овал—квадрат на черновых линиях не только проволочных, но и мелкосортных станов. Следует отметить, что форма калибров системы овал—квадрат, разработанная А. Б. Брусиным и В. Н. Плоховым, обеспечивает равномерные условия деформации металла, особенно

в первых трех калибрах, и замедленное охлаждение ребер полосы по сравнению с формой калибров системы ромб—ромб.

Катанку диаметром 6 мм прокатывали при одинаковых скоростных условиях как по новой, так и старой схемам калибров.

Система овал—квадрат, предложенная А. Б. Брусиным и В. Н. Плоховым, обеспечивает высокую производительность стана и хорошее качество проката.

Прокатка квадратной стали 20×20 мм

Квадратную сталь со стороной 20 мм прокатывают в семь пропусков из исходного ромба, имеющего диагонали 47,5 и 54 мм и площадь 1556 мм² (рис. 69), по схеме квадрат—полоса—черно-

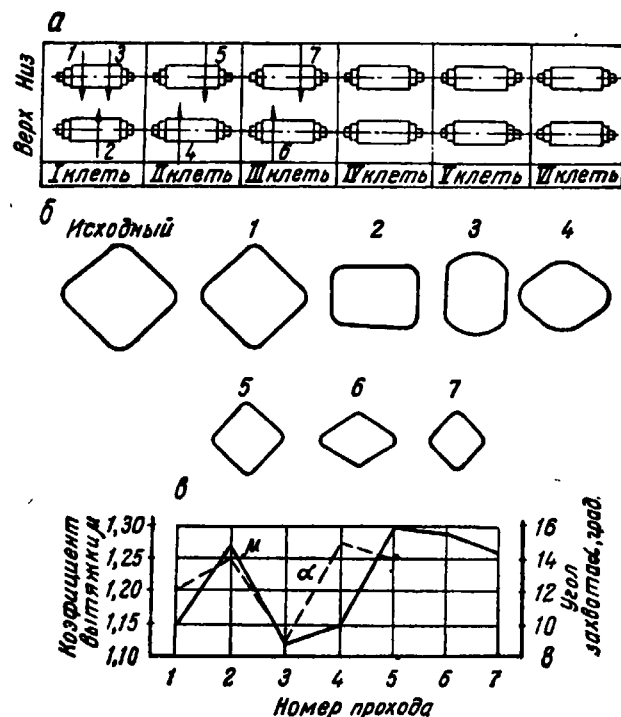


Рис. 69. Прокатка квадратной стали 20×20 мм на стане 300 (сталь марки Р18):

а — схема прокатки; б — шаблоны; в — изменение коэффициента вытяжки и абсолютного обжатия по проходам

вой круг (ребро) — овал—квадрат—ромб—квадрат при среднем коэффициенте вытяжки 1,213 (табл. 34).

Таблица 34

Анализ калибровки квадратной стали 20×20 мм из стали марки Р18

№ про- пуска	Форма калибра	Размер калибра мм	Размер полосы мм	h_0 мм	h_1 мм	$h_0 - h_1$ мм	$\frac{h_0 - h_1}{h_0} 100$ %	$\frac{h_0}{h_1}$	$b_1 - b_0$ мм	$\frac{b_1 - b_0}{h_0 - h_1}$	$\frac{w_n - 1}{M_{n2}}$	$\frac{1 - w_n}{1 - w_n}$ %	$\frac{w_n - 1}{w_n}$	Действ. калибровка
1	Квадрат	39	38 × 37,5	54	47,5	6,5	12	1,14	0,5	0,07	1556	13,1	1,15	12—00
2	Овал	22 × 48	47,5 × 48	38	29	9	23,7	1,31	3,5	0,39	1352	19,0	1,23	14—00
3	Ромб	32 × 35	29 × 41	41	38	3	7,3	1,08	1,0	0,33	1096	10,4	1,12	9—00
4	Квадрат	26	29,5 × 30	33	23	10	30,3	1,43	4,0	0,40	852	13,2	1,15	15—00
5	Овал	24	28,5 × 42	42	33,5	8,5	20,2	1,25	4,5	0,53	655	23,0	1,30	14—00
6	Квадрат	20	33,5 × 33	33,5	25,5	8	23,9	1,31	3,0	0,38	508	22,4	1,29	14—00
7	Квадрат	20	25,5 × 38	36	28	8	22,2	1,29	2,5	0,31	402	20,9	1,26	14—00

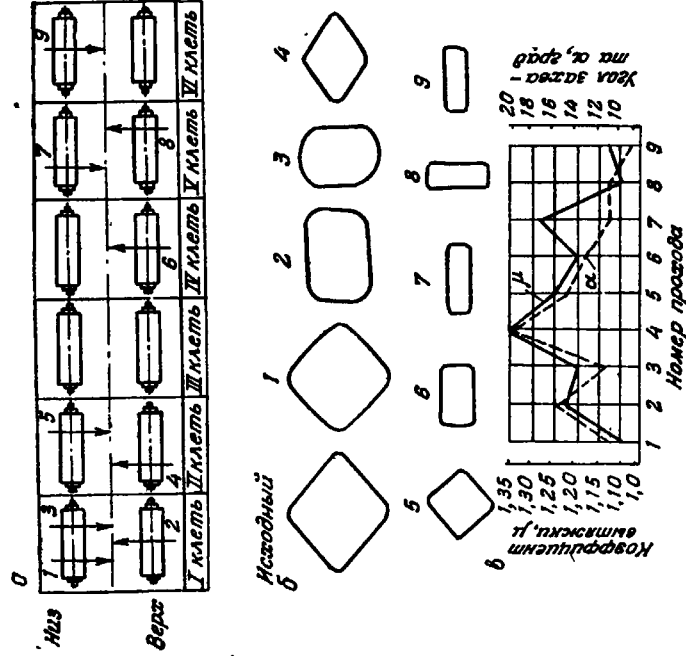


Рис. 71. Прокатка полосы из стали марки Р9 сечением 10×30 мм на стане 300:

а — схема прокатки; б — темпеты; в — изменение коэффициента вытяжки и угла захвата по проходам

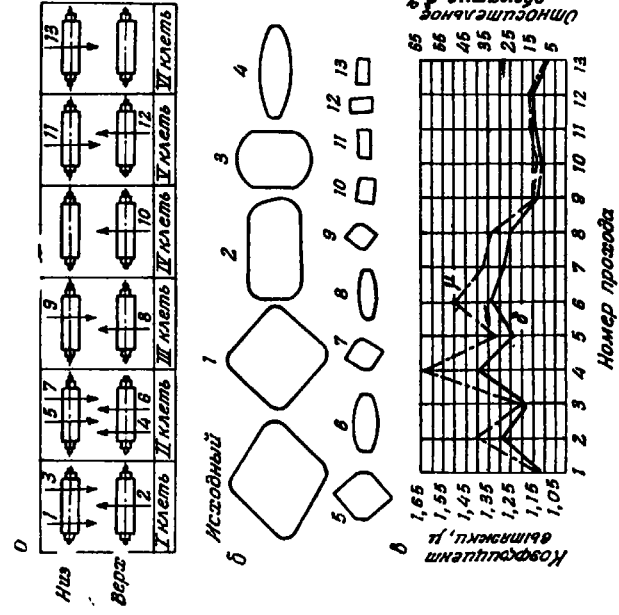


Рис. 72. Прокатка полосы из стали X18H9T размером 6×12 мм на стане 300:

а — схема прокатки; б — темпеты; в — изменение коэффициента вытяжки и относительного обжатия

Таблица 36

Анализ калибровки полосовой стали 6×12 мм из стали марки X18H9T

№ про-пуска	Форма калибра	Размер калибра мм	Размер полосы мм	h_0 мм	h_1 мм	$h_0 - h_1$ мм	$\frac{h_0 - h_1}{h_0} 100$ %	$\frac{h_0}{h_1}$	$\frac{b_1 - b_0}{h_0 - h_1}$ мм	$\frac{b_1 - b_0}{h_0 - h_1}$ мм	$\frac{\omega_n - 1}{\omega_n}$ %	$\frac{\omega_n - 1}{\omega_n}$ град.—мин.
Исходная заготовка												
1	◆	36	$36,2 \times 38,0$ $46,3 \times 47,0$	53,9	47,0	6,9	12,8	1,15	0,11	0,11	11,7	1,13
2	●	$22 \times 48,5$	$23,9 \times 43,9$	36,2	23,9	12,3	34,0	1,51	0,46	0,46	28,7	1,40
3	●	28×31	$24,8 \times 26,3$	43,7	34,8	8,9	20,4	1,25	0,27	0,27	16,8	1,20
4	●	$13,5 \times 46,5$	$15,1 \times 42,3$	26,3	15,1	11,2	42,5	1,74	0,67	0,67	38,6	1,63
5	◆	19	$19,6 \times 20,1$ $26,6 \times 22,6$	42,3	26,6	15,7	37,1	1,59	0,48	0,48	23,6	1,31
6	●	$10 \times 35,7$	$10,8 \times 27,0$	19,6	10,8	8,8	45,0	1,81	0,78	0,78	33,1	1,49
7	◆	14	$13,7 \times 14,0$ $18,1 \times 15,1$	27,0	18,1	8,9	32,9	1,49	0,48	0,48	27,3	1,37
8	●	$6,5 \times 25$	$7,1 \times 23,1$	13,7	7,1	6,6	48,2	1,93	1,38	1,38	24,6	1,33
9	◆	10	$10,7 \times 11,0$ $14,0 \times 12,2$	23,1	14,0	9,1	39,1	1,65	0,56	0,56	11,9	1,13
10	●		$9,0 \times 11,5$	10,7	9,0	1,7	15,9	1,19	0,29	0,29	10,2	1,11
11	◆		$6,8 \times 13,8$	9,0	6,8	2,2	24,4	1,32	1,04	1,04	13,2	1,15
12	◆		$7,4 \times 11,0$	13,8	11,0	2,8	20,3	1,25	0,6	0,6	14,1	1,16
13	◆		$6,2 \times 12,3$	7,4	6,2	1,2	16,2	1,19	1,08	1,08	7,6	1,08
Итого				38,3 × 39,6 45,4 × 53,9								

