

Б. Б. ДИОМИДОВ, Н. В. ЛИТОВЧЕНКО

# КАЛИБРОВКА ПРОКАТНЫХ ВАЛКОВ



Б. Б. Диомидов, Н. В. Литовченко

# КАЛИБРОВКА ПРОКАТНЫХ ВАЛКОВ

*Д о п у щ е н о  
Министерством высшего и среднего  
специального образования СССР  
в качестве учебного пособия  
для студентов вузов  
по специальности  
«Обработка металлов давлением»*

---



ИЗДАТЕЛЬСТВО  
«МЕТАЛЛУРГИЯ»

Москва 1970

621.774  
Калибровка прокатных валков. Диомидов Б. Б., Литовченко Н. В. Изд-во «Металлургия», 1970, с. 312.

Изложены теоретические основы калибровки валков обжимных, заготовочных и сортовых прокатных станков. Приведены методики расчета калибров для наиболее распространенных горячекатаных профилей: блюмов, заготовок, узких полос, круглой, шестигранной, тавровой, угловой и зетовой стали, рельсов, двутавровых балок, швеллеров.

Предназначена в качестве учебного пособия для студентов вузов по специальности «Обработка металлов давлением». Может быть полезна инженерно-техническим работникам прокатных цехов, заводских лабораторий и проектно-конструкторских организаций. Илл. 235. Табл. 19. Библ. 31 назв.

ДИОМИДОВ БОРИС БОРИСОВИЧ  
ЛИТОВЧЕНКО НИКИТА ВАСИЛЬЕВИЧ

### КАЛИБРОВКА ПРОКАТНЫХ ВАЛКОВ

Редактор Ю. В. Владимиров  
Технический редактор А. А. Киселева  
Переплет художника В. З. Казакевича

Сдано в производство 30/XII 1969 г. Подписано в печать 25/V 1970 г.  
Бумага типографская № 2, 70×108<sup>1</sup>/<sub>16</sub>=9,75 бум. л. 27,30 печ. л. (усл.)  
Уч.-изд. л. 22,0 Заказ 10. Изд. № 5108. Т-09313 Тираж 4800 экз.  
Цена 97 коп.

Издательство «Металлургия»  
Москва, Г-34, 2-й Обыденский пер., 14

Владимирская типография Главполиграфпрома  
Комитета по печати при Совете Министров СССР  
Гор. Владимир, ул. Победы, д. 18-б

# СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Введение .....	5
<b>Часть первая</b>	
ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ КАЛИБРОВКИ ВАЛКОВ .....	7
Глава I. Задачи калибровки .....	7
1. Определение понятия калибровки .....	7
2. Классификация калибров .....	8
3. Задачи калибровки .....	10
4. Элементы калибра .....	12
5. Диаметры отдельных элементов бочки валков .....	16
6. Дополнительные факторы, которые необходимо учитывать при калибровке .....	19
7. Прокатные валки .....	21
Глава II. Теоретические положения калибровки .....	24
1. Равномерная и неравномерная деформация металла по ширине .....	24
2. Распределение частных вытяжек по проходам .....	26
3. Методы расчета режимов обжатий .....	31
4. Характер деформации при прокатке и расчетные формулы уширения ..	38
5. Средняя линия валков. Линия прокатки. Катающий диаметр .....	45
6. Определение положения нейтральной линии калибра .....	47
7. Принцип расчета калибровки непрерывных станов .....	50
8. Схема расчета калибровки. Составление общей схемы калибровки с учетом всего сортамента и типа стана .....	54
<b>Часть вторая</b>	
СИСТЕМЫ ВЫТЯЖНЫХ И ЧЕРНОВЫХ КАЛИБРОВ .....	58
Глава III. Система прямоугольных (ящичных) калибров .....	58
1. Калибровка блюмингов .....	58
2. Расчет режимов обжатий на слябинге .....	66
3. Определение длины раската при прокатке на блюминге и слябинге ....	68
4. Калибровка заготовочных станов и черновых клетей сортовых станов ..	68
5. Методы расчета режимов обжатий при применении системы калибров прямоугольник — ящичный квадрат .....	69
6. Расчет режимов обжатий на обжимно-заготовочных станах трио .....	87
Глава IV. Системы калибров ромб — квадрат и ромб — ромб .....	90
1. Система калибров ромб — квадрат .....	90
2. Система калибров ромб — ромб .....	96
Глава V. Системы калибров овал — квадрат и шестиугольник — квадрат .....	98
1. Характеристика систем калибров овал — квадрат и шестиугольник — квадрат .....	98
2. Расчет калибров системы овал — квадрат .....	101
3. Расчет калибров системы шестиугольник — квадрат .....	105
Глава VI. Системы калибров овал — вертикальный овал, овал — круг, овал — стрелчатый квадрат и другие .....	111
1. Система овал — вертикальный овал .....	111
2. Система калибров овал — круг .....	117
3. Система калибров овал — стрелчатый квадрат .....	119
4. Система калибров ребровой прямоугольник с закругленными сторонами — овал .....	122
<b>Часть третья</b>	
КАЛИБРОВКА ПРОСТЫХ ПРОФИЛЕЙ .....	127
Глава VII. Калибровка круглой стали и арматурной стали периодического профиля .....	127
1. Схема калибровки круглой стали .....	127
2. Расчет и построение чистового калибра для круглого профиля .....	131
3. Расчет и построение предчистового овального калибра .....	133

4. Расчет предовальных калибров .....	136
5. Калибровка арматурной стали периодического профиля .....	138
Глава VIII. Калибровка квадратной стали .....	145
1. Расчет калибров системы ромб — квадрат .....	145
2. Особенности прокатки квадратной стали с острыми кромками .....	149
3. Построение чистовых калибров для квадратной стали .....	154
Глава IX. Калибровка шестигранной стали .....	157
1. Характеристика схем калибровки, применяемых при прокатке шестигранной стали .....	157
2. Методика расчета калибров и режимов обжатий при прокатке шестигранной стали .....	158
Глава X. Калибровка узких полос .....	165
1. Способы прокатки узкополосной стали .....	165
2. Общий принцип расчета размеров исходной заготовки .....	166
3. Общая схема расчета режимов обжатий .....	170
4. Схема прокатки тонких полос с острыми кромками .....	177
5. Калибровка двояковогнутой рессоры .....	178
6. Калибровка гаечной полосы .....	181
7. Калибровка желобчатой рессорной стали .....	183
8. Калибровка полос, получаемых вынужденным уширением .....	187
<b>Часть четвертая</b>	
<b>КАЛИБРОВКА УГЛОВОЙ И ЗЕТОВОЙ СТАЛИ</b> .....	188
Глава XI. Калибровка угловой стали .....	188
1. Расчеты калибровок угловой стали .....	195
Глава XII. Калибровка зетовой стали .....	212
1. Методы расчета калибров зетовой стали .....	214
2. Расчет ширины и высоты калибра при расположении его в валках ....	222
3. Калибровка зетовой стали для хребтовой балки .....	223
<b>Часть пятая</b>	
<b>КАЛИБРОВКА ФЛАНЦЕВЫХ ПРОФИЛЕЙ</b> .....	224
Глава XIII. Калибровка двутавровых балок .....	224
1. Профиль и его характеристика .....	224
2. Особенности прокатки и калибровки двутавровых балок .....	224
3. Расчет калибровки двутавровых балок по коэффициентам деформации ..	241
4. Расположение калибров на валках .....	248
5. Прокатка балок в косорасположенных калибрах .....	251
6. Калибровка балок с параллельными полками .....	252
Глава XIV. Калибровка швеллеров .....	258
1. Профиль и его характеристика .....	258
2. Схемы прокатки и методы калибровки швеллеров .....	258
3. Расчет калибровки швеллеров .....	267
Глава XV. Калибровка тавровой стали .....	274
1. Пример расчета калибровки тавровой стали $38 \times 29 \times 5$ мм .....	276
2. Калибровка тавровой стали с большой длиной стенки и широкими полками .....	278
Глава XVI. Калибровка рельсов .....	281
1. Профиль и его характеристика .....	282
2. Общая схема калибровки железнодорожных рельсов .....	282
3. Расчет калибровки рельса Р-50 .....	293
<b>Часть шестая</b>	
<b>ВАЛКОВАЯ АРМАТУРА. ВАЛЬЦЕТОКАРНОЕ ПРОИЗВОДСТВО</b> .....	299
Глава XVII. Валковая арматура .....	299
1. Назначение и классификация арматуры .....	299
2. Вводная валковая арматура .....	302
3. Выводная валковая арматура .....	303
4. Выводная кантовальная арматура .....	303
Глава XVIII. Вальцетокарное производство .....	308
1. Шаблоны и контршаблоны, применяемые при расточке валков .....	308
2. Инструменты, применяемые в вальцетокарном производстве .....	310
<b>Литература</b> .....	312

## ВВЕДЕНИЕ

Роль и значение черной металлургии в создании материально-технической базы коммунизма, перспективы и задачи этой важнейшей отрасли народного хозяйства всесторонне освещены в материалах XXIII съезда КПСС и последующих партийных директивах и постановлениях. В этих документах подчеркнута необходимость опережающего развития производства черных металлов, что является одним из главных условий общего подъема всей экономики страны.

Выполняя грандиозные народнохозяйственные планы, советские металлурги добились высоких и устойчивых технико-экономических показателей в выплавке чугуна и стали, в производстве проката, труб и метизов.

Основными направлениями технического прогресса в черной металлургии на предстоящее десятилетие (1971—1980 гг.) является повышение качества металла, увеличение производства его, расширение сортамента, освоение новых видов готовой продукции. При этом преимущественное развитие получит производство листового проката, фасонных профилей высокой точности, катанки, сварных труб, а также проката, труб и метизов термически упрочненных, с металлическими и неметаллическими покрытиями. Наряду с расширением сортамента проката за счет полного освоения производства профилей, предусмотренных действующими ГОСТами, намечается организовать выпуск новых экономических профилей, широкополочных балок, специальных профилей для машиностроения, в том числе периодического сечения, гнутых и холодно-тянутых. Применение прочных и экономичных профилей снижает потери металла в металлургии и у потребителей, повышает производительность, надежность и долговечность машин, механизмов и строительных конструкций. Намечается расширить сортамент труб большого диаметра для сооружения мощных газопроводов. Заметно повысятся скорости прокатки: на листовых станах горячей прокатки они достигнут  $25 \div 30$  м/сек, на станах холодной прокатки  $40 \div 50$  м/сек, на проволочных станах  $60$  м/сек и более.

Калибровка валков является технологической основой прокатного производства и ее роль в достижении высокой производительности прокатных станов, высокого качества готовой продукции и экономии металла очень велика. Роль калибровки особенно важна и потому, что в прокат перерабатывают свыше 90% всей стали, выплавляемой в стране. Постоянное увеличение сортамента и особенно расширение производства экономичных профилей требуют и постоянного совершенства способов и методов калибровки, улучшения качества прокатных валков.

Настоящая книга знакомит читателя с методами расчета калибровок наиболее широко распространенных профилей проката. При этом делается попытка приводить наиболее совершенные схемы обжатий ме-

талла и калибровки, разработанные на основе теории обработки металла давлением и применяемые на передовых предприятиях страны.

В развитие и совершенство калибровки как технологической основы прокатного производства большой вклад внесли В. Е. Грум-Гржимайло, А. П. Виноградов, А. Ф. Головин, И. М. Павлов, А. П. Чекмарев, В. С. Смирнов, Н. М. Федосов, П. И. Полухин, Н. П. Громов, И. Я. Тарновский, П. А. Александров, Д. И. Старченко, Б. П. Бахтинов, М. С. Мутьев, В. П. Северденко, М. Л. Зарошинский, М. И. Бояршинов, М. М. Штернов, В. А. Тягунов, Ю. М. Чижилов, Т. М. Голубев, В. Н. Выдрин, И. И. Кучко, Б. В. Мерекин, А. А. Протасов, И. П. Шулаев, Н. Ф. Грицук, В. П. Полушкин и другие отечественные ученые и практики.

Из зарубежных исследователей, много сделавших для развития калибровки валков, следует назвать А. Брово, Л. Жеза, Э. Кирхберга, В. Тафеля, Н. Метца, В. Тринкса, Р. Бейнона и других.

Использование достижений научно-исследовательских институтов и лабораторий, а также положительного опыта работы заводских коллективов прокатчиков и калибровщиков — большой резерв в достижении намеченных рубежей развития отечественного прокатного производства в ближайшие годы.

Книга выходит в 1970 г., когда советский народ, трудящиеся всех стран мира отмечают 100-летие со дня рождения В. И. Ленина. Опубликованные в печати в связи с этой знаменательной датой материалы показывают, как много и постоянно уделял внимание Владимир Ильич созданию материально-технической базы социализма и коммунизма в нашей стране, подъему промышленности и в первую очередь всемерно — развитию тяжелой индустрии. Он положил начало развитию минерально-сырьевой и энергетической базы нашей экономики, без чего был бы невозможен бурный рост производства металлов в годы первых пятилеток и в последующий период. И ныне, когда отмечается Ленинский юбилей, советские металлурги отдадут дань глубочайшего уважения великому учителю нынешнего и грядущих поколений.

## Часть первая

# ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ КАЛИБРОВКИ ВАЛКОВ

## Глава I

### ЗАДАЧИ КАЛИБРОВКИ

#### 1. Определение понятия калибровки

*Калибр* — просвет определенной формы, образованный валками в их рабочем положении в прокатной клети (рис. 1). Кольцевой вырез или выступ любой формы на бочке одного валка называют *ручьём*. При прокатке сортового металла и фасонных профилей\* *ручьи* на каждом из валков могут иметь различное очертание (рис. 2). Два *ручья* — верхнего и нижнего валков и зазор между валками составляют *калибр*\*\* . При прокатке листовой стали валки не имеют никаких вырезов и их рабочую часть, где прокатывается металл, принято называть «гладкой бочкой», хотя она, как правило, имеет определенную профилировку. Просвет же между валками в их рабочем положении при прокатке листовой стали также именуется калибром. Под *калибровкой* понимают определение формы и размеров ряда последовательных переходных сечений прокатываемого металла от исходной заготовки до готового профиля. По этим сечениям конструируют калибры. В понятие калибровки входят также правила расположения калибров на валках, обеспечивающие требуемые условия прокатки и прочность валков.

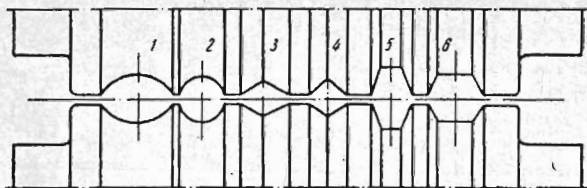
Все готовые профили прокатывают обычно за несколько проходов. Как правило, исходная заготовка для прокатки имеет прямоугольное или квадратное сечение. В каждом проходе промежуточные поперечные сечения металла в процессе прокатки — переходные сечения — могут иметь разнообразные формы (рис. 3). В задачу калибровки входит определение таких переходных сечений, которые являются наиболее рациональными с точки зрения всего технологического процесса прокатки. Эти сечения по всем своим элементам должны быть определены на основе законов пластической деформации и условий прокатки металла.

Следовательно, калибровка включает в себя определение режимов (величин) обжатий металла по проходам, а также схему прокатки данного профиля применительно к тому или иному стану. При этом должны учитываться прочность механического оборудования стана, мощность двигателей, условия работы обслуживающего персонала.

Велико значение калибровки для обеспечения высокого качества поверхности готового профиля и высокой точности его размеров. Калиб-

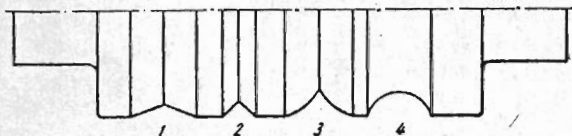
\* Профиль — геометрическая форма поперечного сечения прокатываемого металла.

\*\* В настоящее время обычными становятся и многовалковые калибры, т. е. калибры, образованные несколькими валками.



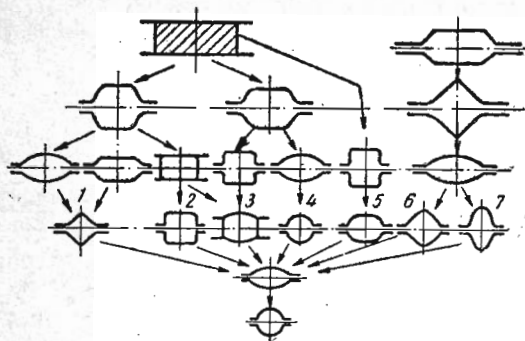
Р и с. 1. Калибры различной формы:

1 — овалный; 2 — круглый; 3 — ромбический; 4 — квадратный; 5 — ребровой (для узкополосной стали); 6 — прямоугольный (ящичный)



Р и с. 2. Ручьи на бочке валька:

1 — ромбического калибра; 2 — квадратного калибра; 3 — для прокатки угловой стали; 4 — овалного калибра



Р и с. 3. Переходные сечения (предовальные калибры) при прокатке круглой стали:

1 — квадрат; 2 — ящичный квадрат; 3 — универсальный овал; 4 — круг; 5 — стрельчатый ящичный квадрат; 6 — стрельчатый квадрат; 7 — вертикальный овал

ровка во многом определяет и производительность прокатных станов. Таким образом, калибровка составляет технологическую основу прокатного производства. При калибровке прежде всего определяют размеры калибров для раскатов или готового проката соответствующих сечений. Как правило, калибры имеют размеры и форму, несколько отличающиеся от размеров и формы сечения прокатанного металла. Это различие определяется степенью сложности сечения. Чем ближе сечение к простейшим формам (квадрат, прямоугольник), тем большая разница между размерами раската и размерами калибра. Особенно это относится к блюмингам, заготовочным станам, черновым группам клетей сортовых станов. В частности, разница между размерами раската и калибра имеет существенное значение при конструировании предчистовых овальных калибров, служащих для получения круглой стали нескольких смежных размеров. Раскат, выходящий из овального калибра, часто не имеет совпадающих с ним формы и размеров; во избежание переполнения калибра целесообразно иметь некоторую свободную от металла площадь для случаев, когда уширение превысит расчетное. Калибры для фасонных профилей (угловая сталь, швеллеры, двутавровые балки, рельсы) в большинстве случаев имеют размеры, соответствующие найденным размерам сечения прокатываемого металла.

## 2. Классификация калибров

Калибры различаются по форме, конструкции и назначению. По форме (рис. 4) калибры могут быть: прямоугольными (ящичными),

квадратными, ромбическими, овальными, круглыми, шестиугольными, многоугольными, сложной конфигурации (для угловой стали, двутавровых балок, швеллеров) и другими в соответствии с формой прокатываемого профиля. К данному же признаку классификации следует отнести и другую характеристику, имеющую большое значение при калибровке, это — наличие осей симметрии в калибрах. Различают: а) калибры, имеющие две оси симметрии, вертикальную и горизонтальную — калибры с полной симметрией; б) калибры, имеющие одну ось симметрии — с неполной или одноосной симметрией; в) калибры, не имеющие осей симметрии — асимметричные. Примером калибров с полной симметрией могут быть квадратные, круглые, ромбические, прямоугольные; с неполной или одноосной симметрией являются калибры для угловой стали, швеллерные, балочные и другие; асимметричные калибры обычно встречаются при прокатке профилей сложной формы — автообода, бортового кольца, лемеха, тракторного башмака и т. д.

По конструкции калибры подразделяются на открытые и закрытые (рис. 5). В случаях, когда линии разъема валков находятся в пределах контура калибра, его называют открытым. Открытыми обычно являются калибры с полной симметрией; при этом разъем, как правило, находится на горизонтальной оси симметрии (в горизонтально расположенных валках). При вертикальном расположении валков разъем находится на вертикальной оси симметрии.

Если линии разъема валков расположены за пределами очертания калибра, то он является закрытым. Закрытые калибры обычно применяют при прокатке фасонных профилей (швеллеров, двутавровых балок, угловой стали) и, как правило, имеют одну вертикальную ось симметрии.

Однако за последнее время при прокатке некоторых фасонных профилей, например, угловой стали, балок и швеллеров, с успехом применяют и открытые калибры, особенно в чистовых проходах.

По назначению калибры (рис. 6) подразделяют на обжимные или вытяжные, черновые или подготовительные, предотделочные или предчистовые и, наконец, отделочные или чистовые.

Обжимные или вытяжные калибры предназначены для уменьшения площади поперечного сечения исходной заготовки до площади, необходимой перед первым профильным калибром.