для прокатки быстрорежущей стали (рис. 73). Анализ этой калибровки приведен в табл. 37.

Прокатка заготовки $38 \times 38 \div 42 \times 42$ мм

Заготовку 83×83 мм прокатывают на заготовку для стана 300 (квадрат $38 \div 42$ мм) в валках с комбинированной калибровкой, позволяющей получить и круглую сталь (рис. 74).

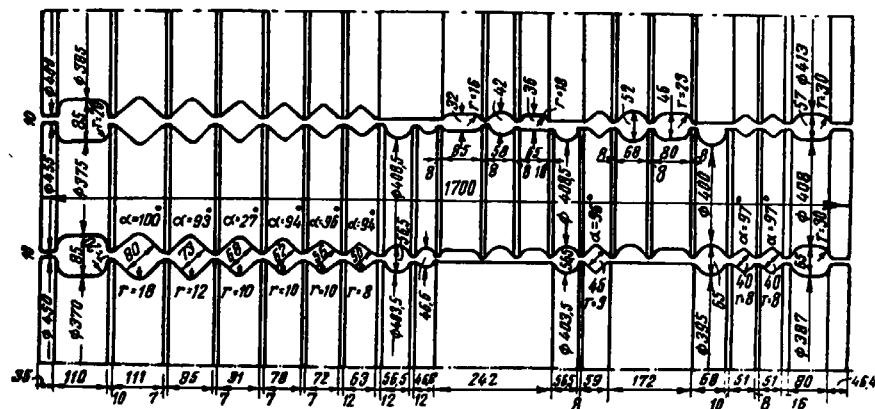


Рис. 74. Калибровка валков обжимной клетки стана 300 для прокатки заготовки квадрат 38 мм и круглых профилей diam. 45 и 55 мм

Заготовку $38 \times 38 \div 42 \times 42$ мм из квадрата 83×83 мм прокатывают в 9 пропусков по схеме ромб—ромб, и при этом используют ромбы 80, 73, 68, 62, 56, 50, 45, 40 и 40 мм. Средний коэффициент вытяжки составляет 1,174.

При прокатке стали марки Р9 по системе ромб—ромб качество поверхности конечного профиля получается удовлетворительным. Быстрорежущую сталь марки Р18, как наименее пластичную сталь, целесообразнее прокатывать по системе овал—квадрат или овал—круг. По той же калибровке (рис. 74) прокатывают подкат (квадрат 40 мм) из заготовки квадрат 100 мм малоуглеродистых сталей (табл. 38).

Прокатка клиновидной полосы размером $28,5 \times 8,3 \times 6,5$ мм

Раньше при изготовлении сборных фрез для ножей использовали полосу из быстрорежущей стали. В целях экономии дорогостоящего материала металлургические заводы стали поставлять быстрорежущую сталь в виде полосы клиновидного сечения. Размеры ножей и заготовки для них указаны в табл. 39 и рис. 75.

Таблица 38

Анализ калибровки обжимной клетки 450

№ пропуска	Размер калибра мм	Высота полосы, мм		Обжатие		γ	ω мм ²	δ ₂ %	α град. мин.
		H	h	мм	%				

Исходная заготовка квадрат 100 мм

1	110×85	100	85	15	15,0	1,18	9820	12,4	1,14	16—01
2	110×85	105	85	20	19,0	1,24	8600	11,0	1,12	19—10
3	80	116	94	22	19,0	1,23	7650	11,0	1,12	19—10
4	73	111	92	19	17,1	1,21	6200	19,0	1,23	19—50
5	68	96	84	11	11,6	1,13	5300	14,5	1,17	18—20
6	62	91	78	13	14,3	1,17	4610	13,0	1,15	13—50
7	62	—	—	—	—	—	3700	19,7	1,24	14—50
8	32×85	62	30	32	51,6	2,06	2280	38,1	1,62	21—20
9	40	83	48	34	41,0	1,73	1525	33,4	1,50	23—20

Примечания: 1. $\mu_{\text{ср}} = 1,23$.

2. Данные относятся к прокатке низкоуглеродистой стали.

Таблица 39

Основные размеры ножа и заготовки для него

№ ножа	Размеры, мм								
	ножа			заготовки			допуск для заготовки		
	H	c	q	H	c	q	H	c	q
A2-6	33,8	10,4	7,76	34,6	11,2	8,6	—0,34	—0,20	—0,20
0	16,8	5,0	3,7	17,6	5,8	4,5	—0,24	—0,20	—0,20
A	23,5	6,3	4,7	24,3	7,1	5,5	—0,28	—0,20	—0,20
1	26,5	7,5	5,7	28,5	8,3	6,5	—0,28	—0,20	—0,20
B	29,5	8,7	6,7	30,3	9,5	7,5	—0,28	—0,20	—0,20
2	33,5	10,1	7,7	34,3	10,9	8,5	—0,34	—0,20	—0,20

Полосу клиновидного сечения прокатывали на стане двойное дуо 300 из заготовки сечением 37×37 мм при числе оборотов валков 160 в минуту. Температура нагрева заготовки стали марки Р9 1150°; температура конца прокатки 710°. Формоизменение исходного квадрата до чистового профиля сечением $29,6 \times 8,8 \times 6,4$ мм представлено на рис. 76.

Анализ калибровки (табл. 40) составлен по темплетам, изготовленным из образцов, отобранных после каждого пропуска. Средний коэффициент вытяжки при прокатке клиновидной полосы составлял 1,179.

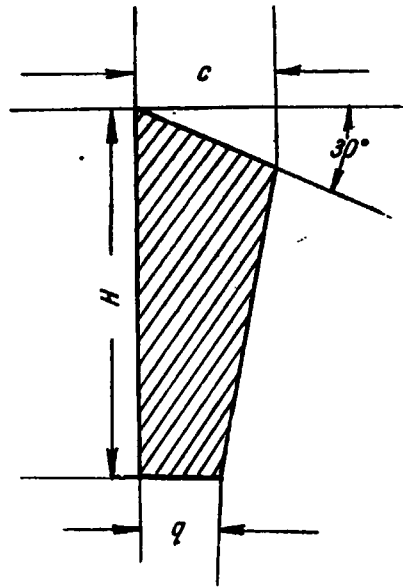
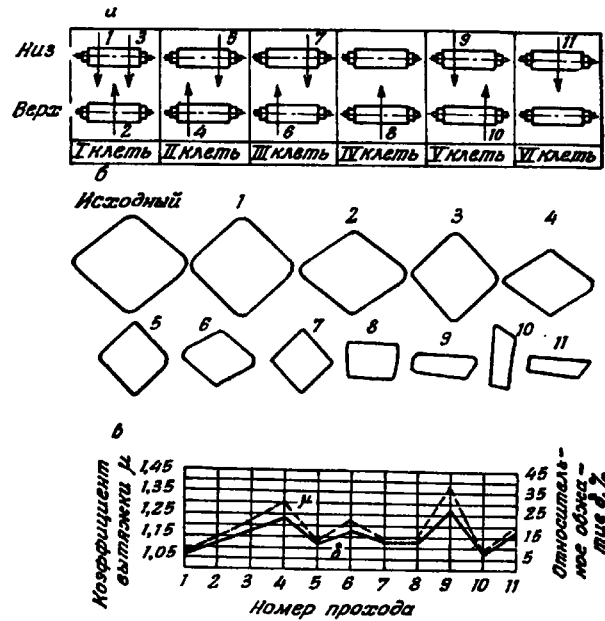














Рис. 75. Профиль клиновидной полосы


 Рис. 76. Прокатка клиновидной полосы из быстрорежущей стали размером: $29,6 \times 8,8 \times 6,4$ мм на стане 300:

а — схема прокатки; б — шаблоны; в — распределение по пропускам относительного обжатия и коэффициента вытяжки

Анализ калибровки клиновидной полосы из быстрорежущей стали

Таблица 40

№ пропускa	Форма калибра	Размер калибра, мм	Размер полосы, мм	h_0 мм	h_1 мм	$h_0 - h_1$ мм	$\frac{h_0}{h_1}$ %	$\frac{h_0}{h_1}$	$\frac{b_1 - b_0}{h_0 - h_1}$ мм	$\frac{b_1 - b_0}{h_0 - h_1}$	$\frac{w_{n-1}}{w_n}$	$\frac{1}{1 - \frac{w_{n-1}}{w_n}} \times 100$ %	$\frac{w_{n-1}}{w_n}$	α , град-мин
Исходная заготовка														
$37,1 \times 37,2$														
$43,7 \times 51,2$														
1		36	36 × 35,9	51,2	44,5	6,7	13,1	1,15	4,1	0,61	1,07	6,5	1,07	13—10
2		32,8	44,5 × 47,8	47,8	37,9	9,9	20,7	1,26	4,5	0,45	1,14	12,6	1,14	15—40
3		30	32,3 × 32,6	49,0	40,2	8,2	16,7	1,22	2,2	0,27	1,22	17,7	1,22	14—15
4		26	37,9 × 49,0	40,1	29,8	10,3	25,6	1,35	2,8	0,27	1,30	23,1	1,30	15—50
5		24	30,3 × 30,6	43,0	32,1	10,9	25,4	1,34	4,6	0,42	1,13	11,3	1,13	16—20
6		22	40,2 × 40,1	34,4	25,8	8,6	25,0	1,33	2,1	0,24	1,22	17,8	1,22	14—15
7		20	24,7 × 25,3	34,2	28,2	6,0	17,6	1,21	3,7	0,62	1,14	12,6	1,14	12—00
8			21,1 × 22,1	21,1	16,7	4,4	20,8	1,26	2,9	0,66	1,14	12,2	1,14	9—50
9			29,5 × 28,2	16,7 × 25,1	10,7	6,0	36,0	1,56	5,5	0,92	1,37	27,0	1,37	11—30
10			30,5 × 10,7 × 8,7	16,7	10,7	6,0	7,0	1,08	0,6	0,30	1,08	7,1	1,08	7—10
11			28,3 × 10,9 × 9,3	30,5	28,3	2,2	19,2	1,24	1,3	0,62	1,20	17,1	1,20	6—40
			29,6 × 8,8 × 6,4	10,9	8,8	2,1								

Рассматриваемая калибровка характеризуется некоторыми особенностями. В девятом пропуске прокатка металла происходит в условиях резко выраженной неравномерной высотной деформации по ширине калибра. Вследствие достаточно удовлетворительной пластичности стали марки Р9 в этом пропуске запроектирована максимальная вытяжка, равная 1,37.

Чтобы получить клин с острыми кромками, использован ребровой калибр. Кроме того, для ограничения уширения и получения острых кромок профиля конструкция чистовых калибров принята закрытого типа.

В девятом и одиннадцатом пропусках повышенные коэффициенты вытяжки (1,37 и 1,20) приняты потому, что при малых обжатиях имеет место значительная разность в коэффициентах деформации по ширине, что способствует скручиванию полосы при выходе ее из валков. Вследствие этого при прокатке полосовой стали рекомендуется пользоваться коэффициентами вытяжки не менее 1,15—1,2 за исключением ребровых калибров.

Расчет калибровки валков для прокатки клиновидного профиля нами не приводится, так как методика расчета аналогична расчету обычного полосового профиля.

IV. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ РАЗМЕРОВ КАЛИБРОВ ДЛЯ ПРОКАТКИ БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ¹

1. Ящичные калибры

Чтобы построить ящичный калибр, необходимо определить его основные размеры (рис. 77): высоту калибра h ; глубину вреза h_n и h_{π} ; ширину калибра b_n , b_p и b_{π} ; выпуск или уклон боковых стенок $\tan \varphi$; радиусы закругления ρ_1 и ρ_2 .

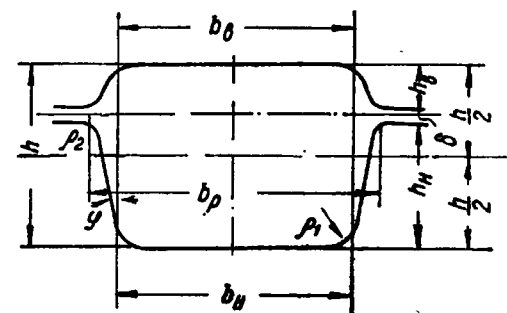


Рис. 77. Обозначение размеров ящичного калибра

Высоту калибра h определяют по коэффициенту вытяжки μ , принятому для проектируемого калибра, и площади предыдущего калибра. Допустим, имеем коэффициент вытяжки μ_2 и площадь предыдущего калибра ω_1 , тогда площадь расчетного калибра

$$\omega_2 = \frac{\omega_1}{\mu_2}.$$

Теоретическая ширина ящичного калибра равна:

$$b_T = b_1 + \Delta b,$$

где b_1 — ширина задаваемой в калибр полосы;
 Δb — уширение, определяемое по формуле (16).
 Тогда высота проектируемого калибра

$$h = \frac{\omega_2}{b_T} = \frac{\omega_2}{b_1 + \Delta b}.$$

¹ Расчеты выполнены А. А. Протасовым.

Учитывая колебания уширения и нежелательность переполнения калибра, ширину калибра в месте разъема валков b_p принимаем [49] с некоторым запасом

$$b_p = b_n + 1,5 \Delta b.$$

Величина выпуска получается из построения. Для прокатки быстрорежущей стали выпуск должен быть не более 10%.

Ширина калибра b_n связана с шириной задаваемой полосы. Ее принимают равной ширине задаваемой полосы или несколько меньше ее (на 1—2%). При этих условиях, хотя и увеличивается износ стенок калибра, но зато увеличивается степень стеснения уширения и устойчивость полосы против свертывания.

При подсчете уширения в калибрах, имеющих выпуск, за ширину полосы после пропуска принимают ее среднюю ширину:

$$b_{cp} = \frac{b_n + b_p}{2}.$$

Ширину калибра по дну вреза в верхний калибр b_v принимают равной ширине дна нижнего ручья b_n или на 1—3 мм больше ее.

Глубину вреза калибра h_n и h_v или глубину ручья определяют в соответствии с назначением калибра. Чем меньше отношение $\frac{h}{b}$, тем меньше глубина вреза.

Для прокатки качественных сталей глубина вresa в нижнем валке должна составлять не менее $\frac{2}{3}$ или 0,667 общей высоты калибра h . В действующей калибровке № 4 отношение глубины вresa в ящичных калибрах к общей высоте калибра близко к рекомендованной величине (табл. 41).

Таблица 41

Отношение глубины вresa в ящичных калибрах к высоте калибра

№ калибра	Высота калибра	Отношение глубины вresa в валок к высоте калибра		
		нижний валок	средний валок	верхний валок
1	190	0,667	0,295	—
2	155	—	0,295	0,593
3	190	0,667	0,295	—
4	155	—	0,295	0,593
5	135	0,685	0,263	—
6	133	—	0,267	0,680

Радиусы закруглений ρ_1 и ρ_2 связаны с размерами профиля и могут быть приняты равными:

$$\rho_1 = (0,17 \div 0,23) b;$$

$$\rho_2 = (0,15 \div 0,23) b.$$

Величина зазора между валками δ обжимного стана трио 600, где используются ящичные калибры, колеблется от 7 до 10 мм.

Практически каждая калибровка в процессе ее эксплуатации корректируется.

2. Круглые калибры

При проектировании калибровки валков для прокатки слитков быстрорежущей стали и вытяжной системы круг — круг прихо-

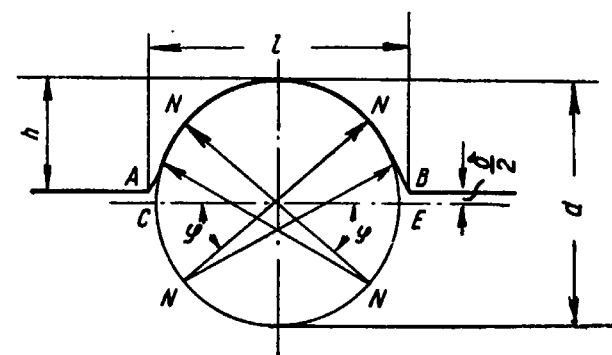


Рис. 78. Схема для построения чернового круга

дится рассчитывать основные размеры так называемого чернового круга (ребрового калибра), построение которого основано на величине отношения двух взаимно перпендикулярных осей $\frac{h}{l}$

Практикой установлено оптимальное отношение:

$$\frac{h}{l} = 0,40 \div 0,45,$$

где h — высота вresa;

l — ширина вresa.