Черновые или подготовительные калибры в процессе прокатки последовательно приближают исходное сечение заготовки к конфигурации конечного профиля. В последнем подготовительном калибре раскат приобретает форму поперечного сечения, близко подходящую к форме готового профиля. В предотделочном калибре раскат формируется до сечения с размерами, часто мало отличающимися от размеров чистового профиля (двутавровые балки, швеллеры, угловая сталь). При прокатке большинства простых профилей — круглой, квадратной стали, отчасти полосовой и других — предчистовой калибр резко отличается по форме от готового профиля. Предчистовой калибр для ряда профилей сортовой стали предназначен для получения отдельных элементов готового профиля и подготовки раската для окончательного формирования. Так, при прокатке квадратной стали предчистовым является ромбический калибр. В нем формируются окончательно два угла готового квадратного профиля, а два других его угла и размеры диагоналей получают в чистовом калибре. При прокатке круглой стали предчистовым является овальный калибр. В овальном калибре осуществляется подготовка очертания готового профиля круглой стали, а в чистовом калибре окончательно получают готовый профиль с точным диаметром.

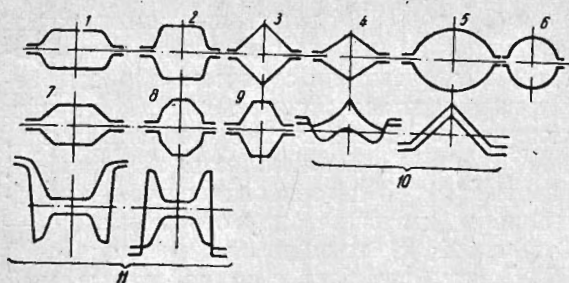


Рис. 4. Калибры различной формы:

1 — ящичный (прямоугольный); 2 — ящичный квадрат; 3 — квадратный; 4 — ромбический; 5 — овальный; 6 — круглый; 7 — шестиугольный; 8 — многоугольный; 9 — ребровой; 10 — для угловой стали; 11 — для двутавровой балки

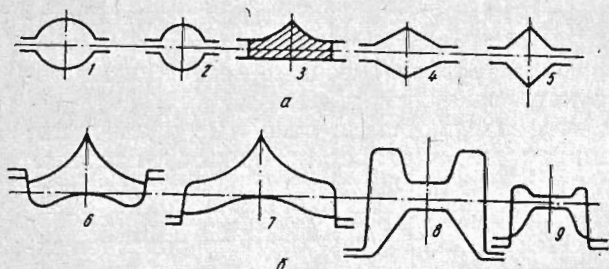


Рис. 5. Открытые (а) и закрытые (б) калибры:

1 — овальный; 2 — круглый; 3 — черновой калибр угловой стали; 4 — ромбический; 5 — квадратный; 6 — калибр угловой стали, имеющий раздел сверху; 7 — калибр угловой стали, имеющий раздел снизу; 8 — балочный калибр, имеющий раздел снизу; 9 — швеллерный калибр, имеющий раздел снизу

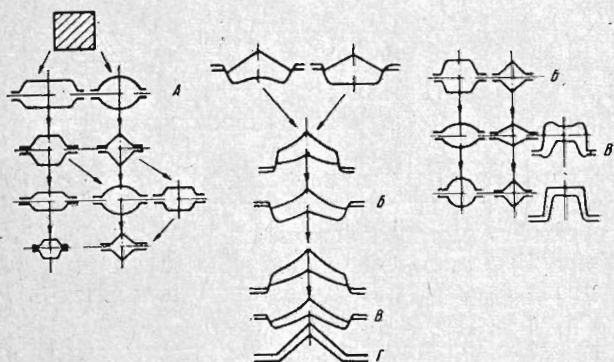


Рис. 6. Калибры различного назначения:

А — обжимные или вытяжные; Б — черновые или подготовительные; В — предчистовые; Г — чистовые

За последнее время при прокатке фасонных профилей в качестве предчистового применяют калибр с размерами чистового профиля. Применение двух последовательно расположенных и одинаковых по размерам калибров — предчистового и чистового — способствует обеспечению более высокой точности и высокого качества готового профиля, а также высокой стойкости чистового калибра.

### 3. Задачи калибровки

Успешная прокатка любого профиля определяется тем, насколько совершенна калибровка. Первоочередной задачей калибровки является определение рациональной формы раската в каждом переходном сечении. Поэтому при калибровке прежде всего решают задачу определения наиболее правильной формы калибров и размеров их в каждом проходе, обеспечивающих надежное и устойчивое получение всех заданных элементов готового профиля в соответствии с законами пластической деформации металлов и теорией прокатки. Второй задачей калибровки является определение минимального числа проходов, за которое можно

получить готовый профиль. Но при расчетах калибровки необходимо стремиться к тому, чтобы в главных линиях прокатных станов были оптимальные нагрузки, что определяется принимаемыми средними величинами вытяжек (точнее — коэффициентов вытяжки) или коэффициентами деформации в каждом проходе.

Чем меньше число проходов при прокатке данного профиля, тем общая схема калибровки рациональнее, экономичнее, так как при этом требуется меньший парк дорогостоящих прокатных валков, вводной и выводной валковой арматуры, упрощается настройка клетей, облегчается обслуживание стана. В целом технико-экономические показатели работы стана при этом улучшаются. Уменьшение числа проходов на линейных станах непосредственно связано с повышением их производительности.

При прокатке важно, чтобы раскат не терял резко пластических свойств в связи со снижением температуры. Задаваемые условия формоизменения металла должны быть такими, чтобы температура его уменьшалась незначительно. Таким образом, задачей калибровки является также обеспечение деформации металла в калибрах при высокой и равномерно распределенной по сечению температуре, сохранение высокой температуры и пластичности металла.

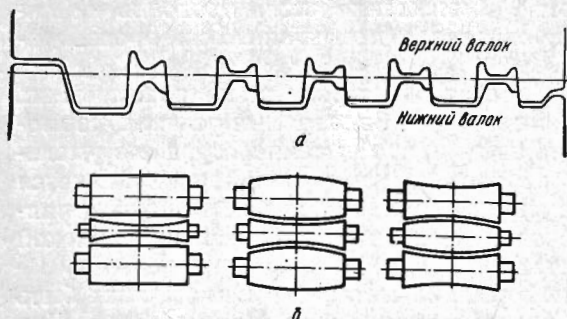
Форма калибра и условия деформации металла в нем должны быть такими, чтобы расход энергии на деформацию был минимальным. При прокатке, например, швеллеров, двутавровых балок и других фасонных профилей, можно предусмотреть различное уширение, отличающееся от естественного. Обычно при этом чаще всего предусматривают так называемое стесненное уширение, величина которого меньше естественного. Защемление раската при стесненном уширении в калибре приводит к повышенному расходу энергии. В связи с этим задачей калибровки является определение размеров калибров с таким расчетом, чтобы деформация металла по возможности была облегчена. Несоответствие формы калибра желаемым условиям деформации в нем вызывает снижение качества готового профиля. Если форма и размеры калибров будут такими, что температура металла по проходам будет резко уменьшаться и если при этом в калибре будет защемление раската в связи со стесненным уширением, то эти обстоятельства приведут к ускоренной выработке (износу) валков, увеличению коэффициента трения, повышенному расходу энергии, ухудшению качества поверхности проката. Чрезмерная выработка калибров заметно изменяет первоначально заданные форму и размеры профиля, вследствие чего может произойти перераспределение качественных и количественных условий деформации металла в калибрах и даже полное нарушение процесса прокатки, исключающее получение требуемого профиля.

Задачей калибровки является также обеспечение простоты настройки прокатных клетей, минимальных простоев стана, связанных с переходами с одного профиля на другой и перевалками, высокой производительности. Сложность или простота настройки определяются как заданными режимами обжатий в соответствии с калибровкой профиля, так и формой переходных сечений, конструкцией валковой арматуры, устойчивостью положения раската в калибре и жесткостью положения валков в клетях. Задача калибровки объединяет в себе и рациональное использование бочки валков, определение положения калибров в валках, а также размеров калибров.

По найденным форме и размерам переходных сечений определяют размеры калибра. Важным является правильное определение положения калибра относительно средней линии валков. Кроме того, должно

быть уделено внимание рациональному использованию длины бочки валков с тем, чтобы в валках было расположено максимальное число калибров. При этом надо учитывать прочность буртов между калибрами и крайних буртов.

Калибровка валков полосовых (листовых) станов сводится к определенной профилировке бочки валка. Бочку валков полосовых и обычных листовых станов горячей и холодной прокатки делают выпуклой или вогнутой; та или иная форма профилировки бочки валка зависит от типа стана, его сортамента и назначения клетки в общем составе стана.



Р и с. 7. Калибровка валков:

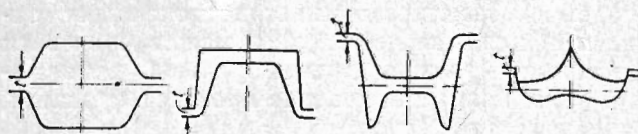
а — сортового стана (рельсовые калибры); б — полосовых (листовых) станов

Под *выпуклостью* бочки листового валка понимают превышение диаметра бочки посередине ее над диаметром по краям бочки. При *вогнутости* бочки разность ее диаметров в середине и по-краям будет иметь отрицательное значение.

Валки сортового и полосовых (листовых) станов показаны на рис. 7.

#### 4. Элементы калибра

*Зазор между валками.* Калибр состоит из двух ручьев и зазора между валками (рис. 8). Зазор определяют измерением просвета между буртами валков. Чертеж калибра должен отображать его форму и размеры во время прохождения металла через валки. Поэтому на чертеже



Р и с. 8. Калибры различной формы, образованные верхним и нижним ручьями и зазорами  $t$

зазор  $t$  между буртами валков должен, по меньшей мере, равняться сумме упругих деформаций станин  $t_c$ , нажимных винтов  $t_{н.в.}$ , предохранительных стаканов  $t_{ст.}$ , валков  $t_v$ , подушек с подшипниками  $t_{п.}$ , а также величины допустимого износа валков  $t_{и.в.}$ :

$$t \geq t_c + t_{н.в.} + t_{ст.} + t_v + t_{п.} + t_{и.в.}$$

В чистовых и предчистовых калибрах для лучшего контроля размеров профиля желательно иметь наименьший зазор. В остальных калибрах зазор можно увеличивать. Благодаря этому уменьшается глубина вреза ручьев в валки, что повышает их прочность и число переточек. Величины зазоров могут быть ориентировочно рекомендованы в пределах, приведенных в табл. 1. В настоящее время зазор у чистовых и пред-

чистовых валков представляется возможным уменьшать, так как прокатные станы оборудуют жесткими чистовыми клетями, валки которых смонтированы на подшипниках качения и жидкостного трения.

**Выпуск калибра.** Под выпуском калибра понимают уклон его боковых стенок. Выпуск необходим для того, чтобы облегчить вход и выход металла из калибра, избежать защемления раската и окова валков, а также для восстановления первоначальных размеров калибра по ширине при переточках. Изменение уклона боковых стенок позволяет регулировать степень заполнения калибра. Этим широко пользуются при калибровке обжимных и заготовочных станков и черновых клетей сортовых станков. Если обозначить максимальную ширину калибра  $B$ , минимальную ширину его  $b$  и угол наклона боковых стенок ящичного калибра  $\psi$  (рис. 9), то выпуск определится равенством

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{B - b}{2h_p},$$

где  $h_p$  — глубина ручья.

Таблица 1

Зазоры между валками для различных станков и калибров

Станы	Калибры	Зазоры, необходимые при подшипниках, мм			
		текстолитовых	качения и жидкостного трения	текстолитовых	качения и жидкостного трения
		в значениях от диаметра $D$ бочки валка		в абсолютных величинах	
Проволочные и мелко-сортовые	Обжимные или вытяжные	$(0,01 \div 0,013) D$	$(0,006 \div 0,008) D$	3,0—5	2,0—3,5
	Черновые или подготовительные	$(0,005 \div 0,008) D$	$(0,003 \div 0,005) D$	1,5—2,5	1,0—1,5
	Чистовые и предчистовые	$(0,005 \div 0,008) D$	$(0,002 \div 0,003) D$	1,0—1,5	0,5—0,75
Средне-сортовые	Обжимные или вытяжные	$(0,01 \div 0,018) D$	$(0,008 \div 0,016) D$	6,0—10,0	4—8,0
	Черновые или подготовительные	$(0,01 \div 0,015) D$	$(0,008 \div 0,012) D$	4—6	3—5
	Чистовые и предчистовые	$(0,006 \div 0,008) D$	$(0,005 \div 0,007) D$	2—3,0	1,5—2,0
Крупно-сортовые	Обжимные или вытяжные	$(0,025 \div 0,03) D$	$(0,015 \div 0,025) D$	15—20	10—15
	Черновые или подготовительные	$(0,015 \div 0,02) D$	$(0,01 \div 0,014) D$	7—10	5—7
	Чистовые и предчистовые	$(0,008 \div 0,01) D$	$(0,006 \div 0,007) D$	4—5	3—3,5
Непрерывные заготовочные	Черновые	$(0,015 \div 0,02) D$	$(0,015 \div 0,02) D$	10—20	10—15
	Предчистовые и чистовые	$(0,01 \div 0,015) D$	$(0,008 \div 0,012) D$	5—8	4—6
Блуждающие	Все калибры при сведенных валках	$(0,013 \div 0,018) D$	Не применяют	15—20	Не применяют

Уменьшение диаметра бочки валка при переточке, представляющее собой разность  $\Delta D = D - D_n$  (рис. 10), в зависимости от выработки боковых стенок калибра определяется из равенства

$$\Delta h_c = \frac{\Delta D}{2} \sin \psi,$$

где  $\Delta h_c$  — выработка стенки калибра.

Отсюда 
$$\Delta D = D - D_n = \frac{2\Delta h_c}{\sin \psi}.$$

Здесь  $D$  и  $D_n$  — диаметры бочки валка до и после переточки. Таким образом, с увеличением выпуска требуемая величина съема металла при обточке валков уменьшается, что имеет большое значение для увели-

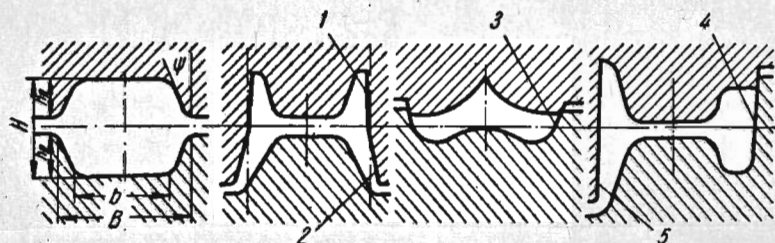


Рис. 9. Выпуски различных калибров:

1 — закрытого фланца; 2 — открытого фланца; 3 — полки; 4 — головки; 5 — подошвы

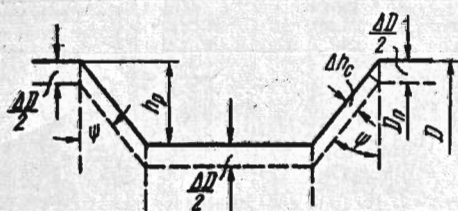


Рис. 10. Уменьшение диаметра валка при его переточке (ящичный калибр)

чения срока их службы. Выпуск принимают различным в зависимости от формы и назначения калибра. Рекомендуемые величины выпусков приведены ниже:

Калибры	Выпуск, %	Калибры	Выпуск, %
Прямоугольные и ящичные квадраты:		Швеллерные:	
вытяжные на заготовочных и сортовых станах . . . . .	10—20	черновые . . . . .	10—12
вытяжные на мелко-сортовых и проволочных станах . . . . .	25—45	чистовые . . . . .	0,5—1,0
на валках блюминга . . . . .	20—25	Балочные и рельсовые:	
		черновые (по открытому фланцу) . . . . .	5—10
		чистовые . . . . .	0,5—1,0
		Для угловой и зетовой стали:	
		черновые . . . . .	5—10
		предчистовые . . . . .	5

### Нейтральная линия калибра

Нейтральной линией калибра можно назвать такую линию, относительно которой валки оказывают равнозначное силовое воздействие на

верхнюю и нижнюю части прокатываемого металла. Для определения положения нейтральной линии в калибре рекомендуется использовать аналитический метод, основанный на составлении уравнений равновесия статических моментов.

В связи с этим может быть принято и другое определение: «Нейтральной линией калибра называется такая его горизонтальная линия, относительно которой величины моментов сил, приложенных к прокатываемому металлу от верхнего и нижнего валков, одинаковы (при совмещении нейтральной линии калибра со средней линией валков)». Эта линия в большинстве случаев проходит через центр тяжести сечения. Для симметричных калибров она совпадает с их горизонтальной осью симметрии. При отсутствии горизонтальной оси симметрии в калибре положение нейтральной линии необходимо определять аналитически.

**Раздел калибра.** Поскольку калибр составлен двумя валками, то он имеет раздел. Раздел калибра — это место, где линия очертания профиля переходит с одного валка на другой. В закрытых калибрах, на-

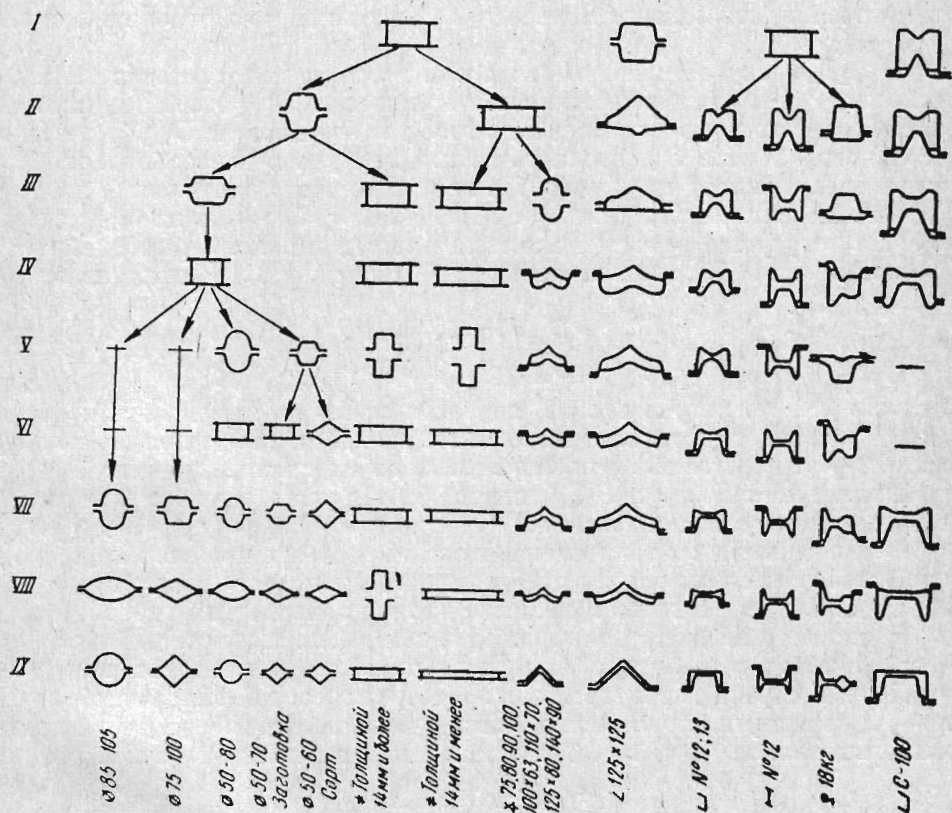


Рис. 11. Принципиальная схема калибровки профилей стана 500:  
I—IX — номера калибров

пример балочных, в целях выравнивания условий деформации фланцев профиля разделы чередуются по верхним и нижним фланцам (рис. 11). При прокатке других фасонных профилей чередование положения разделов может иметь и другие цели. Так, для угловой стали чередование положения разделов связано с необходимостью получения требуемого закругления на внутренней стороне полок.

*Радиусы закругления отдельных элементов калибра.* Если бы линии очертания калибров образовали между собой углы без закруглений, то это неизбежно вызывало бы разное остывание металла в углах его сечения. Вершины незакругленных углов в калибрах являлись бы, кроме того, местами концентрации напряжений в валках. Поэтому в каждом калибре закругление углов выполняют определенными радиусами, если эти углы не относятся к форме будущего профиля. Радиусы закругления принимают в зависимости от размеров и формы калибра.

## 5. Диаметры отдельных элементов бочки валков

Валки (рис. 12) 1 рабочей клетки чаще всего имеют привод через шестеренную клетку, в которой шестерни 2 находятся в постоянном зацеплении по начальной окружности. Расстояние  $D_c$  между осями шестерен всегда постоянно. По величине  $D_c$  на чистовой клетке часто характеризуют прокатный стан. На наших металлургических заводах и в некоторых других странах при определении параметра стана исходят из расстояния  $D_0$  между осями новых рабочих валков чистовой клетки с учетом нормального зазора. Величину  $D_0$  называют номинальным диаметром валков.