Основные размеры чернового круга можно определить двумя способами: графическим и аналитическим.

Метод графического определения основных размеров чернового круга ясен из рис. 78. Угол φ , образованный пересечением линий NN (линии, соединяющие точки сопряжения) и CE , при отношении $\frac{h}{l} = 0,4$ принимается не более 45° ; при большем значении этого отношения — не более 40° .

Сущность аналитического метода заключается в следующем. Основной размер калибра — ширину вresa чернового круга l — определяют по формуле А. А. Протасова:

$$l = 2 \sqrt{d^2 - \left(\frac{b}{2} + \frac{d}{2} \sin \varphi \right)^2} - d \cos \varphi, \quad (17)$$

где l — ширина вреза;
 d — диаметр круга;
 δ — зазор между буртами валков.
 Пример. Дано: $d = 100$ мм; $\delta = 7$ мм; $\varphi = 40^\circ$.

После подстановки заданных величин в уравнение (17) получим размер ширины вреза:

$$l = 2 \sqrt{10^2 - (0,35 - 5 \sin 40^\circ)^2} - 10 \cos 40^\circ = 110 \text{ мм.}$$

Отношение глубины вреза к ширине равно 0,42.

Следует отметить, что ширина вреза, определенная этим способом, является величиной ориентировочной, так как после опро-

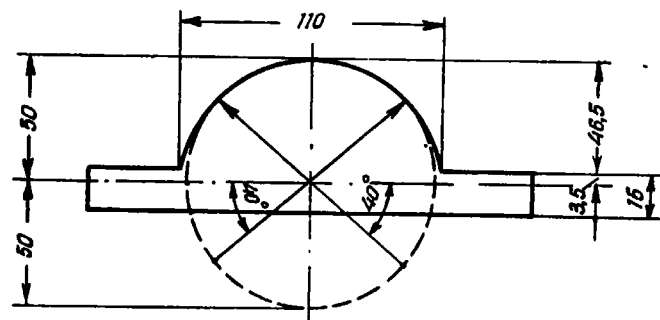


Рис. 79. Чертеж шаблона чернового круга

бования, возможно, выявится необходимость ее корректировки изменением угла φ . Если потребуется создать простор на уширение, то угол φ увеличивают, но не более чем до 45° , так как при большем угле простор на уширение значительно возрастает и условия объемного напряженного состояния деформируемого металла, с точки зрения пластичности, ухудшаются.

На основании данных, полученных в результате указанных выше расчетов, строят шаблон для расточки валков (рис. 79).

Калибры на валках следует располагать таким образом, чтобы секундное растяжение было не более 40—60 мм/сек.

3. Чистовой круглый калибр

При задаче овала в чистовой круглый калибр температура металла колеблется в пределах 850—1000°. При прокатке на непрерывных станах температура полосы в последних пропусках может быть более 1000°.

Таким образом, чтобы получить после охлаждения профиль точных размеров, необходимо размеры калибра увеличивать против размеров профиля в холодном состоянии на величину линей-

ной усадки при охлаждении. Величина линейной усадки a тела в каком-либо направлении равна

$$a = \alpha (t_2 - t_1) l_x,$$

где α — коэффициент линейного расширения, равный $12 \cdot 10^{-4}$ мм/град;

t_1 — температура воздуха;

t_2 — температура полосы при прокатке в чистовом калибре;

l_x — размер тела в холодном состоянии.

Для различных температур конца прокатки величина $\alpha (t_2 - t_1)$ равна:

t_2 , град	$\alpha (t_2 - t_1)$
800	0,010
900	0,011
1000	0,012
1100	0,013
1200	0,0145

Кроме того, для определения основного размера круглого калибра — его диаметра, принимают во внимание также допускаемое плюсовое отклонение диаметра Δ , предусмотренное ГОСТ 5650—51. Диаметр калибра в зависимости от диаметра полосы увеличивают на часть плюсового допуска:

Диаметр профиля мм	Увеличение диаметра калибра
8—24	0,75 Δ
24—50	0,50 Δ
50—80	0,40 Δ

Тогда диаметр горячего круглого профиля можно вычислить по формуле:

$$d_r = 1,013 d_x + (0,75 - 0,40) \Delta. \quad (18)$$

Построение шаблона для чистового круга сводится к следующему:

- проводят две взаимно перпендикулярные оси;
- из центра пересечения осей проводят окружность диаметром d_r , вычисленным по формуле (18);
- от центра окружности по вертикальной оси откладывают вверх отрезок, равный по величине $\frac{\delta}{2}$, а затем проводят хорду параллельно горизонтальному диаметру шаблона.

Общий вид шаблона для круглого профиля показан на рис. 80. Величину B можно определить по формуле:

$$B = 2 \sqrt{\left(\frac{d_2}{2}\right)^2 - \left(\frac{\delta}{2}\right)^2}.$$

Зазор между валками принимается от 1 до 10 мм, в зависимости от величины прокатываемого профиля (0,8—1,0% от диаметра валков).

Пример. Определить основные размеры шаблона для чистового круга диаметром 25 мм.

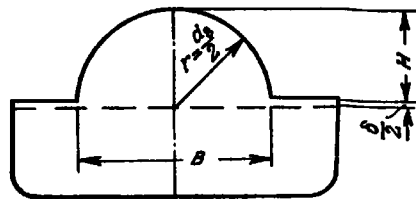


Рис. 80. Общий вид шаблона для чистового круга

Диаметр шаблона находим по формуле:

$$d_{ш} = 1,013 d_x + 0,5 \Delta$$

или после подстановки

$$d_{ш} = 1,013 \cdot 25 + 0,5 \cdot 0,9 = 25,775 \approx 25,8 \text{ мм.}$$

Принимаем $S = 1,5 \text{ мм.}$

$$R = \frac{d_{ш}}{2} = \frac{25,8}{2} = 12,9 \text{ мм.}$$

Тогда

$$B = 2 \sqrt{R^2 - S^2} = 2 \sqrt{12,9^2 - 1,5^2} = 25,6 \text{ мм.}$$

$$H = R - S = 11,4 \text{ мм.}$$

Иногда на практике, чтобы избежать переполнения чистового калибра, ширину шаблона доводят до 25,7, или 25,8 мм.

4. Чистовой овал

При определении основных размеров чистового овала для прокатки круга исходят из следующих данных:

- а) размер чистового круга в горячем состоянии;
- б) коэффициент вытяжки при прокатке овала в чистовом круглом калибре;

- в) уширение металла в чистовом калибре.

Зная эти величины, находят:

1. Площадь овала

$$\omega_{ов} = \mu \omega_{кр},$$

где $\omega_{кр}$ — площадь круга;

μ — коэффициент вытяжки.

2. Высоту овала

$$h_{ов} = d_r - \Delta b,$$

где d_r — диаметр чистового круга в горячем состоянии;

Δb — уширение в чистовом калибре.

Таблица 42

Отношение $\frac{b}{h}$ в овальных калибрах

Диаметр круга мм	Отношение		Размер стороны квадрата a мм
	$\frac{h}{d}$	$\frac{b}{h}$	
5—7	0,69—0,78	2,35—2,5	d
7—9	0,75—0,85	1,75—2,10	d
9—11	0,80—0,85	1,67—1,80	$d + (0,25 \div 0,50)$
12—15	0,80—0,87	1,60—1,70	$d+1$
16—20	0,87—0,90	1,50—1,60	$d+2$
21—25	0,90—0,92	1,47—1,50	$d+3$
26—35	0,90—0,94	1,47—1,50	$d+3$
36—40	0,90	1,40—1,50	$d + (4 \div 7)$
42—50	0,91	1,40	$d + (8 \div 12)$
52—60	0,92	1,40	$d + (12 \div 15)$
65—80	0,92	1,40	$d + (12 \div 15)$
80	0,93	1,40	$d + (12 \div 15)$

По данным $\omega_{ов}$ и h находят ширину овала b и его радиус $R_{ов}$.

В настоящее время существует три основных метода определения размеров овала, а именно: Кирхберга-Врацкого, Виноградова и Бахтинова.

Рассмотрим эти методы более подробно.

Метод Кирхберга-Врацкого

1. По формулам, указанным выше, определяют площадь овала $\omega_{ов}$, его высоту $h_{ов}$ и отношение $\frac{\omega_{ов}}{h^2}$.

2. По таблице Кирхберга находят $\frac{R_{ов}}{h}$ и $\frac{b}{h}$, соответствующие отношению $\frac{\omega_{ов}}{h^2}$.

3. По этим данным определяют основные размеры овала $R_{ов}$, h и b .

М. В. Врацкий предложил радиус овала определять по формуле:

$$R_{ов} = \frac{h}{2 \left(1 - \cos \frac{\varphi}{2} \right)}, \quad (19)$$

где φ — центральный угол овала.