В общем случае при проектировании прокатных станов в качестве исходного размера для всех клеток принимают  $D_c = \text{const}$ . На отечественных станах номинальный диаметр  $D_0$  принимают на 5% больше постоянного размера  $D_c$ , что необходимо для учета износа валков. Минимальный диаметр валков (после всех переточек) допускается на 10% меньше максимального (до переточки) диаметра  $D_0$  или на 5% меньше  $D_c$ . Но полусумма значений максимального и минимального диаметров валков должна быть равна постоянной величине  $D_c$ . Исходя из этого, имеем:

$$D_{0\text{макс}} = 1,05D_c; \quad (1)$$

$$D_{0\text{мин}} = 0,95D_c. \quad (2)$$

Значениями диаметров валков, определяемыми по зависимостям (1) и (2), и руководствуются при калибровке валков, а также при их эксплуатации — от изготовления новых валков до их полного износа.

Диаметрами  $D_{0\text{макс}}$  и  $D_{0\text{мин}}$  определяются углы перекося шпинделей в пределах допустимых величин.

В зависимости от типа стана и сортамента прокатываемых на нем профилей возможны следующие сочетания диаметров валков:

- а) диаметры верхнего и нижнего валков равны между собой;
- б) диаметр верхнего валка больше, чем диаметр нижнего валка;
- в) диаметр верхнего валка меньше диаметра нижнего валка.

Первый случай характерен при прокатке полосовой, квадратной, круглой стали и других профилей, а также при калибровке черновых и предчистовых валков (рис. 13). Тогда для валков с гладкой бочкой

$$D_0 = \frac{D_v + D_n}{2} + h,$$

где  $D_v$  — диаметр верхнего валка;

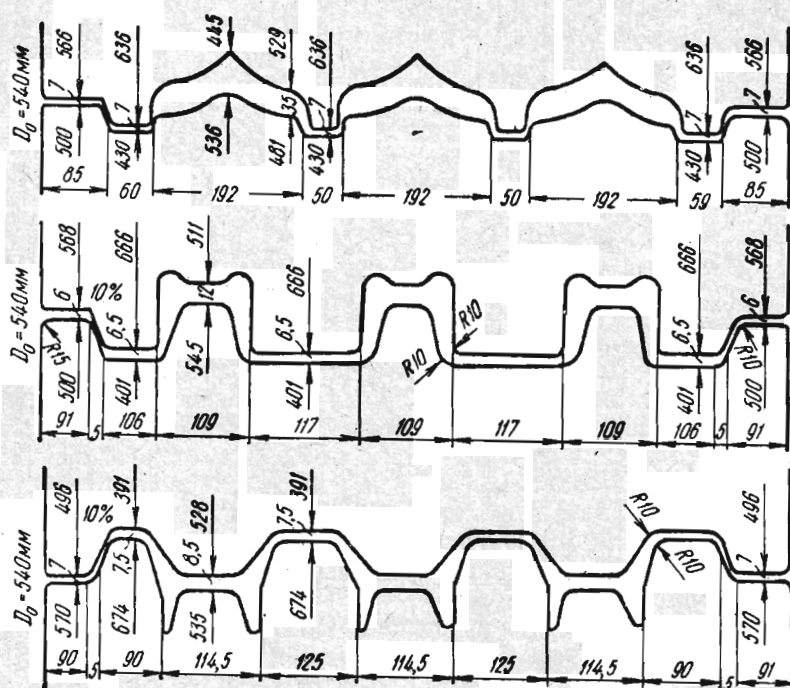
$D_n$  — диаметр нижнего валка;

$h$  — толщина полосы.

В случае квадратных и круглых калибров диаметр по их вертикальным осям симметрии

$$D_0 = \frac{D_v + D_n}{2} + 1,41a = \frac{D_v + D_n}{2} + d,$$

где  $a$  и  $d$  — соответственно сторона квадрата и диаметр круга.



В большом числе случаев имеется неравенство диаметров верхнего и нижнего валков. Объясняется это особенностями прокатки того или иного профиля. Но в любом случае, какое бы ни было текущее значение диаметров бочки верхнего и нижнего валков, величина  $D_0$  определяется как полусумма диаметров плюс расстояние между валками  $h(t)$ , которое равно высоте калибра или зазору между валками по буртам, т. е.

$$D_0 = \frac{D_B + D_H}{2} + h(t). \quad (3)$$

Общая зависимость (3) должна быть соблюдена в любом месте по длине бочки прокатных валков (рис. 14). При прокатке простых профилей с точки зрения условий деформации металла, нагрузок на линии пе-

редач крутящих моментов, качества поверхности проката и износа рабочих валков целесообразно иметь валки с одинаковыми диаметрами. Однако на практике очень часто приходится применять прокатку в валках разного диаметра. Превышение диаметра одного валка в клети над другим принято называть *давлением*. Если диаметр верхнего валка больше, чем нижнего, то в этом случае имеем *верхнее давление*. Если же диаметр нижнего валка больше диаметра верхнего, то будет *нижнее давление*.

На среднесортных и крупносортных станах диаметр верхнего валка принимают больше нижнего. Это необходимо для того, чтобы сообщить переднему концу раската при выходе из валков (калибра) направление к низу.

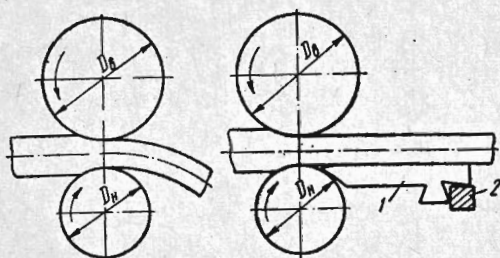


Рис. 15. Схема изгиба раската при неравенстве диаметров валков ( $D_v > D_n$ ):

1 — проводка; 2 — брус

Если  $D_v > D_n$ , то соответственно и окружные скорости  $v$  валков будут разные, а именно  $v_v > v_n$ . Превышение окружной скорости верхнего валка над нижней и обеспечивает изгиб переднего конца раската к низу при выходе его из валков (рис. 15). При этом сам раскат постоянно прижимается к нижней проводке, чем обеспечивается его фактический прямолинейный выход. Надобность в установке верхней подвесной проводки в этих случаях отпадает. Обычно на черновых клетях верхнее давление принимают больше, чем на промежуточных и чистовых клетях. Практика отечественного прокатного производства за последние годы показала, что верхнее (и нижнее) давление возможно и следует уменьшать до минимума.

Можно рекомендовать следующие величины верхнего давления, мм:

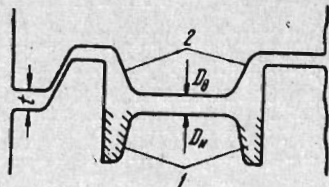
Станы	Черновые клетки	Промежу- точные клетки	Чистовые клетки
Крупносортные . . . . .	4—3	3—2	1
Среднесортные . . . . .	3—2	2—1	1—0,5

Опыт показывает, что на непрерывных мелкосортных и проволочных станах при хорошем прогреве заготовки можно с успехом прокатывать металл в валках с одинаковыми диаметрами. Если же желательно применение верхнего давления, то его величину в черновых и промежуточных клетях рекомендуется принимать в пределах 1—1,5 мм. Существенное значение величина давления имеет при прокатке двутавровых балок. В этом случае необходимо учитывать, что раскат в закрытых фланцах 1 балочного калибра защемляется (рис. 16). Если дополнительно к этому еще будет давление со стороны валка с открытыми фланцами 2, (на рис. 16 со стороны верхнего валка), то могут выйти из строя выводные проводки у закрытых фланцев и может произойти оков валка. Поэтому рекомендуется либо принимать равные значения диаметров валков по стенке калибра ( $D_v = D_n$ ), либо предусмотреть давление со стороны закрытых фланцев по отношению к открытым (на рис. 16 должно

быть  $D_n > D_v$ ). Это нужно еще и потому, что по мере износа балочного калибра металл в закрытых фланцах дополнительно защемляется и выход его оттуда становится все более затруднительным. Следовательно, в этом случае целесообразно при изготовлении валков задаваться условием  $D_{\text{закр}} > D_{\text{откр}}$ . То же относится и к контрольным швеллерным калибрам закрытого типа.

Дополнительно к сказанному при выборе величины давления валков необходимо учитывать и свойства прокатываемой стали. Нижнее давление предусматривают у блюмингов и слябингов. Объясняется это тем, что в этих случаях раскаты имеют большое сечение и, если бы не было нижнего давления, то они бы часто ломали станинные ролики и

Рис. 16. Калибр двутавровой балки. Заштрихованы места защемления раската закрытым фланцем ( $D_n > D_v$ )



ролики рабочего рольганга, ударяя по ним своими выходящими концами. Во избежание этого на практике применяют нижнее давление, равное примерно 10 мм. Передний конец раската, отгибаясь при этом кверху, не упирается в ролики. Однако за последнее время на некоторых наших заводах нижнее давление на блюмингах и слябингах перестали применять. Практикой нескольких лет показано, что можно и не предусматривать разности диаметров валков на блюмингах и слябингах и не иметь при этом изгибов раската на выходе и ударов их о ролики. Исследование работы блюминга, у которого валки были одинаковыми по диаметру, показало, что нагрузка на шпиндели при этом распределяется равномерно, а качество поверхности раскатов значительно улучшается. Но такие результаты могут быть получены только при равномерном нагреве слитков перед прокаткой.

В универсальных клетях (слябинг, клетки листовых станов) разница в диаметрах вертикальных валков недопустима. В противном случае изгиб раската в горизонтальной плоскости неизбежно приведет к авариям и браку.

В заключение отметим, что под разностью диаметров валков при создании верхнего или нижнего давления следует понимать разность так называемых катающих диаметров (см. ниже)

#### 6. Дополнительные факторы, которые необходимо учитывать при калибровке

В настоящее время при расчете калибровки профиля обычно принимают принцип предельных условий захвата или условий, близких к предельным. В своей основе этот принцип верен. Однако необходимо иметь в виду ряд особенностей процесса прокатки, которые определяются скоростным режимом работы, а также максимальной механизацией и автоматизацией современных высокоскоростных станов.

Калибровка должна соответствовать захватывающей способности валков при данных скоростных условиях прокатки, а также допускать возможность автоматизации процесса. При определении условий захва-

та металла валками и расчете калибровки необходимо исходить из полного уменьшения диаметра валков при переточках. При этом необходимо также учитывать прочность валков в последней стадии их эксплуатации.

Если назвать *коэффициентом переточки валков*  $k$  относительное уменьшение диаметра бочки валков за полное число переточек, то

$$k = \frac{D_{\text{макс}} - D_{\text{мин}}}{D_0},$$

где  $D_{\text{макс}}$  и  $D_{\text{мин}}$  — соответственно диаметры валков до первой переточки и после всех переточек.

Коэффициент переточки должен определять допустимое уменьшение диаметра, исходя из условий захвата металла, прочности валков, допустимого перекаса шпинделей, работы муфт. Если применяют чугунные валки, то коэффициент переточки следует принимать с учетом глубины отбеленного слоя, если стальные, — то с учетом глубины закаленного слоя.

Примерные величины коэффициента  $k$  приведены ниже

Станы	$k$
Обжимные и сортовые . . . . .	0,08—0,15
Проволочные . . . . .	0,07—0,1
Листовые и полосовые горячей про- катки . . . . .	0,04—0,07

Диаметр валков стана для прокатки заданного профиля принимают с таким расчетом, чтобы максимальное уменьшение диаметра валка при врезе калибров не превышало величин от  $(1/4 \div 1/6) D_0$  для чистовых калибров при прокатке простых и фасонных профилей и до  $(1/3 \div 1/6) D_0$  для черновых калибров при прокатке фасонных профилей. Следуют отметить, что допустимое уменьшение диаметра валков по условиям их прочности зависит от отношения диаметра к длине бочки и материала валков.

На бочке валков должно быть врезано максимальное число калибров. При этом следует обращать внимание на размеры буртов по толщине, так как это определяет их прочность. Толщина буртов между смежными ручьями (калибрами) зависит от формы ручья (калибра), а также от типа стана и числа одновременно прокатываемых раскатов (ниток). Если ручьи на бочке валка прямоугольного типа, рельсовые или балочные, то толщина буртов при взрезе таких ручьев должна быть не меньше их высоты, т. е. не меньше глубины вреза ручьев. Если врезают ручьи круглых, овальных, ромбических, квадратных калибров или подобных им, то толщину буртов между ручьями принимают с учетом возможности монтажа вводной и выводной валковой арматуры. Практически толщину буртов между ручьями указанных типов принимают в пределах 3—10 мм. Чем больше размер прокатываемого профиля или чем, следовательно, глубже врез ручья, тем больше должна быть толщина бурта между смежными ручьями.

На станах многониточной прокатки (мелкосортные и проволочные) число размещаемых калибров на бочке валка и толщина буртов между ними определяются возможностью установки валковой арматуры — вводных и выводных коробок, кантующих валков или роликов. Вводные и выводные коробки обычно имеют большую ширину. И если на стане

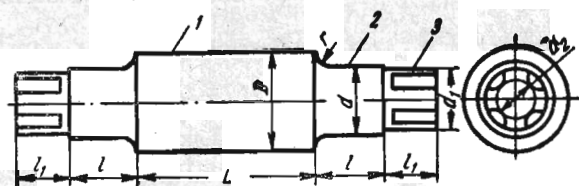
прокатывают одновременно четыре раската, то установка четырех вводных или выводных коробок, а также кантующей арматуры качения требует тщательного конструктивного решения. Толщина крайних буртов на бочке вала определяется главным образом габаритами валковой арматуры. Необходимо, чтобы при установке вводной и выводной арматуры на крайние калибры обеспечивалась возможность регулировки ее положения и облегчалось ее обслуживание.

## 7. Прокатные валки

Прокатные валки являются основным рабочим инструментом при прокатке. Поэтому определению их размеров, а также их качеству следует уделять большое внимание.

В настоящее время в связи с большим многообразием технологических процессов производства профилей из черных металлов прокатные валки распределены по группам или категориям. На каждую катего-

Рис. 17. Основные элементы прокатного вала



рию валков имеются общесоюзные стандарты — ГОСТы. Поэтому при проектировании новых прокатных станов или рассмотрении вопросов реконструкции существующих с изменением размеров прокатных валков необходимо руководствоваться соответствующими стандартами на валки.

Основными элементами валков (рис. 17) являются бочка 1, шейки 2, трефы 3. Каждый из этих элементов определяется двумя размерами: диаметром и длиной.

Одной из основных характеристик прокатных валков является отношение длины бочки к ее диаметру  $\left(\frac{L}{D}\right)$ .

С точки зрения прочности валков, размещения калибров и ширины прокатываемого раската применяют следующие соотношения  $L/D$  валков:

Станы (клетки)	
Блюминги и слэбинги . . . . .	2,2—2,7
Толстолистовые одноклетевые . . . . .	3,0—3,5
Заготовочные и сортовые, черновые клетки . . . . .	2,2—3,0
Сортовые, чистовые клетки . . . . .	1,5—2,5
Толстолистовые двух- и трехклетевые . . . . .	2,2—2,8

Применительно к конкретному типу стана отношения  $L/D$  могут быть уточнены и изменены, однако лишь в пределах ГОСТа на соответствующие прокатные валки.

Диаметр бочки валков определяют исходя из условий захвата металла, прочности валков и их жесткости с тем, чтобы обеспечивались устойчивая работа прокатной клетки и высокая точность размеров профиля.

Максимальные и рекомендуемые углы захвата для различных видов производства проката приведены ниже.

Прокатка	Угол захвата $\alpha$ , град
Горячая на блюмингах и заготовочных станах с использованием стальных валков с насечкой или рифленной поверхностью . . . . .	26—34
На черновых клетях сортовых станов с использованием стальных валков . . . . .	22—24
На сортовых станах с использованием чугуновых валков, в том числе в чистовых клетях . . . . .	16—18
Горячая толстолистовой стали . . . . .	15—22

Важной характеристикой валков является отношение диаметра шейки к диаметру бочки  $\left(\frac{d}{D}\right)$ .

Применяемые отношения  $\frac{d}{D}$ , основанные на условии равнопрочности шейки и бочки, приведены ниже

Станы	$\frac{d}{D}$
Блюминги и слябинги . . . . .	0,55—0,6
Толстолистовые станы . . . . .	0,67—0,75
Заготовочные и сортовые станы . . . . .	0,6—0,7

Отношение длины и диаметра шейки при подшипниках скольжения для различных станов находится в пределах

$$\frac{l}{d} = 0,8 \div 1,2.$$

Размеры шеек валков при использовании подшипников качения должны соответствовать габаритам подшипников — диаметру внутренней обоймы и ее длине. Кроме того, они должны соответствовать ГОСТу на подшипники.

*Материал валков.* Прокатные валки изготавливают стальными и чугуновыми. Стальные валки, особенно кованные, обладают высокой прочностью. Поэтому они находят широкое применение прежде всего на блюмингах, слябингах, клетях заготовочных станов, черновых, клетях сортовых и толстолистовых станов. Стальные валки имеют повышенный коэффициент трения. Это также положительно сказывается при их применении на клетях, где осуществляются высокие обжатия.

Чугунные валки характеризуются пониженной прочностью, но обладают высокой износостойкостью. Поэтому их применяют главным образом на предчистовых и чистовых клетях, а иногда и в промежуточных группах клетей. За последнее время на мелкосортных и проволочных станах валки черновых клетей изготавливают также из чугуна. Однако при этом должны обеспечиваться необходимые условия захвата, требуемые обжатия, а также достаточная прочность валков.

Одним из показателей качества вала является твердость его рабочей поверхности — бочки. По этому признаку прокатные валки делятся на мягкие с твердостью 150—250 HB (25—35 ед. по Шору), полутвердые с твердостью 250—400 HB (35—60 ед. по Шору), твердые 400—600 HB (60—80 ед. по Шору), особо твердые 600—800 HB (85—100 ед. по Шору) и сверхтвердые (более 100 ед. по Шору). Валки по каждой катего-

рии твердости применяют в зависимости от назначения, типа стана и его сортамента.

В настоящее время повсеместно начали отливать валки с черновыми калибрами. Для этих целей изготавливают специальные кокили с бандажными кольцами, приближающимися по форме к конфигурации ручьев будущих калибров. Такие валки особенно целесообразно отливать из чугуна, так как тогда по всему ручью будет определенная толщина отбеленного слоя. Врез ручья в непрофилированную бочку валка по существу приводит к снятию наиболее износостойкого слоя материала валка высокой твердости, что особенно сказывается при врезе фасонных ручьев. Повышения прочности и твердости бочки валков достигают их термической обработкой и, в частности, поверхностной закалкой. На блюмингах, заготовочных станах и слябингах применяют поверхностную накатку валков гладкими или насеченными роликами. Накатка рабочих поверхностей валков имеет целью поверхностное упрочнение, а также улучшение условий захвата металла валками. Практика показывает, что применение накатки валков позволяет в ряде случаев увеличить срок их службы более, чем на 50%, и значительно увеличить угол захвата.

Весьма прогрессивное значение имеет применяемая в настоящее время повсеместно наплавка поверхности валков порошковой проволокой из высоколегированного сплава специального состава с содержанием  $\text{Cr}$ ,  $\text{Ni}$ ,  $\text{W}$ ,  $\text{V}$ . Химический состав порошка и назначение проволоки определены соответствующими ГОСТами. Валки наплавляют на специальных автоматах, где положение валка может быть любым, удобным для нанесения наплавляемого слоя и подачи флюса.

Особенностью и преимуществом процесса наплавки является возможность восстановления первоначальных размеров валков, что очень важно, так как при этом сокращается парк валков, а непосредственно на стане значительно сокращаются потери времени на перевалки и настройки клетей. Прочный и износостойкий наплавленный поверхностный слой на валках исключает частую смену и постоянную настройку валковой арматуры и другого оборудования прокатных клетей.

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ КАЛИБРОВКИ

## 1. Равномерная и неравномерная деформация металла по ширине

Процесс прокатки может происходить в условиях равномерной или неравномерной деформации металла по ширине.

*Равномерной деформацией* металла по ширине называют такую деформацию, при которой отношения  $\frac{\Delta h}{H}$  или  $\frac{H}{h}$  по всему сечению раската остаются постоянными (рис. 18). Если же эти отношения не являются постоянными по сечению, то такая деформация будет *неравномерной по ширине*.

Одной из задач калибровки является создание условий равномерной деформации металла. Обжатия по отдельным элементам профиля должны быть такими, чтобы эти условия по возможности выдерживались в каждом проходе. Практически при прокатке любого фасонного профиля почти всегда характерна неравномерная деформация.

Прокатка полос и листовой стали также сопровождается неравномерной деформацией по ширине и разнице по сравнению с прокаткой фасонных профилей в этом случае сводится только к количественной стороне. В самом деле, при горячей или холодной прокатке листовой стали или полосы возникают упругие деформации станин, валков и других деталей клетки. Даже если исходная заготовка имеет строго прямоугольное сечение, вследствие проявления этих упругих деформаций процесс прокатки полосы или листа будет сопровождаться неравномерной деформацией их по ширине.