Угол φ находят из выражения:

$$\varphi = 147,6 \frac{h^2}{\omega_{ов}}. \quad (20)$$

Зная радиус овала и центральный угол, определяют площадь овала по формуле

$$\omega'_{ов} = R_{ов}^2 \left(\frac{\pi\varphi}{180} - \sin \varphi \right). \quad (21)$$

Площадь овала $\omega'_{ов}$, рассчитанная по формуле (21), может быть больше, меньше или равна площади овала $\omega_{ов}$. В случае равенства площадей проверочного расчета не производят. При неравенстве площадей $\omega'_{ов}$ и $\omega_{ов}$ изменяют величину центрального угла φ и делают перерасчет.

Пример. Определим размеры овала для прокатки круглой стали диаметром 25 мм. Диаметр круглого калибра по формуле (18) равен

$$d_r = 1,13 \cdot 25 + 0,5 \cdot 0,9 = 25,8 \text{ мм.}$$

Площадь чистового круглого калибра

$$\omega_{кр} = \frac{\pi d_r^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 25,8^2}{4} = 522,5 \text{ мм}^2.$$

В соответствии с данными практики задаемся коэффициентом вытяжки при прокатке овала в чистовом калибре, равным 1,20.

Тогда площадь овала

$$\omega_{ов} = \mu \omega_{кр} = 1,20 \cdot 522,5 = 627 \text{ мм}^2.$$

Высота овала, с учетом его уширения Δb , в круглом калибре

$$h_{оз} = d_{кр} \Delta b = 25,8 - 3 = 22,8 \text{ мм.}$$

Уширение Δb независимо от диаметра круга можно брать 2—3 мм.

Находим отношение

$$K = \frac{\omega_{ов}}{h^2} = \frac{627}{519,84} = 1,187.$$

По таблице Кирхберга значению $K = 1,187$ соответствует отношение ширины овала к его высоте

$$y = \frac{b}{h} = 1,667,$$

откуда $b = 1,667$, $h = 1,667 \cdot 22,8 = 38,0 \text{ мм.}$

По таблице Кирхберга отношение радиуса овала к его высоте равно 0,9447, тогда

$$R = h \cdot 0,9447 = 22,8 \cdot 0,9447 = 21,54 \text{ мм.}$$

Центральный угол овала по Вращоу

$$\varphi = 147,6 \frac{h^2}{\omega_{ов}} = 147,6 \frac{22,8^2}{627} = 122,5^\circ$$

Радиус овала находим по формуле (19)

$$R_{ов} = \frac{h}{2 \left(1 - \cos \frac{\varphi}{2} \right)} = \frac{22,8}{2 (1 - \cos 61^\circ 15')} = 22,0 \text{ мм.}$$

Тогда площадь овала

$$\omega'_{ов} = R_{ов}^2 \left(\frac{\pi\varphi}{180} - \sin \varphi \right) = 22^2 (2,135 - \sin 122^\circ 30') = 626 \text{ мм}^2.$$

Из данных расчета следует, что расхождение между площадями $\omega_{ов}$ и $\omega'_{ов}$ незначительно. Это позволяет не производить корректировку данных расчета.

Таким образом, размеры чистового овала для круглой стали диаметром 25 мм, полученные с помощью таблицы и формул (19), (20) и (21), одинаковы и соответственно равны: $h = 22,8 \text{ мм}$; $b = 38,0 \text{ мм}$; $R_{ов} = 22,0 \text{ мм}$.

М. В. Вращкий рекомендует построение овала производить следующим образом (рис. 81):

а) проводят две взаимно-перпендикулярные оси;

б) из точки пересечения осей O вверх и вниз делают засечки радиусом $\frac{h_{ов}}{2}$ (точки AA) и вправо и влево — радиусом $\frac{b}{2}$ (точки BB);

в) из середины отрезка AB в точках K_1 и K_2 восстанавливают к ним перпендикуляры, пересекающие ось AA в точках M_1 и M_2 ;

г) из точек M_1 и M_2 , как из центров, описывают дуги окружностей радиусом r .

Этот метод построения шаблона для чистового овала применим для кругов диаметром 8—50 мм.

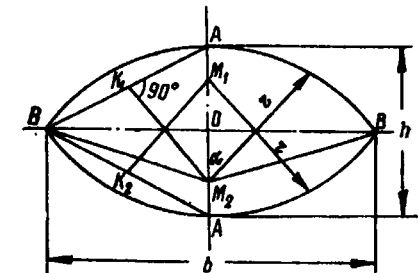


Рис. 81. Построение овала по методу Вращкого

Метод Виноградова

Чтобы найти ширину овала, пользуются данными табл. 42, составленной А. П. Виноградовым для кругов разных диаметров

Для круга диаметром 25 мм по Виноградову получаются следующие размеры овала:

$$\frac{h}{d} = 0,90 \quad \text{или} \quad h = 0,90 \cdot 25 = 22,5 \text{ мм};$$

$$\frac{b}{h} = 1,5 \quad \text{или} \quad b = 1,5 \cdot 22,5 = 33,75 \text{ мм.}$$

Из данных табл. 42 следует, что чем больше диаметр прокатываемого круга, тем менее вытянутым должен быть овал, так как отношение $\frac{b}{h}$ с увеличением диаметра круга уменьшается.

Метод Бахтинова

Размеры предчистового овала определяют по размерам предчистового квадрата и чистового круга методом описанных прямоугольников, как и для систем вытяжных калибров.

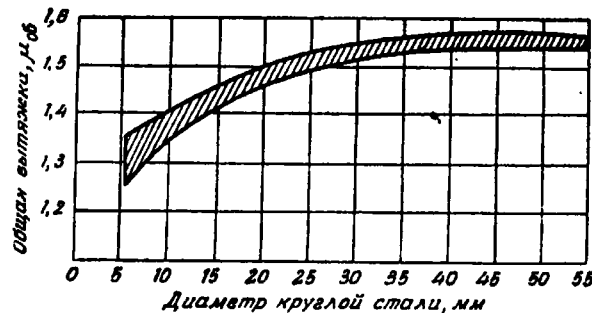


Рис. 82. Зависимость общей (от квадрата к кругу) вытяжки от размеров круглой стали по данным практики (по Б. П. Бахтинову и М. М. Штернову)

Пользуясь этим методом, определим размеры овала для прокатки круглой стали диаметром 25 мм.

Диаметр чистового круглого калибра, как мы ранее уже определили, равен $d_r = 25,8$ мм.

Площадь круглого калибра

$$d = 0,785 d_r^2 = 0,785 \cdot 25,8^2 = 522,5 \text{ мм}^2.$$

Принимаем зазор равным 3 мм.

По графику рис. 82 общая вытяжка от предчистового квадрата к чистовому кругу равна 1,50.

Определяем размеры квадратного калибра: площадь квадрата

$$\omega_{\text{кв}} = \omega_{\text{кр}} \mu_{\text{кв}} = 522,5 \cdot 1,50 = 785,0 \text{ мм}^2;$$

сторона квадрата

$$a_{\text{кв}} = \sqrt{\omega_{\text{кв}}} = \sqrt{785,0} = 28,0 \text{ мм.}$$

ширина и высота квадрата

$$b_{\text{кв}} = h_{\text{кв}} = 1,41 a_{\text{кв}} = 1,41 \cdot 28,0 = 39,5 \text{ мм.}$$

радиус закругления в углах квадрата

$$r_{\text{кв}} = 0,2 a_{\text{кв}} = 0,2 \cdot 28,0 = 5,6 \text{ мм.}$$

высота калибра с учетом закруглений

$$h'_{\text{кв}} = h_{\text{кв}} - 0,83 r_{\text{кв}} = 39,5 - 0,83 \cdot 5,6 = 33,9 \text{ мм.}$$

ширина вреза калибра при $\delta = 3$ мм

$$b_{\text{кв}} = b - \delta = 39,5 - 3 = 36,5 \text{ мм.}$$

Размеры овального калибра определяют следующим образом.

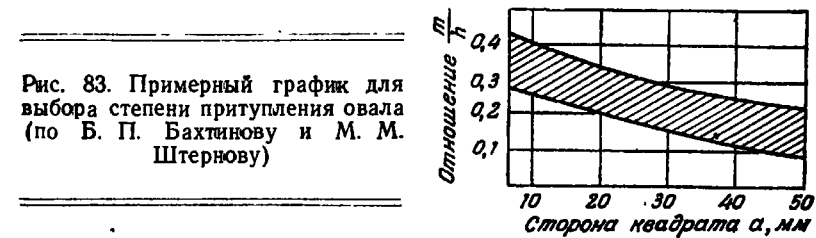


Рис. 83. Примерный график для выбора степени притупления овала (по Б. П. Бахтинову и М. М. Штернову)

По графику (рис. 83) $\frac{m}{h} = 0,25$.

Вычисляем отношение коэффициентов вытяжек по формуле:

$$\frac{\mu_1}{\mu_2} = 1,27 - 0,64 \frac{m}{h} = 1,27 - 0,64 \cdot 0,25 = 1,11.$$

Тогда площадь овала

$$\omega_{\text{ов}} = \frac{0,88 a_{\text{кв}} d_r}{\sqrt{\frac{\mu_1}{\mu_2}}} = \frac{0,88 \cdot 28 \cdot 25,8}{\sqrt{1,11}} \approx 583 \text{ мм}^2.$$

По графику (рис. 84) отношение высоты овала h к диаметру чистового круга d равно 0,87.

Тогда высота овала

$$h_{\text{ов}} = 0,87 \cdot 25,8 = 22,45 \text{ мм.}$$

Ширину овала определяем по формуле

$$b_{\text{ов}} = \frac{3\omega_{\text{ов}}}{h_{\text{ов}} \left(2 + \frac{m}{h}\right)} = \frac{3 \cdot 583}{22,45 (2 + 0,25)} = 35,0 \text{ мм.}$$

Находим остальные размеры овального калибра, необходимые для его построения

$$m = \frac{m}{h} h = 0,25 \cdot 22,45 = 5,6 \text{ мм.}$$

$$R_{\text{ов}} = \frac{b_{\text{ов}}^2 (h - m)^2}{4 (h - m)} = \frac{35,0^2 + (22,45 - 5,6)^2}{4 (22,45 - 5,59)} = 18,4 \text{ мм.}$$

Ширину вреза овального калибра в валки определяем графически или по формуле

$$b_{\text{кв}} = 2 \sqrt{(h_{\text{ов}} - \delta) R_{\text{ов}} - \left(\frac{h_{\text{ов}} \delta}{2}\right)^2} =$$

$$= 2 \sqrt{(22,45 - 3) 18,4 - \left(\frac{22,45 \cdot 3}{2}\right)^2} = 32,6 \text{ мм.}$$

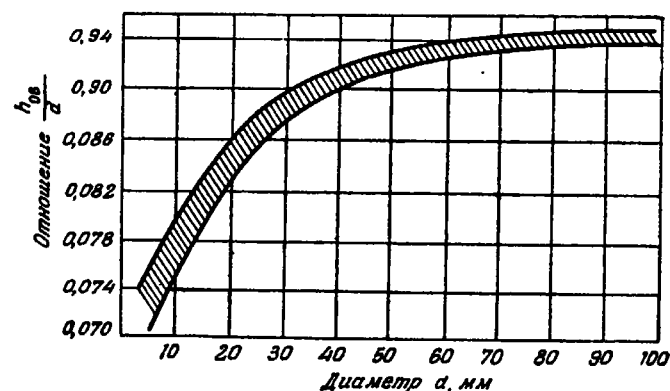


Рис. 84. Отношение высоты предчистового овала к диаметру круга в зависимости от величины диаметра (по Б. П. Бахтинову и М. М. Штернову)

Размеры чистового овала можно вычислить и по эмпирическим формулам:

$$\left. \begin{aligned} b &= 1,3 d_x + (2 \div 3) \text{ мм} \\ h &= 0,99 d_x - (1,6 \div 2) \text{ мм} \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

Основные размеры чистового овала для круглой стали диаметром 25 мм, определенные указанными выше методами, сведены в табл. 43. Для сравнения в этой же таблице приведены основные размеры чистового овала, вычисленные по эмпирическим формулам (22), и данные других авторов.

Резюмируя все сказанное о построении овалов, можно констатировать, что наиболее просто и точно размеры чистового овала можно определить по эмпирическим формулам (22).

В табл. 44 приведены размеры овалов по данным одного из заводов и размеры овалов, полученные расчетом по формулам (22).

Следует отметить, что размеры овалов, определяемые по эмпирическим формулам (22), обеспечивают получение удовлетворительных результатов при прокатке круга не только быстрорежущей стали, но и других специальных сталей и сплавов.

Таблица 43

Размеры чистового овала для круглой стали диаметром 25 мм по различным данным

Метод подсчета	Размеры овала, мм		
	<i>h</i>	<i>b</i>	<i>R</i>
Кирхберга-Вращского	22,8	38,0	22,0
Виноградова	22,5	33,75	17,0
Бахтинова и Штернова	22,45	35,0	18,4
Тефеля*	23,0	29,5	—
Брово*	22,0	42,5	—
Жеза*	20,0	37,5	—
Тринкса*	21,25	37,5	—
Справочник Хютте	23,15	34,5	—
По данным одного из заводов	23,0	35,4	19,15
По формулам (22)	23,15	35,5	—

* Данные взяты из книги П. А. Александрова, В. А. Писанко и С. Г. Еогатырева. Рациональная калибровка валков сортовых прокатных станков, ОНТИ, 1937.

Таблица 44

Размеры чистовых овалов для прокатки круглой стали диаметром 8—32 мм (по данным одного из заводов)

Диаметр круглой стали, мм	По данным практики		По данным расчета по формулам (22)	
	<i>b</i> , мм	<i>h</i> , мм	<i>b</i> , мм	<i>h</i> , мм
8	13,2	6,5	13,4	6,32
9	14,6	6,7	14,7	6,90
10	16,42	8,0	16,0	8,30
11	17,34	8,5	17,30	8,89
12	18,50	9,5	18,60	9,88
13	19,22	10,0	19,90	10,87
14	21,40	12,0	21,2	11,86
15	21,54	13,0	21,50	13,25
16	22,40	14,0	22,80	14,24
17	23,80	15,0	24,10	14,83
18	25,0	16,0	25,4	16,22
19	26,8	17,0	26,7	17,21
20	28,4	18,0	28,0	18,20
21	29,8	19,0	29,3	19,19
22	30,8	20,0	30,6	20,18
23	33,25	21,0	32,90	21,17
24	33,77	22,0	33,20	22,06
25	35,4	23,0	35,50	23,15
26	36,0	24,0	35,80	24,04
27	38,2	25,0	38,10	25,13
28	39,52	25,4	39,40	25,72
29	41,2	25,6	40,7	26,70
30	41,64	27,0	41,0	27,7
31	42,12	28,0	42,30	28,69
32	42,90	30,3	43,6	30,08

Зная размеры осей овала, площадь его определяют как площадь параболического сегмента по формуле

$$\omega_{\text{ов}} = \frac{2}{3} b h.$$

Б. П. Бахтинов и М. М. Штернов для определения площадей овала предложили более точную формулу

$$\omega_{\text{ов}} = \frac{1}{3} \left(\frac{m}{h} + 2 \right) b h,$$

где значение $\frac{m}{h}$ находят по рис. 83.

В заключение необходимо предупредить начинающих калибровщиков, что указанные выше формулы служат для получения

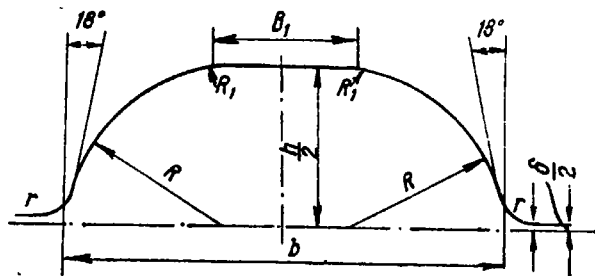


Рис. 85. Схема к построению плоского овала

предварительных размеров овала, которые впоследствии корректируются по результатам их применения. Весьма трудно разработать формулы для определения размеров калибров, используемых в различных условиях температуры конца прокатки, химического состава стали и его физических свойств, скорости прокатки, способа прокатки и т. п. Поэтому иногда лучшим способом, к которому следует прибегать при определении размеров калибра, является использование эмпирических формул. Это относится не только к определению размеров чистовых овалов, но и размеров других калибров.

При прокатке круглого профиля более крупных размеров чистовые овалы, строящиеся дугами круга, не используют по следующим основным причинам:

- 1) неустойчивости такого овала в проводках;
- 2) неравномерности деформации металла;
- 3) низкой температуры углов полосы.

Чтобы при прокатке круга диаметром 50 мм и более устранить перечисленные недостатки, используют так называемый плоский овал (рис. 85). Основные размеры такого овала определяют по

эмпирическим формулам, указанным в табл. 45 (данные М. В. Шуралева).