При калибровке необходимо руководствоваться следующими правилами. Чем сложнее профиль по сечению, тем в большей мере при расчетах режимов обжатий необходимо создавать неравномерность деформации металла по ширине в первых по ходу прокатки проходах. В последующих проходах — в направлении к чистовым — наоборот, необходимо приближаться, насколько это возможно, к условиям равномерной деформации. Такой режим обжатий позволяет использовать максимальную пластичность металла в первых проходах, когда он имеет высокую температуру. При высокой температуре прокатываемого металла имеется возможность путем неравномерной деформации получить любой элемент сечения будущего профиля без опасения, что в нем возникнут высокие дополнительные напряжения.

На рис. 19 показан профиль бортового кольца для автомашин, не имеющий никаких осей симметрии. Прокатка его чрезвычайно сложна и связана с резкой неравномерностью деформации в первых проходах, постепенно уменьшающейся к концу прокатки. Опыт показывает, что при достаточно высокой температуре прокатки дополнительные напряжения, как следствие неравномерной деформации, снимаются и раскат выходит из валков без скручивания относительно продольной оси. Но с понижением температуры конца прокатки до 700—750°С дополнительные напряжения не успевают сниматься и раскат может выходить из валков скрученным.

Рис. 18. Схема равномерной (а) и неравномерной (б) деформации металла по ширине

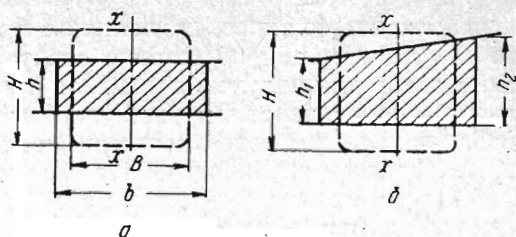


Рис. 19. Профиль бортового кольца автобоба. Оси симметрии отсутствуют. Деформация металла по ширине неравномерная

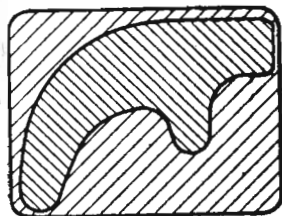


Рис. 20. Схема плющения проволоки при неравномерной деформации по ширине; на готовой полосе показаны возникшие из-за этого мелкие трещины ( $\mu$  и  $\mu_{ср}$  — фактический и средний коэффициенты вытяжки по сечению)

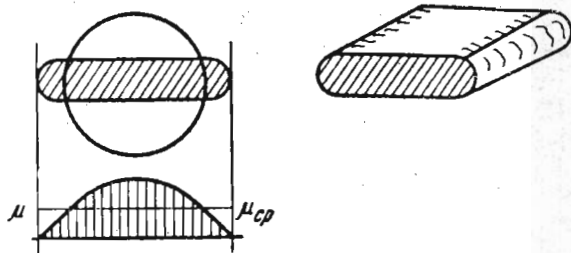
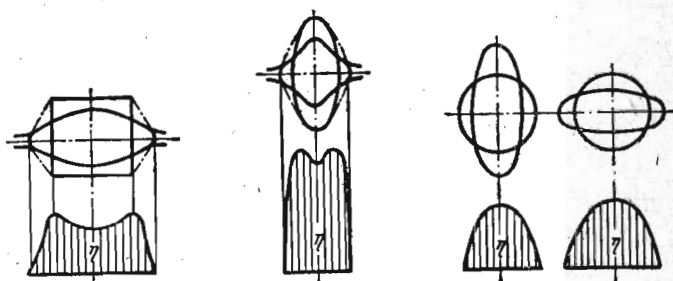


Рис. 21. Распределение коэффициентов высотной деформации (или вытяжек) по ширине раската для разных случаев прокатки



При калибровке требуется распределять величины относительных и абсолютных обжатий по ширине раската так, чтобы обеспечивалось этим такое течение металла по его сечению, которое необходимо для получения элементов профиля. Известно, например, что при прокатке фланцевых профилей из-за неправильного распределения коэффициентов деформации по элементам сечения получают утяжка или, наоборот,

рот, переполнение фланцев, приводящие к искажению профиля. Неравномерность деформации по ширине следует использовать как положительный фактор для получения профиля и, наоборот, ограничивать отрицательное влияние неравномерной деформации, когда она, к примеру, вызывает появление поверхностных дефектов на готовом профиле (рис. 20). Характер неравномерной деформации по ширине раската для разных случаев прокатки показан также распределением коэффициентов высотной деформации на рис. 21.

## 2. Распределение частных вытяжек по проходам

Процесс прокатки сопровождается изменением геометрической формы прокатываемого металла и его размеров. Если в качестве исходной заготовки, промежуточных раскатов и конечного профиля принять поло-

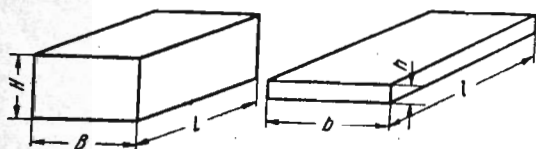


Рис. 22. Схема для определения коэффициентов деформации по условию постоянства объема

сы прямоугольного сечения с соответствующими размерами (рис. 22), то на основании условия постоянства объема можно записать:

$$HBL = h_1b_1l_1 = h_2b_2l_2 = \dots = h_nb_nl_n = \text{const}$$

или в общем виде

$$HBL = hbl = \text{const.} \quad (4)$$

Сделаем преобразование, записав равенство (4) в виде

$$\frac{H}{h} = \frac{l}{L} \cdot \frac{b}{B}.$$

Получившиеся относительные величины называют:

$\frac{H}{h} = \eta$  — коэффициентом высотной деформации\*;

$\frac{l}{L} = \mu$  — коэффициентом продольной деформации или коэффициентом вытяжки (вытяжкой);

$\frac{b}{B} = \beta$  — коэффициентом поперечной деформации.

Следовательно, можно записать:

$$\eta = \mu\beta$$

или

$$\mu = \eta \frac{1}{\beta}.$$

Переходя к площадям поперечного сечения, имеем

$$\mu = \frac{H}{h} \cdot \frac{B}{b} = \frac{F_0}{F}, \quad (5)$$

\* В теории обработки металлов давлением коэффициенты деформации обычно принимают как отношения конечных размеров к исходным; здесь значение коэффициента высотной деформации принято условно.

где  $H, B, L, F_0$  — толщина, ширина, длина и площадь поперечного сечения исходной заготовки;

$h, b, l, F$  — то же, соответственно для профиля после прокатки.

Таким образом, *вытяжкой* называют отношение площади поперечного сечения исходной (задаваемой) заготовки к площади поперечного сечения выходящего из валков раската или конечного профиля. Вытяжка характеризует степень уменьшения площади поперечного сечения раската. Если это уменьшение рассматривается за один проход, то вытяжка называется *частной* или *единичной*. Если же рассматривается общее уменьшение площади поперечного сечения за полное число проходов от исходной заготовки до конечного профиля, такая вытяжка называется *общей* или *суммарной*.

По величине частных вытяжек можно судить о степени загруженности каждой клетки, использовании мощности электродвигателя, а также о нагрузке на все детали главной линии. Частные вытяжки на практике принимают различными в зависимости от прокатываемого профиля и типа стана, формы и местоположения калибра.

Примерные средние величины частных вытяжек для различных случаев прокатки приведены ниже.

Станы, клетки и калибры	Частные вытяжки
Обжимные станы, черновые (ящичные) калибры . . . . .	1,35—1,45
Обжимные станы, предчистовые и чистовые, ромбические и квадратные калибры . . . . .	1,25—1,3
Черновые клетки крупносортовых станов, ящичные калибры	1,35—1,45
Промежуточные клетки крупносортовых станов, подготовительные калибры:	
ромбические и овальные . . . . .	1,4—1,5
квадратные и круглые . . . . .	1,25—1,3
Чистовые клетки крупносортовых станов:	
предчистовые ромбические и овальные калибры . . . . .	1,3—1,35
чистовые круглые и квадратные калибры . . . . .	1,15—1,2
Среднесортные станы:	
ящичные калибры черновых клеток . . . . .	1,35—1,45
ящичные, ромбические калибры промежуточных клеток	1,3—1,35
предчистовые овальные и ромбические калибры . . . . .	1,25—1,35
чистовые калибры . . . . .	1,15—1,2
Мелкосортные и проволочные станы:	
черновые ящичные калибры . . . . .	1,35—1,5
овальные калибры промежуточных клеток . . . . .	1,35—1,4
овальные предчистовые калибры . . . . .	1,25—1,3
чистовые калибры . . . . .	1,15—1,2

При прокатке фасонных профилей частные вытяжки по проходам распределяют с учетом коэффициентов деформации отдельных элементов профиля (см. соответствующие главы книги).

Уравнение (5) позволяет сделать ряд выводов, имеющих практическое значение. Если известны площадь поперечного сечения исходной заготовки  $F_0$  и вытяжка в данном проходе, то площадь  $F$  поперечного сечения выходящего раската

$$F = \frac{F_0}{\mu}.$$

Длина раската после прохода

$$l = \mu L = L \frac{F_0}{F}.$$

По известным вытяжке и конечной площади поперечного сечения раската или его длине определяют площадь поперечного сечения или длину исходной заготовки:

$$F_0 = \mu F; \quad L = \frac{l}{\mu}.$$

*Связь между частными, средней и общей вытяжками при прокатке.*

При нескольких проходах частные вытяжки определяют по формулам: вытяжка в первом проходе

$$\mu_1 = \frac{F_0}{F_1};$$

вытяжка во втором проходе

$$\mu_2 = \frac{F_1}{F_2}.$$

После преобразований зависимость между площадью поперечного сечения исходной заготовки, площадью поперечного сечения раската после второго прохода и вытяжками в этих проходах получает вид

$$F_0 = \mu_1 \mu_2 F_2.$$

Вытяжка в третьем проходе

$$\mu_3 = \frac{F_2}{F_3}.$$

После дополнительного преобразования получится значение суммарой вытяжки за три прохода:

$$\mu_{1-3} = \frac{F_0}{F_3} = \mu_1 \mu_2 \mu_3.$$

Аналогично для  $n$  проходов

$$\mu_{\text{общ}} = \mu_{1-n} = \mu_1 \mu_2 \mu_3 \dots \mu_n; \quad \mu_{\text{общ}} = \frac{F_0}{F_n}. \quad (6)$$

Таким образом, общая вытяжка при прокатке профиля за  $n$  проходов определяется как произведение частных вытяжек. Согласно формуле (6) имеем:

$$F_n = \frac{F_0}{\mu_{\text{общ}}}; \quad F_0 = \mu_{\text{общ}} F_n.$$

Если частные вытяжки считать равными между собой, то, приравняв их значение средней вытяжке, получаем

$$\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = \dots = \mu_n = \mu_{\text{ср}}.$$

Тогда

$$\mu_{\text{общ}} = \mu_1 \mu_2 \dots \mu_n = \mu_{\text{ср}}^n,$$

или

$$\frac{F_0}{F_n} = \mu_{\text{ср}}^n. \quad (7)$$

Средняя вытяжка характеризует степень загруженности основного оборудования прокатного стана. По средней вытяжке судят, насколько интенсивно ведется технологический процесс прокатки, правильно ли определен режим обжатий и имеются ли резервы на прокатном стане. Средние вытяжки для каждого стана определяют исходя из условий деформаций металла по проходам. Так, для современных непрерывных проволочных станов с частными вытяжками в черновых проходах  $\mu = 1,4 \div 1,45$ , в промежуточных  $\mu = 1,35 \div 1,4$ , в предчистовых и чистовых  $\mu = 1,2 \div 1,3$  определена предельная средняя вытяжка  $\mu_{\text{ср}} = 1,385$ .

Практикой доказано, что превышение этой средней вытяжки при применении систем вытяжных калибров прямоугольник — квадрат, овал — квадрат, шестиугольник — квадрат на современных проволочных станах почти невозможно. Средние вытяжки для различных сортовых станов приведены ниже:

Станы	Средние вытяжки
Непрерывные проволочные . . . . .	1,38—1,385
Непрерывные мелкосортные . . . . .	1,32—1,35
Среднесортные . . . . .	1,3—1,35
Крупносортные . . . . .	1,28—1,32

При проектировании новых прокатных станов требуется определить количество рабочих клеток. Обычно в этом случае задаются исходными величинами: размерами заготовки и сортаментом готовой продукции. Тогда число клеток или число проходов определится по равенству, полученному после преобразования уравнения (7):

$$\lg \frac{F_0}{F_n} = n \lg \mu_{\text{ср}};$$

$$n = \frac{\lg F_0 - \lg F_n}{\lg \mu_{\text{ср}}}.$$

Если же известны число проходов  $n$ , площади поперечного сечения заготовки  $F_0$  и конечного профиля  $F_n$ , то средняя вытяжка

$$\mu_{\text{ср}} = \sqrt[n]{\mu_{\text{общ}}} = \sqrt[n]{\frac{F_0}{F_n}}. \quad (8)$$

Распределение частных вытяжек по проходам может быть различным: частные вытяжки могут возрастать от первого прохода к последнему; вначале возрастать, а затем уменьшаться; закономерно уменьшаться от первого прохода к последнему. Все это зависит от типа стана, его характеристики, условий захвата, свойств прокатываемого металла и т. д.

Наиболее распространенной закономерностью распределения частных вытяжек по проходам является увеличение их с первого прохода к средним проходам и затем уменьшение к чистовому проходу или принятие максимальной вытяжки вначале и уменьшение к чистовому проходу (рис. 23). Объясняется это изменением пластических свойств металла в связи с понижением температуры, а также в связи с приближением формы раската к форме готового профиля. При малых вытяжках в предчистовом и чистовом калибрах обеспечивается более точное получение готового профиля. Кроме того, к концу прокатки увеличивается давление металла на валки в связи с возрастанием сопротивления деформации и уменьшением отношения толщины раската к диаметру валков и во избежание поломки валков деформация должна быть снижена.

Таким образом, если не принимать во внимание мощность электродвигателей и считать, что она обеспечивает нормальный процесс прокатки, то между коэффициентами деформации и остальными факторами может быть следующая зависимость.

Чем выше температура металла (а следовательно, чем ниже его сопротивление деформации и выше пластичность), тем большими могут быть коэффициенты высотной деформации или вытяжки. В целях максимального использования оборудования рекомендуется осуществлять наибольшую деформацию в первых проходах, а наименьшую — в по-



Рис. 23. Характерная закономерность распределения вытяжек по проходам

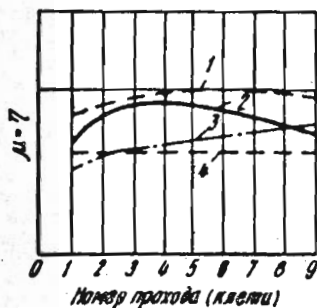


Рис. 24. Распределение вытяжек (коэффициентов высотной деформации) при прокатке углеродистой стали на различных станах по проходам:

1 — сортовые; 2 — полосовые и сортовые; 3, 4 — непрерывные заготовочные

следних, в которых сопротивление деформации металла выше из-за снижения его температуры по ходу прокатки. Отклонение от этой рекомендации возможно при ухудшении условий захвата, которые наиболее тяжелы в первых проходах. Поэтому иногда в начале прокатки уменьшают коэффициенты деформации за счет их увеличения в средних проходах и повторного уменьшения в последних проходах.

Таблица 2

Средние коэффициенты высотной деформации (вытяжки) по клетям

Профили	Клеть		
	черновых групп	промежуточных групп	чистовые
Круглая и квадратная сталь . . . . .	1,4—1,45	1,35—1,38	1,20—1,25
Угловая сталь . . . . .	1,35—1,4	1,3—1,35	1,15—1,2
Балки и швеллеры . . . . .	1,35—1,4	1,25—1,3	1,1—1,15
Рельсы . . . . .	1,35—1,4	1,3—1,35	1,13—1,18
Полоса . . . . .	1,4—1,45	1,25—1,35	1,15—1,23

На станах непрерывной прокатки (заготовочных и сортовых) возможно значительно повысить коэффициенты высотной деформации и вытяжки применением принудительной подачи раската в валки последующих (после первой) клетей.

На рис. 24 показаны кривые распределения коэффициентов высотной деформации (вытяжек) для различных станов. Средние значения этих коэффициентов для различных профилей приведены в табл. 2.

### 3. Методы расчета режимов обжатий

Режимы обжатий для различных станов могут быть рассчитаны по одному из приведенных ниже методов. Наиболее распространенными на практике являются методы расчета, основанные на предельных условиях захвата, на мощности электродвигателей и на прочности прокатных валков.

#### *Метод расчета, основанный на предельных условиях захвата*

Как известно, предельные условия захвата характеризуются равенством коэффициента трения  $f$  металла о валки тангенсу угла захвата  $\alpha$  (рис. 25)

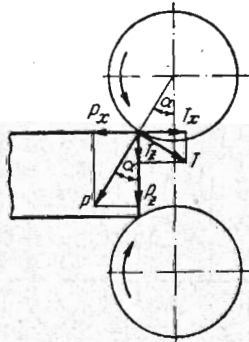
$$f = \operatorname{tg} \alpha. \quad (9)$$

Для осуществления надежного захвата металла валками необходимо соблюдать условие

$$f \geq \operatorname{tg} \alpha.$$

Однако все последующие расчеты производим исходя из равенства (9).

Рис. 25. Схема действия сил от валков на металл в начальный момент захвата



Угол захвата в радианах (рис. 26)

$$\alpha = \sqrt{\frac{\Delta h}{R}}. \quad (10)$$

Уравнение (9) можно записать в виде

$$f = \operatorname{tg} \alpha = C \alpha, \quad (11)$$

где  $C = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\alpha}$  — коэффициент пропорциональности.

Подставив значение угла захвата из формулы (10) в уравнение (11), получим

$$f = C \sqrt{\frac{\Delta h}{R}}. \quad (12)$$

Так как последнее уравнение записано на основе предельных условий захвата, то можно считать, что

$$\Delta h = \Delta h_{\text{макс}},$$

где  $\Delta h_{\text{макс}}$  — максимальное возможное обжатие за проход.

После преобразования формулы (12) имеем

$$\Delta h_{\text{макс}} = \frac{1}{C^2} f^2 R, \quad (13)$$

где  $R$  — катающий радиус валка (см. ниже).

В этом уравнении надо предварительно принять среднее значение  $C$ , которое изменяется при углах захвата  $\alpha = 0 \div 30^\circ$  в пределах, указанных в табл. 3.

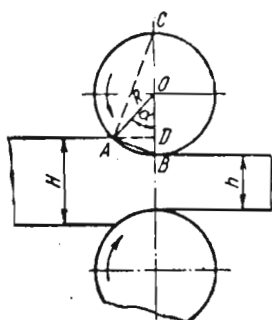


Рис. 26. Схема для определения максимального обжатия за проход исходя из предельных условий захвата

Таблица 3

Значения коэффициента  $C$  при различных углах захвата  $\alpha$

угол захвата $\alpha$ , град	Угол захвата в ради- анах $\alpha$ , рад	$\text{tg } \alpha$	$C = \frac{\text{tg } \alpha}{\alpha}$	$\frac{1}{C}$
5	0,08727	0,08749	1,003	1
10	0,17453	0,17633	1,01	0,99
15	0,26180	0,26795	1,024	0,975
20	0,34907	0,36397	1,043	0,96
25	0,43633	0,46631	1,069	0,9375
30	0,5236	0,57735	1,102	0,908

Среднее значение коэффициента  $C$  можно принять по граничным условиям захвата. В этом случае одно из крайних значений угла захвата будет  $\alpha = 0$ . Но это значение нереально. Если же принять за одно из граничных условий реальный угол  $\alpha = 5^\circ$ , а за второе — угол  $\alpha = 30^\circ$ , то среднее значение

$$C_{\text{ср}} = \frac{1,003 + 1,102}{2} = 1,0525 \text{ и } \frac{1}{C_{\text{ср}}} = 0,95.$$

Подставляя эти значения в уравнение (13), получаем

$$\Delta h_{\text{макс}} = 0,95^2 f^2 R \approx 0,9 f^2 R. \quad (14)$$

Для валков с гладкой бочкой катающий радиус  $R$  принимают равным половине диаметра валка. При расчете режимов обжатий по уравнению (14) необходимо учитывать износ валков, т. е. его минимальный диаметр. С этой целью при расчетах в каждом конкретном случае вно-

сят поправочный коэффициент  $k_1 = 0,90 \div 0,95$  на переточку валков. Тогда в общем виде уравнение (14) может быть записано так:

$$\Delta h_{\text{макс}} = 0,9k_1 f^2 R. \quad (15)$$

При практических расчетах для устойчивого захвата величину  $\Delta h_{\text{макс}}$  уменьшают на 3—5%. Таким образом, если считать, что уменьшение диаметра валков при переточках составляет в среднем 10%, то для расчетов режима обжатий полосы при новых валках можно принять уравнение

$$\Delta h_{\text{макс}} = 0,9k_1 k_2 f^2 R,$$

где

$k_2 = 0,95$  — коэффициент уменьшения максимального обжатия, обеспечивающий устойчивый захват.