Таблица 45

Размеры, необходимые для построения предотделочных плоских овалов, мм (к рис. 85)

Диаметр круглой стали d , мм	b	b_1	R	R_1	r	t
>140	1,26 d	$(0,40 \div 0,43) d$	0,50 d	18	6—8	12
135—120		$(0,42 \div 0,45) d$		15	6—8	12
115—100		$(0,44 \div 0,48) d$		15	6—8	10
95—85		$(0,46 \div 0,50) d$		12	6	10
80—75		$(0,48 \div 0,52) d$	0,51 d	12	6	8
70—65		$(0,48 \div 0,52) d$		10	6	8
60—55		$(0,50 \div 0,52) d$		10	6	8
54—50		$(0,50 \div 0,53) d$		8	6	6

При применении плоских овалов чистовой калибр для прокатки круглой стали строят с небольшим развалом. Размеры шабло-

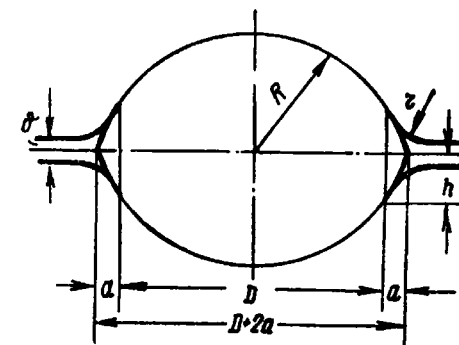


Рис. 86. Форма круглого калибра в случае применения плоского овала

нов для построения круглых калибров с небольшим развалом (рис. 86) определяют по табл. 46 (данные М. В. Шуралева).

По данным одного из заводов быстрорежущую сталь круглого профиля диаметром более 50 мм изготавливают ковкой. При производстве таких профилей прокаткой микроструктура стали получается неудовлетворительной. Так, например, при прокатке круглой стали диаметром 80 мм быстрорежущей стали марок Р18 и Р9 средний балл по карбидной ликвации достигает 7 (см. рис. 8).

Таблица 46

Размеры шаблонов, необходимые для построения круглых калибров
с небольшим развалом, мм]
(к рис. 86)

Диаметр в холодном состоянии d , мм	R	S	h	σ	r_1
90	45,6	5	0,1 d	0,5	3
100	50,65				
110	55,70		(0,1÷0,12) d		
120	60,75				
125	63,80				
132	66,85				
134	67,90			0,6	
140	70,95				
150	76,0				

V. ШАБЛОННОЕ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЕ ХОЗЯЙСТВО

1. Изготовление и хранение шаблонов для расточки валков

При обработке калиброванных валков применяют шаблоны, служащие для контроля расточки ручьев, а также для изготовления режущего инструмента специальных форм, соответствующих профилям калибров. Их изготавливают только после утверждения калибровки данного профиля по чертежам или эскизам, разрабатываемым для каждого калибра.

Шаблоны представляют собой точную копию калибра, ручья или их отдельного элемента. Их изготавливают обычно из листовой стали толщиной 1,0—1,5 мм с высокой степенью точности. Готовые шаблоны контролирует калибровщик или старший мастер вальцетокарной мастерской с помощью точных измерительных инструментов (микрометр, штангенциркуль). Угол наклона кромок шаблонов проверяют процентными угольниками или малкой. Окончательную приемку шаблонов производит контролер отдела технического контроля (ОТК). После изготовления и проверки их маркируют условными знаками (буквами или цифрами), соответствующими стану, клети, профилю и калибру.

Шаблоны изготавливают цельными, т. е. соответствующими полной величине и форме калибра, или составными из двух частей, соответствующих форме и величине обоих ручьев. Для особо сложных профилей изготавливают два-три шаблона для фасонных элементов профиля.

Учет наличия шаблонов ведут в специальном журнале.

Шаблоны выдают в работу на станки или в инструментальную мастерскую только после их приемки и регистрации. Для ходовых профилей рекомендуется изготавливать дубликаты, оригиналы же хранить как эталон для проверки рабочих шаблонов и применять только в случае особой необходимости.

Комплекты шаблонов хранятся в кабинете начальника вальцетокарной мастерской на специальных щитах.

Для предохранения от ржавления шаблоны периодически смазывают. Во избежание порчи поверхности рабочих контуров шаблонов при хранении и пользовании ими необходимо соблюдать осторожность.

2. Контршаблоны

Кроме шаблонов изготавливают также и контршаблоны, представляющие собой тонкую стальную пластинку толщиной 1,0—1,5 мм, с углублением, форма которого соответствует форме шаблона. Они являются точной копией ручьев, вытачиваемых на валке. Шаблоны и контршаблоны различных типов показаны на рис. 87.

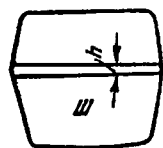
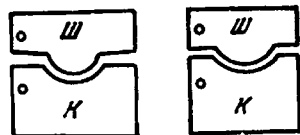


Рис. 87. Шаблоны (Ш) и контршаблоны (К) простых профилей

Контршаблоны служат для исправления профиля изношенных шаблонов и изготовления новых. Иногда по ним производят также контроль и заточку фасонных резцов. Учет и хранение контршаблонов осуществляется в соответствии с правилами, изложенными ранее для шаблонов.

3. Контрольно-измерительные инструменты

При нарезке валков и их очередном ремонте основная задача вальцетокаря — изготовить ручки требуемой формы и точности размеров и расположить их на бочке валка в полном соответствии с разработанной калибровкой. Качество и количество прокатываемой продукции в значительной степени зависит от качества выполнения работы по нарезке валков или их ремонту. Особо тщательно следует обрабатывать предчистовые и чистовые калибры, так как в них прокатываемому металлу придается окончательная форма нужного профиля.

Скорость точности измерений при обработке валков практически колеблется в пределах от $\pm 0,01$ до $\pm 0,1$ мм и редко достигает $\pm 0,001$ мм.

Валки для холодной прокатки обрабатывают с повышенной точностью, тогда как для валков обжимных станков допустима точность до 0,1 мм. В зависимости от требуемой точности измерения применяют различные инструменты, приборы и шаблоны.

Наружные диаметры валка измеряют кронциркулем 1 (рис. 88), представляющим собой две изогнутые стальные ножки, шарнирно закрепленные на общей оси. Для повышения чувствительности концы ножек (губки) выполняют плоскими, возможно большей ширины, и пригоняют друг к другу таким образом, чтобы при соединении между ними не было просвета. Зафиксированный раствор кронциркуля отсчитывают по металлической масштабной линейке, снабженной миллиметровыми делениями, или

по складному металлическому метру. В вальцетокарном деле применяют главным образом кронциркули и измерительные линейки больших размеров, позволяющие измерять величины 0,5—1,0 м и более. Кронциркулем специальной конструкции можно измерять с точностью до десятых долей миллиметра.

Для более точного замера наружных диаметров валков применяются предельные измерительные скобы 2 (рис. 89), снабженные на концах упорными винтами, имеющими небольшой шаг на-

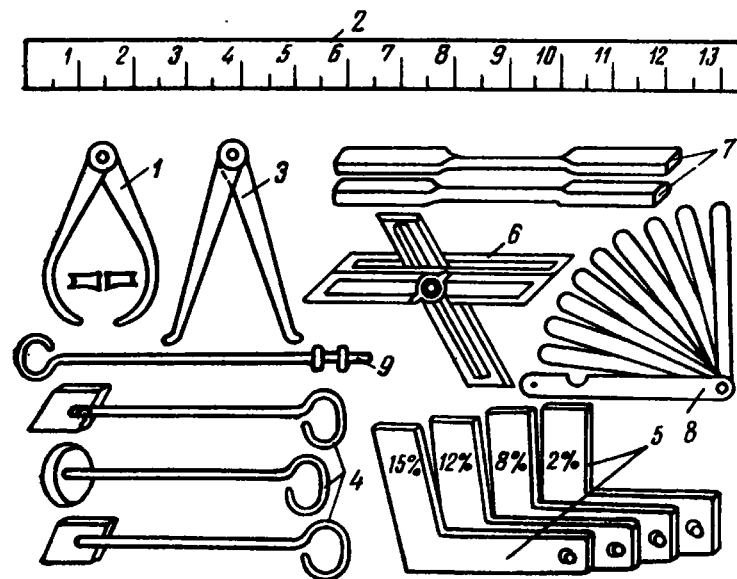


Рис. 88. Виды простейших измерительных инструментов:
1 — кронциркуль; 2 — миллиметровая линейка; 3 — нутромер; 4 — мерки с прутками; 5 — процентные угольники; 6 — малка; 7 — индивидуальные шупы; 8 — наборные шупы; 9 — прутки для съемных мерок

резки. Ими обычно проверяют точность размера диаметра обрабатываемых изделий, а также контролируют цилиндрическое очертание обрабатываемых поверхностей. При отсутствии эллиптичности или вогнутости валка скоба проходит в различных местах по одной и той же окружности при одинаковом нажиме. Длину бочки валка измеряют стальной скобой 3 (рис. 89) или обычным метром.

Диаметр внутренних отверстий, а также ширину и глубину калибров и ручьев измеряют нутромером 3 (см. рис. 88), ножки которого шарнирно соединены между собой и отогнуты в разные стороны. Точность измерений нутромером и кронциркулем не превышает $\pm 0,2$ мм.

Узкие и мелкие ручки измеряют металлическими мерками 4.

форма и размер которых точно соответствуют форме и размеру ручья. Их изготавливают из инструментальной стали и подвергают термической обработке. Для удобства пользования мерки имеют металлические прутки с колечками, на которых обозначены их размеры. Измерение меркой, как правило, производят во время вращения обрабатываемого валка. От частого пользования они постепенно изнашиваются, поэтому их приходится, по мере износа, заменять новыми.