С учетом обоих коэффициентов

$$\Delta h_{\text{макс}} = 0,77 f^2 R. \quad (16)$$

Коэффициент трения металла о валки определяют по формулам С. Экелунда с учетом материала валков:

$f_{\text{ст}} = 1,05 - 0,0005t$  — для стальных валков;

$f_{\text{чуг}} = 0,8f_{\text{ст}}$  — для чугунных валков.

Здесь  $t$  — температура прокатываемого металла, °С. При этом влияние скорости прокатки на коэффициент трения учитывают поправочным коэффициентом  $k_c$ , определяемым по рис. 48 (см. ниже).

Практика показывает, что коэффициенты трения, найденные по этим уравнениям, близки к действительным. Максимальное значение коэффициента трения может быть определено также по результатам прокатки, если она осуществлялась при предельных условиях. Не зная температуры прокатываемого металла, но зная диаметр прокатных валков и максимальное обжатие за проход, коэффициент трения можно определить следующим образом.

Согласно рис. 26 и уравнению (9) можно записать, что

$$f = \operatorname{tg} \alpha = \frac{AD}{OD}.$$

Из подобия треугольников  $ABD$  и  $ADC$  имеем

$$\frac{BD}{AD} = \frac{AD}{DC}, \text{ откуда } AD = \sqrt{BD \cdot DC} = \sqrt{\frac{\Delta h}{2} \left( 2R - \frac{\Delta h}{2} \right)}$$

или

$$AD = \sqrt{R\Delta h - \frac{\Delta h^2}{4}};$$

$$OD = R - \frac{\Delta h}{2}.$$

Тогда

$$f = \frac{\sqrt{R\Delta h - \frac{\Delta h^2}{4}}}{R - \frac{\Delta h}{2}} = \frac{2\sqrt{R\Delta h - \frac{\Delta h^2}{4}}}{2R - \Delta h} = \frac{\sqrt{4R\Delta h - \Delta h^2}}{2R - \Delta h},$$

или окончательно

$$f = \frac{\sqrt{4R\Delta h_{\text{макс}} - \Delta h_{\text{макс}}^2}}{2R - \Delta h_{\text{макс}}}. \quad (17)$$

Уравнение для определения максимального обжатия за проход может быть записано и в другом виде, если учесть зависимость между диаметром валков, углом захвата и обжатием

$$\Delta h = D(1 - \cos \alpha) = D \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha}} \right). \quad (18)$$

Если обжатие за проход максимально, то, следовательно, и угол захвата в этом случае максимален.

Тогда уравнение (18) примет вид

$$\Delta h_{\max} = D \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_{\max}}} \right).$$

Но максимальное обжатие будет при предельных условиях захвата, характеризующихся равенством коэффициента трения тангенсу угла захвата (9). После подстановки коэффициента трения получим уравнение В. Е. Грум-Гржимайло

$$\Delta h_{\max} = D \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{1 + f^2}} \right). \quad (19)$$

Уравнения (14)—(16) и (19) при подстановке в них равнозначных величин дают примерно одинаковые результаты. Однако с точки зрения быстроты расчета на практике удобнее пользоваться уравнениями (14), (15) или (16). Данный метод расчета режимов обжатий имеет наибольшее применение.

#### *Метод расчета, основанный на мощности электродвигателей*

Расчет обжатий, основанный на использовании полной мощности электродвигателей, производят исходя из условий нормального протекания технологического процесса прокатки. Известно, что мощность привода валков имеет две основные составляющие:

1) мощность прокатки  $N_{\text{пр}}$ , потребную для осуществления работы деформации (обжатия) металла и преодоления при этом сил трения металла по поверхности валков;

2) мощность  $N_{\text{тр}}$ , потребную для преодоления сил трения, возникающих в подшипниках валков при прокатке.

При этом мощность на валу двигателя, потребная для вращения валков:

$$N = \frac{N_{\text{пр}} + N_{\text{тр}}}{\eta_{\text{л}}}, \quad (20)$$

где  $\eta_{\text{л}}$  — к. п. д., учитывающий потери на трение в подшипниках вращающихся деталей главной линии стана и в зубчатых зацеплениях. Величина  $\eta_{\text{л}}$  зависит от конструкции шпинделей ( $\eta_1$ ), шестеренной клетки ( $\eta_2$ ) и редуктора ( $\eta_3$ ). Для двух треховых шпинделей  $\eta_1 = 0,97 \div 0,98$ ; для универсальных шпинделей  $\eta_1 = 0,95 \div 0,98$ . К. п. д. шестеренной клетки (шевроновые зубья) при подшипниках скольжения  $\eta_2 = 0,93 \div 0,95$ ; при подшипниках качения  $\eta_2 = 0,94 \div 0,96$ . К. п. д. одноступенчатого редуктора  $\eta_3 = 0,93 \div 0,96$ . Общий к. п. д. главной линии стана

$$\eta_{\text{л}} = \eta_1 \eta_2 \eta_3.$$

Мощность по уравнению (20) равна номинальной мощности двигателя при прокатке с большим машинным временем по проходам и постоянном числе оборотов валков. В случае кратковременных нагрузок на

двигатель, когда машинное время по проходам мало (число оборотов валков постоянно), мощность по уравнению (20) будет примерно равна или несколько меньше максимальной мощности двигателя, определяемой исходя из допустимой перегрузки. Обжатия прокатываемого металла в этом случае должны определяться по максимальной мощности; однако при этом необходима проверка мощности двигателя на допустимую перегрузку и на нагрев.

Для станков с переменным числом оборотов валков в течение прохода мощность на валу двигателя будет также переменной за этот период. Ее максимальное значение, по которому определяют обжатия, ограничивается величиной допустимой перегрузки двигателя за вычетом динамической мощности. При этом проверка загрузки двигателя по среднеквадратичной мощности (проверка на нагрев) является также обязательной. Мощность на валу двигателя стана с переменным числом оборотов валков

$$N = \frac{N_{\text{пр}} + N_{\text{тр}}}{\eta_{\text{л}}} \pm N_{\text{дин}},$$

где  $N_{\text{дин}}$  — мощность, необходимая для преодоления инерции всех вращающихся от двигателей частей главной линии стана (валков, шпинделей, шестерен, **муфт**) в период разгона (плюс) или замедления (минус).

Мощность прокатки может быть определена по формуле И. М. Павлова

$$N_{\text{пр}} = pBD\alpha v f, \quad (21)$$

где  $p$  — среднее удельное давление металла на валки;  
 $v$  — скорость прокатки.

Если принять во внимание отсутствие опережения и сделать некоторые преобразования, имея в виду, что  $f = \text{tg} \frac{\alpha}{2} \approx \frac{\alpha}{2}$  и  $\alpha = \sqrt{\frac{\Delta h}{R}}$ , то уравнение (21) имеет вид

$$N_{\text{пр}} = pB\Delta h v. \quad (22)$$

Мощность преодоления сил трения

$$N_{\text{тр}} = 2Pf_{\text{ш}} v \frac{d}{D}. \quad (23)$$

В зависимости от конструкции подшипников валков (скольжения, качения, жидкостного трения)  $N_{\text{тр}}$  составляет 6—12% от мощности прокатки. Мощность  $N_{\text{дин}}$  определяют по формуле

$$N_{\text{дин}} = \frac{M_{\text{дин}} n}{0,7162}, \quad (24)$$

где

$n$  — число оборотов электродвигателя. В данном уравнении величину  $n$  следует принимать средней от начала его изменения со значения  $n_1$  до установившегося значения  $n_2$ , т. е.

$$n = \frac{n_1 + n_2}{2}.$$

Динамический момент, приведенный к валу двигателя

$$M_{\text{дин}} = \frac{GD_{\text{прив}}^2}{375} \varepsilon,$$

где

$CD_{\text{прив}}$  — приведенный к валу двигателя маховой момент всех вращающихся частей привода и валков;

$\varepsilon = \frac{dn}{dt}$  — угловое ускорение (замедление) электродвигателя при прокатке.

Значение угловых ускорений зависит от характеристики электродвигателя и схемы его управления. Для блюмингов и слябингов обычно применяют при разгоне и торможении (замедлении)  $\varepsilon = 60 \div 80 \text{ об/мин/сек}$ . Динамический момент при ускорении принимают положительным, а при торможении отрицательным.

Таким образом, мощность двигателя без учета  $N_{\text{дин}}$  будет определяться в зависимости от типа подшипников валков уравнением

$$N = \frac{N_{\text{пр}} + (0,06 \div 0,12) N_{\text{пр}}}{\eta_{\text{л}}} = \frac{(1,06 \div 1,12) p B \Delta h v}{\eta_{\text{л}}}. \quad (25)$$

Необходимо обратить внимание на следующую особенность определения величины обжатия по уравнению (25). Требуется стремиться к тому, чтобы мощность установленного электродвигателя использовалась полностью. Но при этом в процессе прокатки не должны происходить автоматическое отключение электродвигателя и остановка стана с недокатанным раскатом в валках. Поэтому оставляют некоторый запас мощности электродвигателя (его можно предусмотреть значением  $\eta_{\text{л}}$ ) для случая, если прокатываемый металл будет иметь более высокое сопротивление деформации по причине технологических неполадок. Тогда

$$\Delta h_{\text{макс}} \approx \frac{N \eta_{\text{л}}}{(1,06 \div 1,12) p B v}. \quad (26)$$

На практике уравнением (26) пользоваться очень удобно. Правда, надо предварительно знать среднее удельное давление металла на валки  $p$ , в свою очередь зависящее от величины частного обжатия. Но, как правило, удельное давление обычно известно. Его величину принимают в расчет предварительно, а затем после определения обжатия по уравнению (26) производят более точное его определение. Наконец, подстановкой в то же уравнение полученных удельных давлений определяют окончательные величины обжатий в каждом проходе с использованием величины полной мощности электродвигателей. Такой метод расчета может быть рекомендован для станов всех типов. Чаще всего его применяют для слябингов и листовых станов.

#### *Метод расчета, основанный на прочности прокатных валков*

В ряде случаев при расчете режимов обжатий на станах всех типов, особенно прокатывающих слябы и толстолистовую сталь, в качестве отправного критерия приходится принимать прочность прокатных валков.

При расчетах обжатий принимают условие, что шейки валков равнопрочны с бочкой, а силы, возникающие и действующие на валки при прокатке, не превышают значений, допускаемых прочностью валков на изгиб.

При равномерном распределении нагрузки на бочке вала сила, допускаемая условием прочности (рис. 27):

$$P_{\text{доп}} = \frac{0,4 D^3 [\sigma]_{\text{из}}}{L + l - 0,5 B}, \quad (27)$$

где  $[\sigma]_{из}$  — допускаемое напряжение на изгиб;  
 $l$  — длина шейки валка.

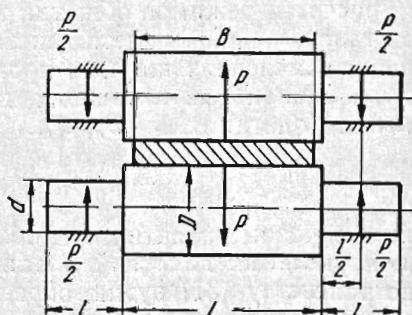
При прокатке в калибрах уравнение (27) должно быть приведено к условиям сосредоточенной нагрузки.

Примерные значения допускаемых напряжений на изгиб приведены ниже:

Валки	Допускаемое напряжение на изгиб, кг/см <sup>2</sup>
Обыкновенные чугуны . . . . .	700—800
Легированные чугуны . . . . .	800—900
Литые стальные . . . . .	1000—1200
Кованые стальные . . . . .	1200—1400
Кованые из легированной стали	1400—1600

Допускаемая сила, возникающая в процессе прокатки, должна учитываться при условии минимального значения диаметра валков после всех переточек.

Р и с. 27. Схема действия сил и основные размеры валков и профиля при прокатке полосы (листовой стали)



Согласно полному давлению металла на валки, определяемому по формуле

$$P = \rho B \sqrt{R \Delta h},$$

обжатие в каждом проходе

$$\Delta h = \left( \frac{P}{\rho B} \right)^2 \frac{1}{R} = \frac{2}{D} \left( \frac{P}{\rho B} \right)^2.$$

Подставив в это уравнение значение  $P = P_{доп}$  из формулы (27), после преобразования получим максимальное обжатие

$$\Delta h_{\max} = \frac{0,32 D^5 [\sigma]_{из}^2}{[(L + l - 0,5B) \rho B]^3}. \quad (28)$$

По этому уравнению и определяют максимальное обжатие исходя из прочности валков. Следует еще раз подчеркнуть, что этот расчет должен быть основан на равнопрочности шейки и бочки валков, т. е. на правильном выборе соотношения диаметров шейки и бочки и на правильном выборе радиуса закруглений в местах перехода от шеек к бочке. В противном случае необходим проверочный расчет шейки (передающей крутящий момент) на сложное сопротивление.

Обычно прочность валков ограничивает величину обжатия при прокатке листов, полос и фасонных профилей, имеющих значительную ширину и создающих высокие удельные давления на валки. В этих случаях максимальная общая вытяжка достигается при таком режиме об-

жаций, когда полное давление металла на валки по проходам будет одинаковым, т. е.

$$P_1 = P_2 = P_3 = \dots = P_n,$$

или 
$$p_1 B_1 \sqrt{R_1 \Delta h_1} = p_2 B_2 \sqrt{R_2 \Delta h_2} = \dots = p_n B_n \sqrt{R_n \Delta h_n}. \quad (29)$$

В последнем уравнении необходимо сначала определить максимальное значение полного давления металла на валки в первом проходе, допустимое по условиям прочности валков, затем на основании его определять обжатия в последующих проходах. Если за исходный принять первый проход при заранее известных величинах  $p_1$ ,  $B_1$ ,  $R_1$  и  $\Delta h_1$ , то обжатие во втором проходе согласно равенству (29)

$$\Delta h_2 = \left( \frac{p_1}{p_2} \cdot \frac{B_1}{B_2} \right)^2 \frac{R_1}{R_2} \Delta h_1.$$

В общем виде это уравнение может быть записано так:

$$\Delta h_n = \left( \frac{p_{n-1}}{p_n} \cdot \frac{B_{n-1}}{B_n} \right)^2 \frac{R_{n-1}}{R_n} \Delta h_{n-1}. \quad (30)$$

При расчетах режимов обжатий на блюмингах, слябингах, толстолистовых станах, черновых клетях листопрокатных и полосовых станов при небольших изменениях ширины прокатываемого металла от прохода к проходу и одинаковых катающих диаметрах валков уравнение (30) упростится. Полагая  $B_{n-1} \approx B_n$ ,  $R_{n-1} \approx R_n$ , получаем

$$\Delta h_n = \left( \frac{p_{n-1}}{p_n} \right)^2 \Delta h_{n-1}. \quad (31)$$

Таким образом, практически обжатие в данном проходе является функцией удельных давлений в данном и предшествующем проходах. Если по равенству (31) нужно определять максимальное обжатие, то, следовательно, и удельное давление соответственно следует принимать максимальным. Необходимо учесть, что удельное давление в последующем проходе ( $p_n$ ) нужно первоначально определять по предварительному принятому обжатию, затем уточнять при повторном расчете. Если же в процессе прокатки происходит заметное изменение ширины раската, а также отличаются диаметры валков от прохода к проходу, тогда в уравнение (30) требуется подставлять точные значения ширины прокатываемого металла и диаметры прокатных валков. В этих случаях приходится измерять ширину раската после прокатки или определять ее по известным формулам; то же относится и к катающим диаметрам.

В заключение следует отметить, что данный метод при лимитирующем давлении  $P$  сводится в итоге к определению  $\Delta h_n$ :

$$\Delta h_n = \frac{P^2}{p_n^2 B_n^2 R_n}.$$

Применяют и другие методы расчета режимов обжатий при прокатке: по практическим коэффициентам относительной деформации, по кривым удельного расхода энергии на тонну проката, методы, основанные на использовании пластичности прокатываемого металла, на полной проработке прокатываемого сечения по его высоте (толщине) и др.

#### 4. Характер деформации при прокатке и расчетные формулы уширения

Из всего обширного сортамента прокатной продукции около 40% профилей прокатывают на валках с гладкой бочкой из исходной заготовки квадратного или прямоугольного сечения. Сюда относятся листы,

широкие и узкие полосы, ленты. Большую же часть продукции прокатывают в калибрах различной формы.

Как правило, прокатка в калибрах сопровождается резко выраженной неравномерностью деформации по ширине раската, которая зависит от конфигурации калибра, формы и размеров сечения заданного в валки металла, соотношения между минимальным и максимальным катающими диаметрами (по очертанию калибра) и других факторов. Поэтому нельзя механически переносить основные теоретические положения, разработанные для прокатки прямоугольной полосы на валках с гладкой бочкой, к другим, более сложным случаям.

### Уширение

Одним из наиболее важных вопросов при калибровке любого профиля следует считать уширение, от которого зависит заполнение калибра металлом и соответственно получение формы профиля.

Различают три вида уширения: *свободное*, *стесненное* и *вынужденное*.

*Свободное уширение* — приращение ширины раската, которое получается при равномерной деформации металла по ширине в валках с гладкой бочкой. При этом течению металла в поперечном направлении препятствуют только контактные силы трения.

*Стесненное уширение* — приращение ширины раската, которое получается при «сдерживающем» воздействии боковых стенок калибра. Величина стесненного уширения меньше свободного уширения. Этот вид уширения применяют, когда необходимо специально обработать отдельные элементы профиля, например, при формировании внутреннего закругления полок в калибрах для угловой стали.

Стесненное уширение возможно как при равномерной, так и неравномерной деформации металла по ширине.

*Вынужденное уширение* является следствием неравномерной деформации металла по ширине, что характерно для прокатки большого числа профилей. Этот вид уширения используют в тех случаях, когда свободное уширение оказывается недостаточным для получения требуемой ширины конечного профиля.

В целях увеличения ширины прокатываемых фланцевых профилей применяют также принудительное растяжение их в направлении ширины выступами в калибрах.

Величина уширения при прокатке зависит от коэффициента трения, диаметра валков, обжатия, толщины раската. Все эти факторы исследованы И. М. Павловым, А. И. Целиковым, А. П. Чекмаревым, И. Я. Тарновским, П. И. Полухиным, Б. П. Бахтиновым, М. С. Мутьевым и другими. Однако нельзя утверждать, что данные их исследований и формулы могут дать полное решение задачи для всех случаев прокатки. В основном все выводы большинства авторов относятся к рассмотрению условий равномерной деформации металла по ширине на валках с гладкой бочкой.

Рассмотрим отдельные формулы для определения уширения прямоугольного раската при прокатке его в валках с гладкой бочкой.

#### 1. Формула С. Экелунда

$$B_2 = \sqrt{4m^2 (H + h)^2 \left(\frac{l}{B_1}\right)^2 + B_1^2 + 4ml(3H - h) - 2m(H + h)\frac{l}{B_1}}, \quad (32)$$

где 
$$m = \frac{1,6fl - 1,2\Delta h}{H + h};$$

$l = \sqrt{R(H-h)}$  — длина хорды очага деформации.

## 2. Формула С. И. Губкина

$$\Delta b = \left(1 + \frac{H-h}{H}\right) \left(f \sqrt{R(H-h)} - \frac{H-h}{2}\right) \frac{H-h}{H}. \quad (33)$$

## 3. Формула Б. П. Бахтинова

$$\Delta b = 1,15 \frac{H-h}{2H} \left(\sqrt{R(H-h)} - \frac{H-h}{2f}\right). \quad (34)$$

## 4. Формула Э. Зибеля

$$\Delta b = (0,3 \div 0,4) \frac{H-h}{H} \sqrt{R(H-h)}. \quad (35)$$

Формула С. Экеелунда является наиболее точной, но она весьма сложна для практических расчетов. Формулы же С. И. Губкина и Б. П. Бахтинова равнозначны между собой по точности. Формула Э. Зибеля дает удовлетворительные результаты при среднем значении опытного коэффициента, равном 0,35.

Формулы Б. П. Бахтинова и Э. Зибеля сравнительно просты и удобны для практического пользования.

При прокатке в калибрах с резко выраженной неравномерностью деформации металла по ширине учет величины уширения сильно затруднен. Поперечная деформация здесь может быть различной как по характеру (свободное, стесненное или вынужденное уширение), так и по

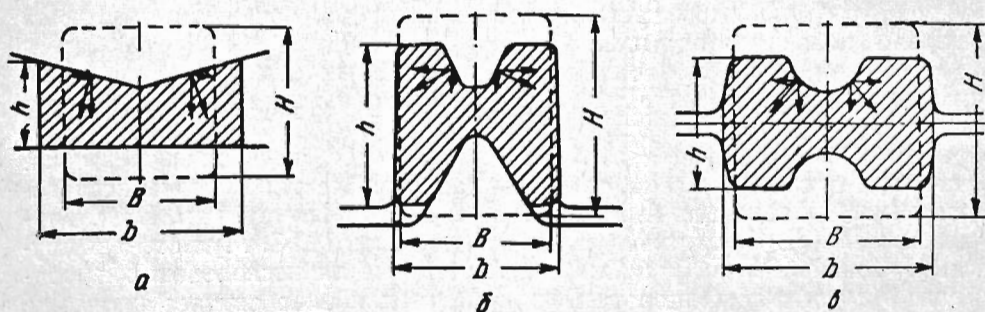


Рис. 28. Разгонные калибры для создания различного вынужденного уширения: а — небольшого; б — в разрезном балочном калибре; в — большого

величине. Поэтому в данном случае точный подсчет уширения по указанным формулам не представляется возможным.

На уширение при неравномерной деформации в значительной степени влияет форма калибров. Здесь часто уширение является вынужденным. Так, в разгонных калибрах (рис. 28) уширение будет зависеть от угла наклона стенок ручья, осуществляющих «разгон» металла в ширину. Чем больше горизонтальная составляющая нормальной силы давления наклонной стенки калибра на металл или чем больше угол накло-

на этой же стенке, тем в большей степени будет происходить уширение. Теоретическое определение величины вынужденного уширения с учетом угла наклона стенок калибра затруднительно. Поэтому на практике такое уширение определяют по кривым, построенным по опытным данным.

Аналогично положение и с определением величины уширения в случае, когда стенки калибра «сдерживают» металл. В этом случае горизонтальная составляющая нормальной силы направлена против уширения (рис. 29).

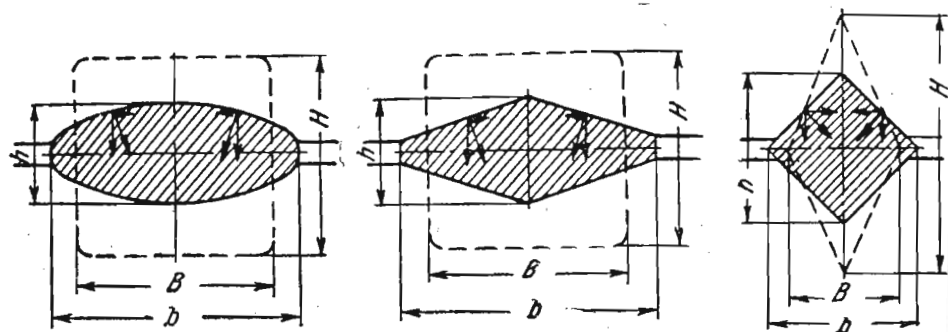


Рис. 29. Вытяжные калибры, сдерживающие уширение металла при его неравномерной деформации по ширине

Известны несколько методов приближенного подсчета уширения при неравномерной деформации металла по ширине. Основными из них являются методы: соответственной полосы (А. Ф. Головин, В. С. Смирнов), описанных прямоугольников (Б. П. Бахтинов) и приведенной полосы. Последний метод является одним из наиболее приемлемых для практики.

Метод приведенной полосы заключается в замене сечения любой сложной формы равновеликим по площади прямоугольным сечением. При этом полоса, полученная методом приведения, имеет такую же ширину, что и замененный профиль (рис. 30).

Высота приведенной полосы является частным от деления площади рассчитываемого сложного калибра на его максимальную ширину.

Пусть:  $F$  — площадь калибра сложной формы;

$H$  и  $B$  — высота и ширина калибра;

$F_{пр}$  — площадь поперечного сечения приведенной полосы;

$h_{пр}$  и  $b_{пр}$  — высота и ширина приведенной полосы.

Имеем:

$$F = F_{пр}; \quad B = b_{пр} \quad \text{и} \quad h_{пр} = \frac{F}{B}.$$

Тогда для приведенной полосы при получении из нее промежуточного профиля с размерами  $F_1$ ,  $h$  и  $b$  получим линейное обжатие

$$\Delta h_{пр} = h_{пр} - h = \frac{F}{B} - \frac{F_1}{b},$$

и линейное уширение

$$\Delta b_{л} = \Delta b = b - B.$$

Метод приведенной полосы широко используют на практике не только для расчета уширения, но и для приближенного определения сред-

ней длины дуги захвата, величины контактной площади, давления металла на валки и т. д.

При нахождении уширения для приведенной полосы по формулам свободного уширения не учитывается действительный характер течения металла в поперечном направлении. Поэтому для более точного учета всех факторов, влияющих на уширение в калибрах сложной формы, необходимо применять в формулах поправочные коэффициенты.

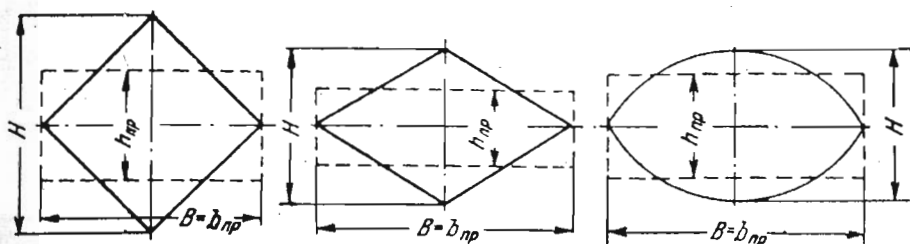
В общем виде поправочный коэффициент уширения при любом характере деформации может быть представлен в виде

$$\Delta b_x = k_x \Delta b_{св},$$

где  $\Delta b_x$  — уширение при любом характере течения металла в калибре сложной формы;

$k_x$  — коэффициент, учитывающий изменение уширения в зависимости от его характера;

$\Delta b_{св}$  — свободное уширение.



Р и с. 30. Приведенные сечения для квадратного, ромбического и овального профилей

Если  $k_x = 1$ , то  $\Delta b_x = \Delta b_{св}$ , т. е. происходит свободное уширение.

Если же  $k_x < 1$ , то  $\Delta b_x < \Delta b_{св}$ . В данном случае прокатка производится в калибрах, сдерживающих уширение. На практике принимают коэффициент стеснения  $k_{ст} = 0,1 \div 1,0$  в зависимости от формы калибра.

Если же  $k_x > 1$ , то  $\Delta b_x > \Delta b_{св}$ . Здесь уже имеем вынужденное уширение, которое используют тогда, когда необходимо получить максимальную ширину раската за минимальное число проходов, если требуемая ширина не может быть получена при свободном уширении. В этом случае принимают коэффициент вынужденного уширения  $k_{в.у} = k_x = 1,0 \div 1,25$ .

#### Уширение во фланцевых калибрах

Уширение во фланцевых калибрах (балки, швеллеры) имеет свои особенности, обусловленные характером деформации металлов.

В балочных калибрах отдельные элементы по сечению раската обжимаются при пяти различных коэффициентах деформации. Как правило, средний коэффициент деформации в открытом фланце равен или несколько больше, чем коэффициент деформации по стенке. Средний коэффициент деформации в закрытом фланце принимают равным немногим больше единицы. Неравномерность обжатий является в этом случае следствием различных функций, выполняемых отдельными элементами калибра.

В швеллерном калибре, не имеющем закрытых фланцев, формирование профиля осуществляется либо при одинаковых коэффициентах

деформации по фланцам и стенке, либо таким образом, что по фланцам обжатие несколько больше, чем по стенке.

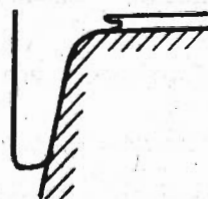
Выбор уширения играет большую роль при деформации металла в калибрах. Например, при большом уширении в балочном и швеллерном калибрах возможно появление заката у основания фланцев. Поэтому при калибровке этих профилей большие уширения не приемлемы.

Для определения уширения во фланцевых калибрах рядом авторов рекомендована эмпирическая формула

$$\Delta b_n = 0,01 B + (n - 1),$$

где  $B$  — ширина чистового калибра;  
 $n$  — номер прохода против хода прокатки.

Рис. 31. Закат у основания балки при большом уширении



Расчеты по приведенной формуле дают весьма завышенные результаты. Фактически при прокатке балок и швеллеров из низкоуглеродистой стали уширение значительно меньше.

С точки зрения устойчивости раската в калибре (особенно для швеллера) большое уширение нежелательно. Однако основной недостаток, связанный с большим вынужденным уширением, заключается в образовании закатов, как это показано на рис. 31\*.

В разрезных калибрах уширение следует принимать в пределах 8—15 мм, при этом чем больше профиль, тем больше уширение.

#### *Уширение в калибрах для угловой и зетовой стали*

Деформация металла при прокатке угловой и зетовой стали осуществляется в три стадии: изгиб в первом по ходу прокатки профильном калибре и начало формирования полок; прокатка в промежуточных калибрах с изогнутыми полками; выпрямление полок в чистовом калибре.

Первая и третья стадии сопровождаются внеконтактной деформацией полок и вследствие этого увеличением ширины полок против расчетного уширения по обжатию.

Вторая стадия сопровождается лишь уширением в связи с осуществлением только высотной деформации. Поэтому при расчетах определяют лишь уширение от обжатия.

В расчетах калибровки угловой и зетовой стали при обжатии в первом фасонном (профильном) и чистовом калибрах необходимо к уширению, определяемому по одной из рекомендованных формул, прибавлять вынужденное уширение в связи с внеконтактной деформацией:

$$\Delta b = \Delta b_{\text{св}} + \Delta b_{\text{вк}}. \quad (36)$$

\* В связи с этим, исходя из анализа практических данных, рекомендуется другая, общая для балок и швеллеров формула уширения (115), которая приведена в гл. XIII.

Если определение свободного уширения не вызывает затруднений, то величину внеконтактной деформации ( $\Delta b_{\text{вк}}$ ) определяют лишь с известным приближением по эмпирическим зависимостям.

Уширение каждой полки определяют делением полученной по уравнению (36) суммы пополам, а для неравнобокой угловой стали — пропорционально ширинам полок. Из-за специфических условий формирования стенки зетового профиля величина ее уширения определяется интенсивностью деформации этой стенки и конструкцией самого калибра.

Для того чтобы были хорошо обработаны торцевые грани полок и было получено требуемое внутреннее закругление полок на их концах по определенному радиусу, в промежуточных калибрах рекомендуется предусматривать стесненное уширение

$$\Delta b_{\text{ст}} = k_{\text{ст}} \Delta b_{\text{св.}}$$

Коэффициент стеснения раската в калибре принимают в пределах

$$k_{\text{ст}} = 0,5 \div 0,8,$$

но при необходимости его можно принимать и меньше 0,5.

#### *Уширение в калибрах, имеющих прямоугольный элемент*

Если фасонный профиль имеет в своем сечении горизонтальный прямоугольный элемент, то уширение в калибре можно определять, основываясь на высотной деформации этого элемента. Но при этом на раскате не должно быть выступов значительных размеров или фланцев. В противном случае выступы будут ограничивать естественное уширение и методика определения уширения будет иной.

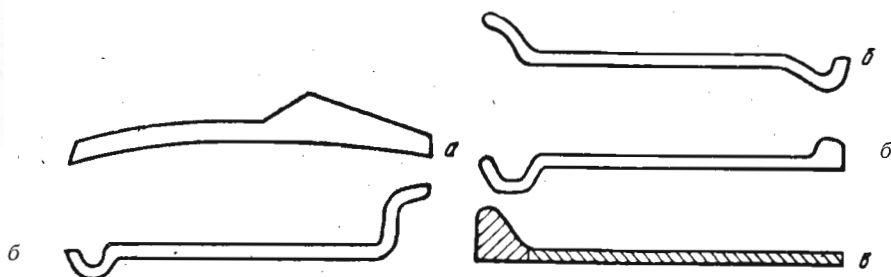


Рис. 32. Профили с горизонтальным прямоугольным элементом:  
а — лемешная сталь; б — профили автообода; в — полосульб

В качестве примера можно привести лемешную сталь, автообод (рис. 32) и другие профили, имеющие в своем составе горизонтальный прямоугольный основной элемент.

При расчетах калибровки таких профилей обычно задаются конструктивными точками, связанными с необходимостью получения более сложных элементов в сечении. Тогда получающееся естественное уширение превращается в стесненное самой конструкцией калибра. Степень ограничения или стеснение уширения зависит от сложности профиля.

#### *Уширение в калибрах для профилей сложных сечений*

При калибровке профилей сложных сечений определение уширения практически невозможно. Объясняется это тем, что такие профили (например, бортовое кольцо автообода) прокатываются при значительной

неравномерной деформации по ширине, имеют выступы, формирование которых требует построения последовательного ряда калибров по определенным правилам. Формоизменение раската сложного сечения в калибре происходит в основном при стесненном уширении, и обжимаемый металл идет почти исключительно в вытяжку.

Построение калибров по проходам основывается на конструктивных соображениях, чтобы обеспечивалось получение отдельных элементов профиля по его сечению, а в конечном счете и самого профиля в целом.

## 5. Средняя линия валков. Линия прокатки. Катающий диаметр

При постоянстве межосевого расстояния  $D_0$  и отсутствии зазора  $t$  (см. рис. 12) диаметры верхнего ( $D_v$ ) и нижнего ( $D_n$ ) валков в клетиду будут иметь соответственно максимальные значения  $D_{v, \text{макс}}$  и  $D_{n, \text{макс}}$

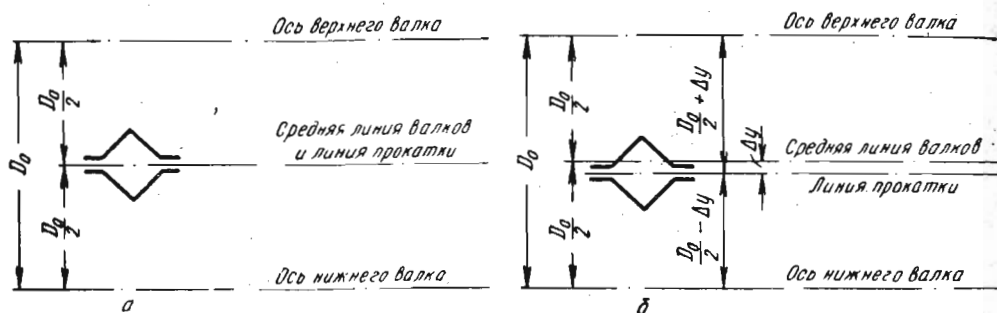


Рис. 33. Положение линии прокатки и средней линии валков:

а — совпадение обеих линий; б — смещение линий относительно друг друга

Тогда

$$\frac{D_{v, \text{макс}} + D_{n, \text{макс}}}{2} = D_0 = \text{const.}$$

При врезе калибров различной формы диаметры бочки верхнего и нижнего валков в клетях дуо могут быть неодинаковы и равенство  $D_v = D_n$  в этом случае может быть лишь частным случаем, когда прокатывают полосу или листовую сталь.

Однако во всех случаях исходным размером прокатных валков является  $D_0$ . Относительно этого размера проводят окончательное построение ручьев и калибров на валках, а также определение действительных диаметров элементов бочки вала в результате его калибровки. При этом важное значение имеет так называемая средняя линия прокатных валков.

*Средней линией прокатных валков* называют горизонтальную линию, делящую пополам расстояние между осями верхнего и нижнего валков (рис. 33).

Линия, на которой располагаются калибры, называется *линией прокатки*.

При размещении калибров на валках соблюдают следующий порядок расчетов:

1) при данных диаметрах бочки верхнего ( $D_v$ ) и нижнего ( $D_n$ ) валков, зазоре  $t$  между ними определяют значение  $D_0$ ;

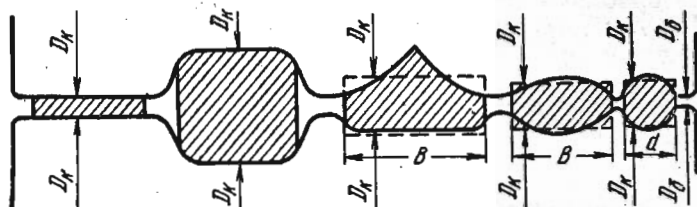
2) определяют положение средней линии валков из условия

$$y_{\text{слв}} = \frac{D_{\text{в}} + D_{\text{н}}}{4} + \frac{t}{2} = \frac{D_0}{2} = \text{const};$$

3) совмещают линию прокатки со средней линией валков. Если задаются определенной величиной верхнего или нижнего давления  $\pm (D_{\text{в}} - D_{\text{н}})$ , то линию прокатки соответственно смещают по вертикали от средней линии валков на величину

$$\Delta y = \pm \frac{(D_{\text{в}} - D_{\text{н}})}{2 \cdot 2} = \pm \frac{(D_{\text{в}} - D_{\text{н}})}{4}$$

(т. е. на одну четвертую часть принятой величины давления);



Р и с. 34. Схема к определению катающего диаметра валков при их калибровке

4) по положению нейтральной линии калибра, которую совмещают с линией прокатки, вычерчивают полностью калибр со всеми элементами, зазором и диаметрами по буртам у места зазора;

5) определяют ширину буртов у калибра и зазор между валками по крайним буртам. По построенному калибру окончательно определяют с учетом принятых зазоров диаметры по всем элементам бочки верхнего и нижнего валков;

6) проверяют правильность определения диаметров по элементам бочки валков.

Расточку нижнего и верхнего валков производят при максимальных значениях их диаметров, определившихся в результате построения калибра относительно его нейтральной линии (см. следующий раздел).

**Катающий диаметр.** Если определить диаметр валков, которому соответствует скорость выхода из них раската, то в большинстве случаев этот диаметр не будет равен фактическому диаметру бочки ( $D_б$ ) валка (рис. 34). Поэтому для расчетов калибровки введено понятие катающего диаметра. Катающим (или рабочим) является такой диаметр (радиус), которому соответствует скорость выхода раската из валков без учета опережения. При прокатке металла на валках с гладкой бочкой или в ящичных калибрах катающий диаметр принимают по гладкой бочке или по дну ящичного калибра. Во всех остальных случаях катающий диаметр  $D_к$  определяют по приведенной высоте, соответствующей размерам этого калибра:

$$D_к = D_0 - h_{\text{прив}} = D_0 - \frac{F}{b},$$

где  $F$  — площадь калибра;  
 $b$  — ширина калибра.

Исходя из этого для калибров различных форм получим следующие уравнения для определения величины катающего диаметра.

Для однорадиусного овала

$$D_k = D_0 - \frac{2}{3} h,$$

где  $h$  — высота овала;  
для ромбического калибра

$$D_k = D_0 - 0,5 h,$$

где  $h$  — высота ромба;  
для квадратного калибра без закругления углов

$$D_k = D_0 - 0,707 a,$$

где  $a$  — сторона квадрата;  
для квадратного калибра с радиусом закругления углов  $r$  при вершинах

$$D_k = D_0 - \frac{a^2 - 0,86 r^2}{1,41 a - 0,83 r},$$

или

$$D_k = D_0 - \frac{a^2 - 0,86 r^2}{1,41 a - t},$$

где  $t$  — зазор между валками;  
для шестиугольного калибра (системы калибров шестиугольник — квадрат) с шириной по дну  $b$ , общей шириной  $B$  и глубиной ручьев  $h$

$$D_k = D_0 - \left( \frac{B+b}{B} \right) h - t;$$

для круглого калибра диаметром  $d$

$$D_k = D_0 - 0,785 d.$$

## 6. Определение положения нейтральной линии калибра

Наличие осей симметрии облегчает задачу нахождения *нейтральной линии* калибра. Такой линией, как уже было определено выше, называют горизонтальную линию калибра, относительно которой величины моментов сил, приложенных к прокатываемому металлу от верхнего и нижнего валков, одинаковы (при условии, если эта линия совпадает со средней линией валков). Совмещение нейтральной линии калибра со средней линией валков, делящей пополам расстояние между их осями, обеспечивает прямолинейное движение раската при выходе его из клетки.

Нейтральная линия в калибрах с горизонтальной осью симметрии совпадает с последней и проходит через центр тяжести фигуры. Для сложных переходных калибров, не имеющих горизонтальной оси симметрии, определение нейтральной линии сводится к нахождению ординаты центра тяжести. В этих сечениях центр тяжести всегда располагается на вертикальной оси симметрии.