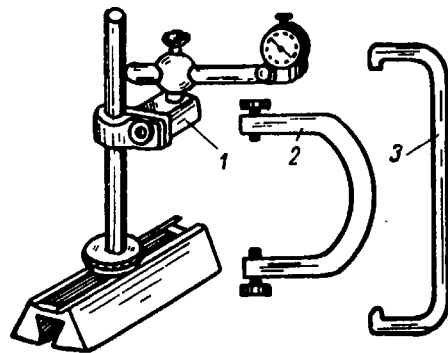


Рис. 89. Точные измерительные инструменты:

1 — индикатор; 2 — предельная скоба для измерения наружных диаметров; 3 — скоба для измерения длины бочки валка

ми глухими прорезами, и винта с барашком, служащим для закрепления пластинок между собой. Для удобства измерений концы обеих пластинок косо срезаны. Величину угла наклона, определенного малкой, измеряют процентным угольником.

Для точного измерения величины зазора между прямолинейными участками калибров используют щупы индивидуальные и наборные 8. Наборный щуп состоит из комплекта стальных закаленных пластинок толщиной от 0,04 до 0,1 мм. Комплект наборных и индивидуальных щупов дает возможность измерять зазоры величиной 0,5—25 мм.

Процентные угольники 5 служат для измерения углов наклона боковых стенок ручьев и буртов, выраженных в процентах. Обычно набор включает 20 таких угольников с уклоном от 1 до 200%. Угольники изготавливают из листовой стали и подвергают термической обработке.

В случаях малых размеров ручьев (узкие и мелкие ручки) или близкого их расположения друг к другу уклон стенок ручьев определяют малкой 6. Она состоит из двух прямоугольных пластинок, снабженных продольными

ЛИТЕРАТУРА

1. Д. К. Буленс. Сталь и ее термическая обработка, ГОНТИ, 1933. Сталь, 1950, № 12.
2. Е. И. Малинкин. О свойствах проката быстрорежущей стали. Сталь, 1950, № 12.
3. Э. Г. Думлер. О свойствах проката быстрорежущей стали. Сталь, 1953, № 7.
4. А. А. Пресняков. О мере пластичности металлов. Сб. «Обработка металлов давлением». Металлургиздат, 1953.
5. Ю. М. Чижиков. Влияние обжата при прокатке на пластичность металлов и сплавов. Сталь, 1949, № 12.
6. С. А. Баранов. Ковка чугуна. Сообщение Всесоюзного института металлов, № 8, 1931.
7. А. А. Бочвар. Металловедение. ОНТИ, 1935.
8. Я. С. Гинцбург. Прокатка специальных сортов стали. Металлургиздат, 1933.
9. М. И. Зуев, В. С. Култыгин, М. И. Виноград, Л. В. Остапенко, М. Н. Любинская и М. Я. Дзугутов. Пластичность стали при высоких температурах. Металлургиздат, 1954.
10. А. П. Гуляев. Металловедение. Оборонгиз, 1951.
11. А. А. Протасов. Сталь, 1949, № 12.
12. А. И. Целиков. Точное определение средней скорости деформации при прокатке. Сталь, 1954, № 12.
13. П. Е. Конторович. Термическая обработка стали и чугуна. Металлургиздат, 1940.
14. Ю. М. Чижиков. Новое в прокатке быстрорежущей стали. Сталь, 1943, № 7—8.
15. Новости иностранной металлургии, Метод выплавки легированных сталей и сплавов в изложнице. Сталь, 1948, № 12.
16. С. И. Губкин. Теория обработки металла давлением. Металлургиздат, 1947.
17. И. Г. Астахов. Распределение давления по контактной поверхности при прокатке, структура и свойства стали. Сб. трудов Московского ордена Трудового Красного Знамени института стали. Выпуск XXX. Металлургиздат, 1951.
18. Н. И. Сведе-Швец, Г. Г. Пегова, А. А. Протасов. Удельные давления при горячей прокатке легированных сталей. Сталь, 1948, № 5.
19. А. И. Целиков. Прокатные станы. Металлургиздат, 1946.
20. Ю. М. Чижиков. Влияние состава стали на уширение при прокатке. Материалы по теории прокатки, т. IV. Металлургиздат, 1948.
21. Д. Я. Хейн. Процесс ленточной и тонколистовой прокатки. Металлургиздат, 1941.
22. Люэ. Распределение напряжений и истечение металла при прокатке (Реф.). Советская металлургия, 1933, № 7.
23. В. Д. Кузнецов. Физика твердого тела. т. IV. Полиграфиздат, 1947.
24. И. М. Павлов. Теория прокатки, Металлургиздат, 1950.
25. М. В. Врацкий. Материалы по теории прокатки, ч. I. Металлургиздат, 1934.
26. В. Н. Рудбах, В. П. Северденко. Влияние внешнего трения на деформацию металла при прокатке. Сб. трудов Московского института стали. Выпуск XX, 1936.

27. И. М. Павлов, Н. Н. Гет. Влияние удельного давления при прокатке на коэффициент трения. *Металлург*, 1936, № 7.
28. В. Н. Рудбах, С. М. Сафонов. Изучение свойств окалины стали различного химического состава. *Сб. трудов Московского института стали*. Выпуск XX, 1936.
29. Л. Ф. Молотков. Коэффициент трения при горячей прокатке высокоуглеродистых сталей. *Теория и практика металлургии*, 1940, № 3.
30. Н. М. Федосов. «Прокатка и калибровка». *Сб. трудов Московского института стали*. Оборонгиз, 1940.
31. И. М. Павлов, Я. С. Галлай и Н. В. Силин. Исследование опережения при холодной прокатке. *Металлург*, 1934, № 4.
32. И. М. Павлов. К определению коэффициента трения при прокатке клещевым методом. *Сб. «Обработка металлов давлением»*, *Металлургиздат*, 1954.
33. И. М. Павлов. К теории определения расхода энергии при прокатке. *Металлург*, 1932, № 8.
34. И. М. Павлов. Равновесие сил при прокатке с уширением. *Сталь*, 1947, № 1.
35. И. М. Павлов и М. И. Капустина. Исследование опережения и отставания при прокатке в калибрах. *Сб. трудов Московского института стали*. Выпуск XXIX. *Металлургиздат*, 1950.
36. Н. П. Спиридонов. Определение коэффициента трения при прокатке на гладкой бочке при помощи диаграммы радиального давления. *Сб. «Обработка металлов давлением»*. *Металлургиздат*, 1952.
37. И. М. Павлов. *Теория прокатки*. Кубуч. 1934.
38. Ю. М. Чижигов. Прокатка и ковка высоколегированных сталей. *Металлургиздат*, 1941.
39. И. М. Павлов, Н. С. Иванов. Исследование неравномерной деформации при прокатке. *Металлург*, 1938, № 5.
40. И. М. Павлов, А. С. Гельдерман, А. И. Жукова. Количественный анализ неравномерности деформации при ковке. *Металлург*, 1936, № 7.
41. А. А. Протасов. Ковка шайб из быстрорежущей стали в калиброванных фасонных бойках. ТЭКСО, серия 21, № 703/13.
42. П. А. Александров. Принципы калибровки валков блумингов и условия деформации слитков. *Труды НТО черной металлургии*, том II, *Металлургиздат*, 1956.
43. В. С. Смирнов. Поперечная прокатка. *Машиз*, 1948.
44. А. А. Пресняков. К вопросу об условиях захвата металла валками при прокатке и коэффициент внешнего трения. *Сб. «Обработка металла давлением»*. *Металлургиздат*, 1952.
45. А. П. Чекмарев, П. Ф. Врля. Научные труды Днепропетровского металлургического института. Выпуск 1. 1939.
46. И. Я. Тарновский. Формоизменение при пластической обработке металлов. *Металлургиздат*, 1954.
47. Ю. М. Чижигов. Закономерность уширения при прокатке и анализ формул для его определения. *Сталь*, 1948, № 1.
48. Metz. Experimentale Untersuchungen über den Wälzvorgang. *Stahl und Eisen*, 1926.
49. Б. П. Бахтинов, М. М. Штернов. Калибровка прокатных валков. *Металлургиздат*, 1953.
50. Я. С. Гинцбург, К. К. Андрацкий. Прокатка качественной стали. *Металлургиздат*, 1953.

ЗАМЕЧЕННЫЕ ОПЕЧАТКИ

Стр.	Строка	Напечатано	Должно быть	По чьей вине
4	8 стр., колонка 2	$\psi' = \frac{\pi n}{60} (DD_p'')$	$\psi' = \frac{\pi n}{60} (D_p' - D_p'')$	Тип.
38	9 стр.	(2)	(2а)	Авт.
38	12 стр.	(2)	(2а)	»
44	2 стр.	см. стр. 111	см. стр. 109	»
44	1 стр.	в табл. 22	в табл. 25	»

Заказ 265