Последовательность определения положения нейтральной линии калибра следующая:

- 1) делят калибр на ряд простых геометрических фигур;
- 2) проводят горизонтальную линию  $x-x$ , условно предполагая, что она является нейтральной линией калибра (целесообразнее всего совмещать ее с одной из линий, входящих в очертание калибра);
- 3) определяют центры тяжести и площади каждой из геометрических фигур, на которые разделен калибр;
- 4) составляют уравнения статических моментов для каждой геометрической фигуры относительно условной линии  $x-x$ ;

5) составляют при соблюдении правила знаков общее уравнение для определения положения нейтральной линии калибра. Если в результате решения этого уравнения после подстановки в него цифровых значений получился результат, отличный от нуля, то относительное положение нейтральной линии определится знаком самого результата. Абсолютное значение результата показывает, на какое расстояние надо перенести нейтральную линию от условно принятой оси  $x-x$  вниз или вверх.

В табл. 4 приведены координаты  $x_C$  и  $y_C$  центров тяжести относительно осей  $x-x$  и  $y-y$  для некоторых простых геометрических фигур.

Таблица 4

Координаты центров тяжести  $C$  некоторых простых геометрических фигур

Координаты	Фигуры			
	полукруг	треугольник	трапеция	сектор
$x_C$	—	—	—	$\frac{2}{3} R \frac{\sin \alpha}{\alpha}$
$y_C$	$\frac{2}{3\pi} D$	$\frac{1}{3} h$	$\frac{h}{3} \cdot \frac{a+2b}{a+b}$	—

### Пример определения положения нейтральной линии балочного калибра

Для нахождения нейтральной линии балочного калибра (рис. 35) делят его сечение на фланцы и стенку. Ось  $x-x$  можно провести либо по оси стенки, либо по ее верхней (нижней) линии. Пусть эта ось проходит по нижней линии очертания стенки.

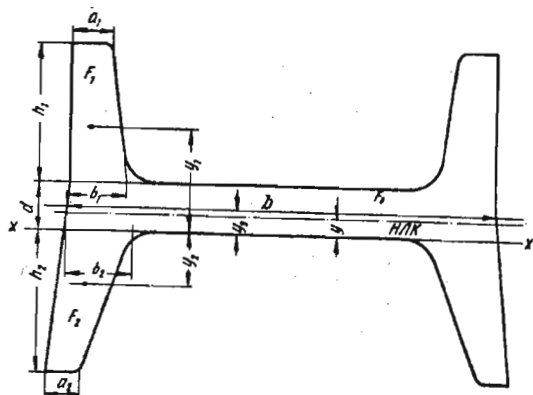


Рис. 35. Калибр двутавровой балки

Ордината нейтральной линии (НЛК) балочного калибра в данном случае определится по разности статических моментов элементов всей площади профиля, которую можно разделить на три части: на верхние

фланцы, стенку и нижние фланцы. Статические моменты каждого из элементов относительно оси  $x-x$  будут:

для двух верхних фланцев

$$M_1 = 2F_1y_1;$$

для двух нижних фланцев

$$M_2 = 2F_2y_2;$$

для стенки

$$M_3 = F_3y_3.$$

Ордината нейтральной линии калибра

$$y = \frac{M_1 - M_2 + M_3}{2F_1 + 2F_2 + F_3}.$$

Фланцы представляют собой трапеции, а стенка — прямоугольник. Площади этих фигур и ординаты их центров тяжести:

$$F_1 = \frac{a_1 + b_1}{2} h_1; \quad y_1 = d + \frac{h_1}{3} \left( \frac{2a_1 + b_1}{a_1 + b_1} \right);$$

$$F_2 = \frac{a_2 + b_2}{2} h_2; \quad y_2 = \frac{h_2}{3} \left( \frac{2a_2 + b_2}{a_2 + b_2} \right);$$

$$F_3 = bd; \quad y_3 = \frac{d}{2}.$$

Статические моменты:  
двух верхних фланцев

$$M_1 = h_1 \left[ d + \frac{h_1 (2a_1 + b_1)}{3 (a_1 + b_1)} \right] (a_1 + b_1);$$

двух нижних фланцев

$$M_2 = \frac{h_2^2}{3} (2a_2 + b_2);$$

стенки

$$M_3 = b \frac{d^2}{2}.$$

Ордината нейтральной линии калибра

$$y = \frac{h_1 (a_1 + b_1) \left[ d + \frac{h_1 (2a_1 + b_1)}{3 (a_1 + b_1)} \right] - \frac{h_2^2}{3} (2a_2 + b_2) + b \frac{d^2}{2}}{h_1 (a_1 + b_1) + h_2 (a_2 + b_2) + bd}.$$

Получили окончательное уравнение для определения положения нейтральной линии калибра. Оно составлено для удвоенных площадей верхнего и нижнего фланцев. Однако расчет можно вести и для одинарных площадей верхнего и нижнего фланцев. При данном способе расчета закруглениями элементов профиля пренебрегали, хотя их учет и не вызывает особых осложнений. Пренебрежение закруглениями сказывается на смещении нейтральной линии калибра лишь незначительно.

Другие методы определения положения нейтральной линии и практические примеры приведены в специальной литературе.

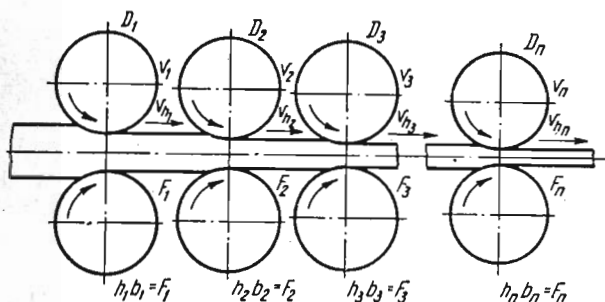
Роль нейтральной линии калибра исключительно важна. Если положение нейтральной линии найдено неправильно, то от этого могут

быть весьма серьезные последствия, характер которых зависит от степени отклонения расчетных данных от фактических. О правильном или неправильном нахождении нейтральной линии калибра можно судить по ряду внешних признаков: характеру выхода раската из клетки, износу рабочих поверхностей калибра, условиям работы выводной арматуры и т. д.

## 7. Принцип расчета калибровки непрерывных станов

Непрерывные станы характеризуются тем, что клетки их расположены последовательно, в каждой клетке осуществляется один проход и прокатываемый металл одновременно находится в нескольких клетях.

Большинство современных станов строят непрерывными или с отдельными непрерывными группами клеток в своем составе. Все непрерывные станы имеют высокие технико-экономические показатели.



Р и с. 36. Схема непрерывного процесса прокатки

Расчет калибровки и режимов обжатий для непрерывных станов или непрерывных групп клеток основан на равенстве объемов металла, проходящих в единицу времени через каждую клетку. Отклонение от этого правила в любой паре клеток ведет к образованию петли между клетями или к натяжению прокатываемого металла. Условие непрерывной прокатки можно записать в виде уравнения (рис. 36):

$$F_1 v_{h_1} = F_2 v_{h_2} = F_3 v_{h_3} = \dots = F_n v_{h_n} = \text{const},$$

где

$F$  — площадь поперечного сечения раската, выходящего из валков;

$v_h = v(1 + S)$  — скорость выхода раската из валков с учетом опережения  $S$ .

Выразив скорость выхода раската через окружную скорость валков как  $v = \frac{\pi D_{\kappa} n}{60}$  (здесь  $n$  — число их оборотов в минуту), получим

$$F_1 \frac{\pi D_{\kappa_1} n_1}{60} (1 + S_1) = F_2 \frac{\pi D_{\kappa_2} n_2}{60} (1 + S_2) = \dots = F_n \frac{\pi D_{\kappa_n} n_n}{60} (1 + S_n) = \text{const}.$$

Сократив части равенства на величину  $\frac{\pi}{60}$ , имеем

$$F_1 D_{\kappa_1} n_1 (1 + S_1) = F_2 D_{\kappa_2} n_2 (1 + S_2) = \dots = F_n D_{\kappa_n} n_n (1 + S_n) = \text{const}. \quad (37)$$

В общем виде последнее равенство можно записать

$$F_i D_{\kappa_i} n_i (1 + S_i) = \text{const} = C. \quad (38)$$

Это уравнение и выражает условие непрерывной прокатки.

Значение произведения  $F_i D_{\kappa_i} n_i (1 + S_i)$  по клетям принято называть *константой непрерывного стана*.

Уравнение (37) можно несколько упростить. Расчеты и практика показывают, что величины опережений по клетям для каждого типа стана примерно одинаковы.

Принимая

$$S_1 = S_2 = S_3 = \dots = S_n,$$

получаем уравнение (37) в виде

$$F_1 D_{\kappa_1} n_1 = F_2 D_{\kappa_2} n_2 = \dots = F_n D_{\kappa_n} n_n. \quad (39)$$

Константа непрерывного стана в общем виде выразится произведением

$$F_i D_{\kappa_i} n_i = C. \quad (40)$$

При расчетах режимов обжатий на непрерывных станах следует учитывать погрешности, которые вносятся из-за неучета опережения. Практически по этой причине между клетями стана получается петлеобразование, что нежелательно, так как изгибы петли могут привести в конечном счете к застреванию и обрыву раската. Во избежание этого на практике на непрерывных заготовочных станах и черновых клетях сортовых станов константы по клетям по ходу прокатки предусматривают увеличивающимися на 0,5—1,0%, т. е. принимают, что

$$\frac{C_2}{C_1} = \frac{C_3}{C_2} = \dots = \frac{C_n}{C_{n-1}} = 1,005 \div 1,01.$$

При прокатке же катанки и других профилей с малым сечением, особенно фасонных, желательно не иметь сплошного натяжения раската между всеми клетями.

Для процесса непрерывной прокатки широкой полосы и вообще для всех полосовых станов константа их может быть представлена иначе. Если в уравнении (39) площадь поперечного сечения раската заменить значениями его толщины и ширины, то, принимая

$$b_1 = b_2 = \dots = b_n = \text{const},$$

получаем

$$h_1 D_{\kappa_1} n_1 = h_2 D_{\kappa_2} n_2 = \dots = h_n D_{\kappa_n} n_n = C.$$

Если на стане используют валки одинакового диаметра, т. е. когда

$$D_{\kappa_1} = D_{\kappa_2} = \dots = D_{\kappa_n} = D,$$

что обычно характерно для клетей чистовых групп непрерывных полосовых станов горячей и холодной прокатки, то

$$h_1 n_1 = h_2 n_2 = \dots = h_n n_n = C.$$

Последним уравнением и пользуются на практике при настройке чистовых групп клетей непрерывных полосовых станов.

Если установленные на посту управления приборы градуированы на показание окружной скорости валков при прокатке, то уравнение константы можно представить в виде

$$h_1 v_1 = h_2 v_2 = \dots = h_n v_n = C.$$

Необходимо обратить внимание на особенность переточки валков непрерывных станов при групповом приводе. В этом случае в целях облегчения настройки стана руководствуются следующим правилом.

Номер  
клетки

I

II

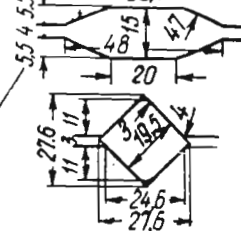
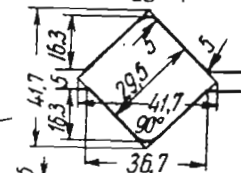
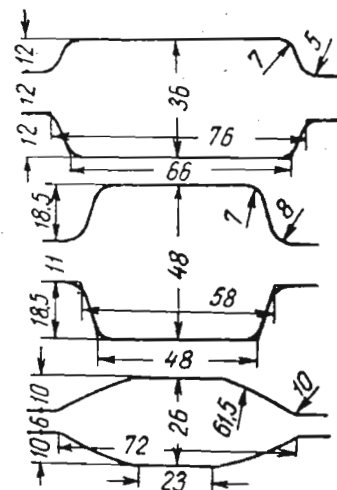
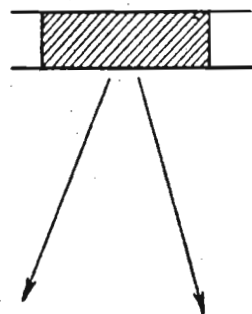
III

IV

V

VI

VII





Сначала из всего комплекта валков, не одинаковых по диаметру, находят измерением при помощи шаблона пару валков с наибольшим износом калибра. Затем перетачивают один валок этой пары до полного восстановления ручья и измеряют его новый диаметр по бурту. Далее определяют разность диаметров валка до ( $D_{\text{нач}}$ ) и после ( $D_{\text{пер}}$ ) переточки и коэффициент уменьшения его диаметра  $k$  при данной переточке:

$$\Delta D = D_{\text{нач}} - D_{\text{пер}}; \quad k = \frac{\Delta D}{D_{\text{нач}}}.$$

После этого по найденному значению  $k$  находят величины уменьшения диаметров на остальных валках всего комплекта по выражению

$$\Delta D_n = k D_{n \text{ нач}}.$$

Обычно прокатку на непрерывных станах ведут с применением натяжения прокатываемого металла между клетями и это значительно облегчает его деформацию.

Одна из трудностей настройки непрерывных станов и поддержания постоянной величины растягивающих напряжений в металле заключается в том, что опережение на выходе из валков растет с уменьшением толщины раската и поэтому не всегда при увеличении обжатия в данной клетке при прочих равных условиях будет увеличиваться натяжение между данной и последующей клетями. Знание точной величины опережения по клетям непрерывного стана облегчает его настройку и позволяет получить качественный профиль.

## 8. Схема расчета калибровки. Составление общей схемы калибровки с учетом всего сортамента и типа стана

Под схемой расчета калибровки понимают порядок определения последовательного ряда переходных сечений прокатываемого профиля. В настоящее время принято вести расчеты по двум схемам: по ходу прокатки (от заготовки до конечного профиля) и против хода прокатки (от конечного профиля к заготовке).

Для простейших профилей (квадратного, круглого, полосового и др.) расчет можно вести по ходу прокатки и против хода прокатки. Однако фланцевые и сложные профили, например балки, швеллеры, рельсы, угловую сталь, рассчитывают только против хода прокатки.

Выбор схемы расчета зависит не только от сложности сечения профиля, но и от того, имеется ли для данного профиля исходная заготовка с заданными размерами применительно к данному стану.

При расчете против хода прокатки представляется возможным более правильно подойти к вопросам распределения коэффициентов деформации по проходам как с точки зрения получения элементов переходных сечений, так и с точки зрения нагрузок на оборудование и двигатели. Кроме того, при расчете по этому способу калибров для фланцевых профилей (балок, швеллеров) размеры исходной заготовки определяются точнее. Это особенно важно в тех случаях, когда предстоит освоение новых профилей.

Если вести расчет калибровки нового профиля по ходу прокатки, т. е. исходя из имеющейся заготовки, то за один прием трудно решить все вопросы, определяющие нормальный технологический процесс прокатки. Может получиться так, что проходы, близкие к проходу через чистовой калибр, будут иметь завышенные коэффициенты деформации, не согласующиеся с температурным режимом прокатки.

Поэтому приходится неоднократно корректировать коэффициенты деформации по проходам. Однако при известной исходной заготовке не всякая корректировка допустима и может быть оправдана.

Практика показывает, что во всех переходных калибрах необходимо иметь оптимальные коэффициенты деформации, характерные для данного сечения. Превышение их вызывает трудности в процессе прокатки. В каждой смежной паре переходных калибров в свою очередь имеется определенная закономерность соотношения между коэффициентами деформации отдельных элементов, определяющая конфигурацию последних и получение устойчивых размеров сечений.

Схема расчета против хода прокатки в большинстве случаев исключает повторные расчеты по определению размеров переходных сечений. Некоторое несоответствие между размерами исходной заготовки и размерами первых от нее переходных сечений легко устраняется небольшим перерасчетом.

Расчет против хода прокатки ускоряет решение задачи о размерах исходной заготовки. Обычно эта задача вызывает затруднения при ограниченном числе имеющихся заготовок.

В том случае, когда калибровку нового профиля рассчитывают применительно к условиям имеющегося сортамента стана, определяют размеры и формы переходных сечений по отдельным группам клеток. При этом за основу почти всегда принимают чистовой калибр и два предчистовых калибра.

При расчете калибровки для простых профилей (круга, квадрата, полосы) способ расчета по группам клеток вполне приемлем.

Для какого-либо данного профиля наиболее просто можно рассчитать калибры тогда, когда нет необходимости учитывать схемы калибровок других профилей, прокатываемых на том же стане. Однако независимость новой схемы калибровки от схем для других профилей заставляет в каждом случае иметь отдельную исходную заготовку определенных размеров. Поэтому такой способ калибровки на практике не пригоден.

Обычно предусматривают для всего сортамента лишь ограниченное количество (2—5) исходных заготовок и ведут все расчеты, считаясь с этим условием.

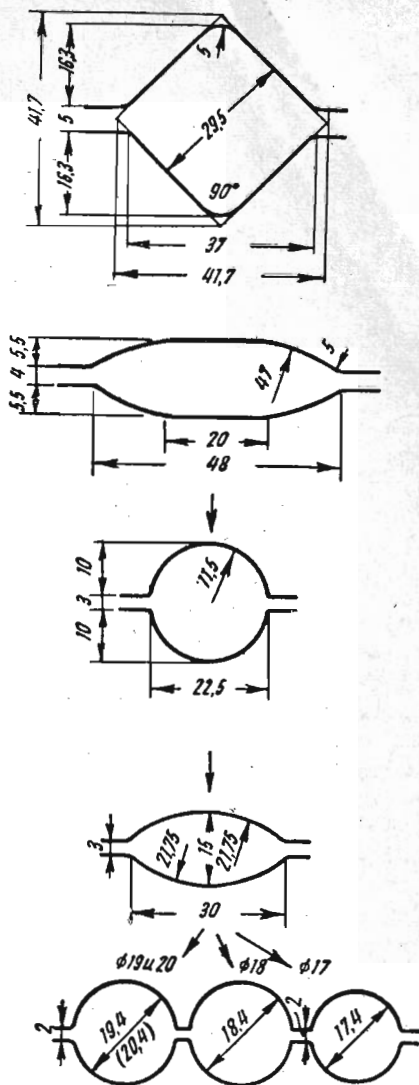


Рис. 38. Схема калибровки круглой стали diam. 17—20 мм с применением универсального овала

Номер  
клетей  
I

II

III

IV

V

VI

VII

VIII

IX

X

XI

XII

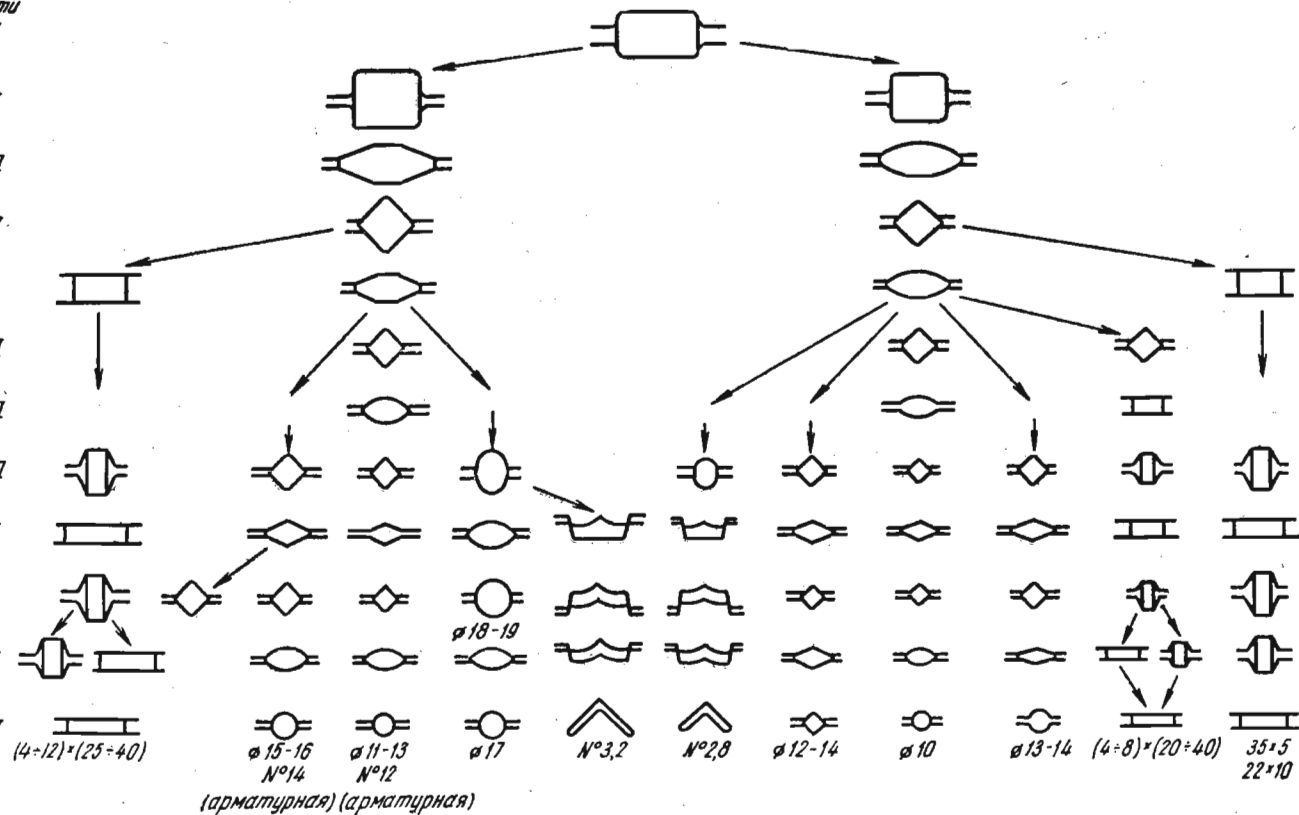


Рис. 39. Принципиальная схема калибровки валков мелкосортного стана

Как правило, весь сортамент прокатного стана подразделяют на отдельные группы. В группу входят профили, близкие друг к другу по площадям поперечного сечения. Каждую группу профилей прокатывают из определенной исходной заготовки.

Таким образом, если рассматривать общую схему прокатки металла одной группы, то будем иметь следующую последовательность расположения калибров: ряд общих калибров для всей группы профилей; общие калибры для отдельных подгрупп и, наконец, самостоятельные калибры. Однако для фланцевых профилей часто приходится иметь самостоятельными даже целые схемы калибровки от первого прохода до последнего.

При расчетах калибровок по отдельным профилям необходимо стремиться к максимально возможной общности калибровок для профилей ряда смежных размеров.

На рис. 37 приведена характерная общая схема калибровки для различных профилей на мелкосортном стане 250. Вначале почти для всего сортамента стана черновая группа клетей (I—VI) имеет одну общую схему, которая далее делится на подгруппы, имеющие самостоятельные линии.

Приведение частных схем калибровок к одной схеме, общей для всего сортамента стана, вызывает необходимость корректировать режимы обжати, а соответственно и размеры черновых калибров. Возможность изменения размеров черновых калибров делает их пригодными для различных профилей.

Калибры, общие при прокатке нескольких профилей, называются *универсальными*. Например, такие калибры имеют форму овала<sup>1</sup>, используемого для получения близких по размеру круглых профилей (рис. 38).

На практике стремятся иметь наименьшее число различающихся калибров на каждый проход всего сортамента стана. Как правило, схему калибровки и прокатки профилей всего сортамента составляют так, чтобы в ней было как можно больше общих калибров для каждого прохода. Подобная схема также называется универсальной.

Как видно из схемы (рис. 39) весь сортамент стана, который весьма широк, разделен на две самостоятельные группы. В одной группе прокатывают профили больших сечений, а во второй — малых.

Наибольшую универсальность калибровок имеют узкоспециализированные станы, например, полосовые, проволочные.

Крупносортные станы в большинстве случаев характеризуются широким сортаментом. Поэтому создать строго универсальную схему калибровки для таких станов затруднительно. Однако и в этом случае калибровка должна быть составлена с максимальной универсальностью для отдельных групп профилей.

Рельсобалочные станы среди других прокатных агрегатов выделяют в особую группу, так как в основном они предназначены для несколько ограниченного сортамента балок, швеллеров, рельсов, угловой стали и некоторых других профилей больших размеров. Практически для каждого профиля на этих станах требуется своя исходная заготовка, хотя собственно схема прокатки для целой группы профилеразмеров может и не иметь принципиального различия.

---

<sup>1</sup> Универсальный предчистовой овал впервые предложен В. Д. Семковым.

## Часть вторая

# СИСТЕМЫ ВЫТЯЖНЫХ И ЧЕРНОВЫХ КАЛИБРОВ

---

### Глава III

## СИСТЕМА ПРЯМОУГОЛЬНЫХ (ЯЩИЧНЫХ) КАЛИБРОВ

Система ящичных калибров на современных прокатных станах получила наибольшее распространение. Прокатку слитков на блюмингах, а затем блюмов в заготовку на заготовочных станах осуществляют главным образом в ящичных калибрах. Исключение могут составлять только калибры последних двух проходов заготовочных станов, где может быть применена система калибров ромб — квадрат. На черновых группах клетей сортовых станов всех типов также получила широкое применение система ящичных калибров прямоугольник — ящичный квадрат.

Если рассматривать характер деформации металла в ящичных калибрах, то он во многом аналогичен характеру деформации металла на валках с гладкой бочкой — на слябинге и станах для прокатки полос. Прокатку на валках с гладкой бочкой можно рассматривать как частный случай прокатки в ящичных калибрах со свободным уширением. Поэтому в расчетах режимов обжатий на блюминге и слябинге очень много общего. Принципиальное различие в методах расчета режимов обжатий и калибровке будет отмечаться в конкретных случаях.

### 1. Калибровка блюмингов

Под калибровкой блюминга, как уже говорилось выше, можно понимать метод определения режимов обжатий и числа проходов, составление схем прокатки слитков и расположение калибров на валках.

В настоящее время в отечественной металлургии работают блюминги двух типов: одноклетевые и двухклетевые. Для одноклетевых блюмингов общее число проходов при прокатке слитков должно быть, как правило, нечетным, для двухклетевых — четным.

Сечение исходных слитков для одноклетевых блюмингов обычно прямоугольное с разницей сторон, примерно равной средней величине обжатия за один проход. Из слитков прокатывают блюмы квадратного или близкого к квадратному сечения; в направлении большей стороны сечения слиток обжимают на один проход больше.

Для двухклетевых блюмингов целесообразно применять слитки квадратного сечения, так как на этих станах осуществляют в сумме четное число проходов, чему соответствует одинаковое число проходов, приходящихся на каждую сторону. Режимы обжатий для двухклетевого блюминга рассчитывают, как и для одноклетевого блюминга, отдельно для каждой клетки. При этом учитывают возможность передачи раската

с первой клетки во вторую, если первая не успевает по каким-либо причинам прокатывать слиток за определенное время.

Рассмотрим метод расчета режимов обжатий применительно к одно-клетевому блюмингу. Принимая общее число проходов, необходимое для прокатки слитка  $n$ , среднюю величину обжатия за один проход  $\Delta h_{\text{ср}}$ , можно составить следующее уравнение зависимости указанных величин от начальных размеров сечения слитка  $H$  и  $B$  и конечных размеров бляма  $h$  и  $b$  (рис. 40). Полагая, что по одной стороне сечения слитка число проходов будет на единицу больше, чем по другой стороне, получаем

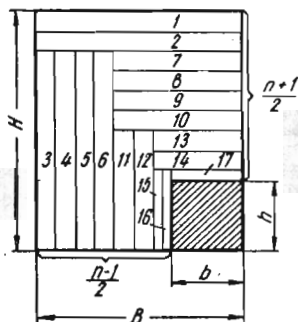
$$\frac{n-1}{2} \Delta h_{\text{ср}} + \frac{n+1}{2} \Delta h_{\text{ср}} = n \Delta h_{\text{ср}} = (H - h) + (B - b) + \Sigma \Delta b_H + \Sigma \Delta b_B,$$

где

$\Sigma \Delta b_H$  — суммарное уширение, получающееся по высоте (толщине) слитка при обжатии его в направлении ширины;

$\Sigma \Delta b_B$  — суммарное уширение, получающееся по ширине слитка при обжатии его в направлении высоты.

Рис. 40. Схема чередования проходов при обжатии слитка прямоугольного сечения в блюме. Числами обозначены номера проходов



Как известно, при прокатке слитков на блюминге в первых проходах происходит неравномерная деформация металла по высоте сечения. Поэтому следует рассматривать уширение слитка дифференцированно: у контактной поверхности и по середине высоты. Однако на практике при расчетах в порядке приближения часто пользуются простой зависимостью между обжатием и уширением

$$\Delta b = k \Delta h, \quad (41)$$

где  $k$  — показатель уширения.

Для условий прокатки слитка на блюминге принимают среднее значение показателя  $k=0,15$ .

Тогда суммарные уширения:

$$\Sigma \Delta b_H = 0,15 (B - b); \quad \Sigma \Delta b_B = 0,15 (H - h).$$

Общее уравнение примет вид

$$n \Delta h_{\text{ср}} = (H - h) + (B - b) + 0,15 (B - b) + 0,15 (H - h).$$

После преобразования окончательно получим

$$n \Delta h_{\text{ср}} = 1,15 [(H - h) + (B - b)]. \quad (42)$$

Уравнение (42) связывает основные технологические величины при прокатке слитка на блюминге: число проходов, среднюю величину обжатия за проход, размеры начального сечения слитка и размеры сечения получаемого бляма. Так как среднюю величину обжатия за проход

сразу определить затруднительно, рекомендуется следующая методика дальнейшего решения задачи по определению режима обжатия слитка.

Определяют максимальную величину обжатия за один проход по уравнениям (14) и (16), исходя из предельных условий захвата. Найденную максимальную величину обжатия подставляют в уравнение (42) и таким образом определяют минимальное число проходов. Если получается целое четное или дробное число проходов, то его увеличивают до ближайшего целого нечетного числа. Вторично подставляя вновь полученное число проходов в уравнение (42), определяют среднюю величину обжатия за один проход.

Минимальное число проходов

$$n_{\min} = \frac{1,15 [(H-h) + (B-b)]}{\Delta h_{\max}} = \frac{1,15 [(H-h) + (B-b)]}{0,77 f^2 R_k} \approx \frac{1,5 [(H-h) + (B-b)]}{f^2 R_k}, \quad (43)$$

где  $R_k$  — катающий радиус.

Для данного уравнения коэффициент трения определяют аналитически. Величины, входящие в числитель, известны. Вопрос о значении катающего радиуса  $R_k$  решают следующим образом. На отечественных блюмингах с валками диаметром бочки 1150 мм при прокатке блюмов прямоугольного и квадратного сечений первый калибр имеет высоту 200—205 мм при зазоре 15 мм. Следовательно, катающий диаметр новых валков для данного сортамента примерно составляет

$$D_k = 1150 - (205 - 15) = 960 \text{ мм.}$$

Уменьшение диаметра при этом будет  $\Delta D = 0,165 D_0$ .

Эту величину принимают в примерах расчетов при определении обжатия в каждом проходе. Но если в сортament блюминга входят как блюмы, так и слябы, то тогда высоту первого калибра принимают исходя из минимальной толщины прокатываемых слябов; на отечественных блюмингах с таким сортamentом высоту первого калибра принимают равной 80—100 мм при зазоре 15 мм. В этом случае за расчетный диаметр для новых валков следует принимать

$$D_k = 1150 - (80 \div 100) + 15 = 1085 \div 1065 \text{ мм.}$$

Если же основную часть сортамента блюминга составляют слябы (более 50%), то первый калибр может быть принят в виде гладкой бочки, тогда  $D_k = 1150 \text{ мм}$ .

Полученное значение числа проходов по формуле (43) увеличивают с доведением его до ближайшего целого нечетного числа  $n$ . Затем окончательно получают среднюю величину обжатия за один проход:

$$\Delta h_{\text{ср}} = \frac{1,15 [(H-h) + (B-b)]}{n}. \quad (44)$$

После определения  $\Delta h_{\text{ср}}$  и  $n$  составляют схему прокатки слитка с указанием в ней последовательности задачи (по какой стороне сечения начинается обжатие слитка) и места кантовок раската между проходами. На блюмингах в настоящее время прокатывают слитки средним сечением примерно 740×740, 760×760, 760×680 мм в блюмы сечением 250×250 ÷ 350×350 мм и больше; число проходов  $n$  при этом в среднем равно 13 ÷ 15. Поэтому возможны разные схемы прокатки слитков, отличающиеся между собой распределением обжатий и числом кантовок между проходами. Кантовку раската относительно его продольной оси, как правило, производят на передней стороне блюминга (перед станом), т. е. после четных проходов.

С точки зрения качества металла слитки целесообразнее всего прокатывать по схеме с кантовкой после каждого двух проходов (кантовку обозначим знаком умножения).

#### 2.2.2.2.2.2.1.

Но такие схемы на практике обычно не применяют. Дело в том, что при первых кантовках слитков (раскат) приходится отводить далеко от валков, так как первый крюк кантователя расположен на сравнительно большом расстоянии от валков и при этом получается значительная пауза. Следует иметь в виду, что в первых двух — четырех проходах происходит уплотнение литой структуры металла в слитке, поэтому при обжатиях в этих проходах слиток почти не удлиняется. Таким образом, первая схема оказывается чрезвычайно непроизводительной.

Второй схемой может быть

#### 4.4.4.1.

В данной схеме число кантовок уменьшается в два раза и с этой точки зрения она является желательной. Но такая схема может быть рекомендована только в случае, если ставится задача получения блюмов прямоугольного сечения, так как числа обжатий по сторонам существенно различны; по одной стороне 8 проходов, по другой 5 проходов. Кроме того, при прокатке раската после второй кантовки могут получаться большие наплывы металла у контактной поверхности раската вследствие неравномерной деформации; эти наплывы снимаются в последнем проходе с известными трудностями. Поэтому приведенная схема не получила большого распространения на практике.

Третьей схемой может быть

#### 4.4.2.2.1.

В данном случае в сравнении с первой схемой число кантовок уменьшается на две. Четыре прохода между кантовками по каждой стороне слитка в начале прокатки вполне приемлемы. Далее кантовка осуществляется после каждого двух проходов, что является также положительной стороной схемы. Таким образом, третья схема может считаться одной из оптимальных.

Согласно принятой схеме прокатки составляют таблицу обжатий по проходам с учетом уширения. При составлении этой таблицы обжатия в каждом проходе принимают примерно равными найденному  $\Delta h_{\text{ср}}$ ; их можно несколько изменять в ту и другую сторону в зависимости от общего распределения обжатий по всем проходам. Необходимо стремиться к тому, чтобы величины обжатий были в виде целых чисел, кратных пяти, так как это удобно для работы операторов: легче запоминаются схема прокатки и принятые обжатия.

Величину уширения вначале ориентировочно определяют по зависимости (41). Затем эту величину корректируют.

На практике уширение в первых (двух — четырех) проходах принимают равным нулю, в последующих двух — трех проходах — примерно по 5 мм, во всех остальных — по 10 мм. Если при этом и будет допущено некоторое увеличение уширения в сравнении с действительным, то это не скажется на процессе прокатки и условиях захвата.

На основании составленной схемы прокатки и принятых режимов обжатий в ней по размерам переходных сечений определяют число необходимых калибров и их размеры. При этом необходимо учесть следующее. Если на данном блюминге предполагают прокатывать слитки нескольких размеров по сечению, то вначале следует составить схемы

прокатки и таблицы режимов обжатий для всех сечений, а затем определить число и размеры калибров с учетом возможности прокатки в них любого из слитков.

*Пример расчета обжатий на блюминге.*

**Исходные данные.** Имеется слиток высококачественной стали сечением  $740 \times 740$  мм. Необходимо его прокатать на блюминге с валками диаметром по буртам  $D=1150$  мм в блюм квадратного сечения  $250 \times 250$  мм. Валки стальные.

Принимаем начальную температуру прокатки слитка  $t_n=1200^\circ\text{C}$ , а температуру конца прокатки  $t_k=1050^\circ\text{C}$ .

Определяем коэффициент трения  $f$  при средней температуре прокатки

$$t_{\text{ср}} = \frac{t_n + t_k}{2} = \frac{1200 + 1050}{2} = 1125^\circ\text{C}.$$

Тогда

$$f = 1,05 - 0,0005 t_{\text{ср}} = 1,05 - 0,0005 \cdot 1125 = 0,487.$$

Принимаем катающий диаметр валков  $D_k=960$  мм.

Максимальное обжатие за проход согласно формуле (16)

$$\Delta h_{\text{макс}} = 0,77 \cdot 0,487^2 \cdot 480 = 88 \text{ мм}.$$

При определении числа проходов полученное  $\Delta h_{\text{макс}}$  следует принимать с коэффициентом  $0,8 \div 0,9$ . В данном случае прокатывается высококачественная сталь, поэтому берем минимальное значение коэффициента, т. е.  $0,8$ .

Число проходов

$$n = \frac{1,15 [(H - h) + (B - b)]}{0,8 \Delta h_{\text{макс}}} = \frac{1,15 [(740 - 250) + (740 - 250)]}{0,8 \cdot 88} = 16.$$

Увеличиваем полученный результат до ближайшего целого нечетного числа и получаем  $n=17$ .

Средняя величина обжатия в каждом проходе

$$\Delta h_{\text{ср}} = \frac{1,15 \cdot 2 \cdot (740 - 250)}{17} = 66 \text{ мм}.$$

Принимаем схему прокатки. В связи с тем, что прокатывается слиток квадратного сечения, а сталь высококачественная, можно принять схему

$$2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 1.$$

Однако после шести проходов можно изменить схему, так как при этом металл уплотнится, и его литая структура будет разрушена. Поэтому с целью уменьшения числа кантовок несколько видоизменим схему:

$$2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 4 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 1.$$

На основании этой схемы после некоторой ее корректировки составляем таблицу обжатий (табл. 5).

Вычерчиваем калибры на валках. С учетом возможности прокатки слэбов на данном блюминге вносим изменение в построение первого калибра — уменьшаем его высоту; для ребровых обжатий слэбов предусматриваем V калибр.

Калибровка валков показана на рис. 41.

При составлении каждой схемы прокатки необходимо обращать внимание на размеры переходных сечений в первых десяти проходах и прежде всего — на ширину раскатов. В данной схеме (табл. 5) максимальная ширина раската  $b_{\text{макс}} = 740$  мм, минимальная  $b_{\text{мин}} = 525$  мм. По-видимому, первые проходы и обжатия можно осуществить в первом калибре, определяющей шириной которого будет 740 мм. Определяю-

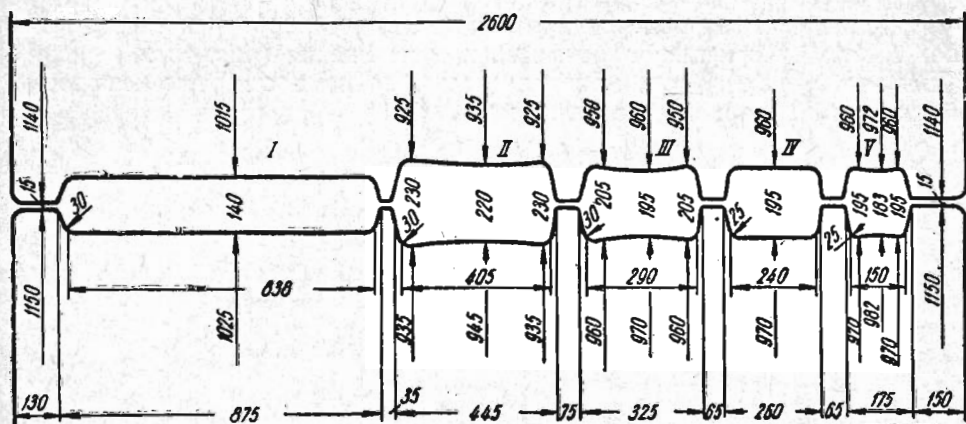


Рис. 41. Калибровка валков блюминга:

I—V — номера калибров

Таблица 5

Прокатка слитков высококачественных сталей сечением  $740 \times 740$  мм  
за 17 проходов в блюмы сечением  $250 \times 250$  мм

Номер прохода	Сечение $h \times b$ , мм	$\Delta h$ , мм	$\Delta b$ , мм	Номер калибра
1	670 $\times$ 740	70	0	I
2	620 $\times$ 740	50	0	
3	Кантовка 675 $\times$ 627	65	7	
4	625 $\times$ 635	50	8	
5	Кантовка 575 $\times$ 635	60	10	
6	515 $\times$ 645	60	10	
7	Кантовка 590 $\times$ 525	55	10	
8	530 $\times$ 535	60	10	
9	470 $\times$ 545	60	10	
10	410 $\times$ 555	60	10	
11	Кантовка 475 $\times$ 420	80	10	II
12	390 $\times$ 430	85	10	
13	Кантовка 350 $\times$ 400	80	10	
14	280 $\times$ 410	70	10	
15	Кантовка 325 $\times$ 295	85	15	III
16	240 $\times$ 310	85	15	
17	Кантовка 250 $\times$ 250	60	10	IV

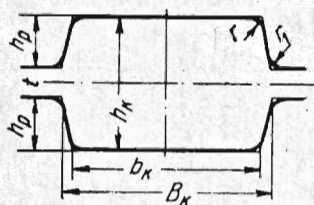
шей высоту первого калибра будет минимальная толщина раската, выпускаемого в последнем проходе из этого же калибра. На основании полученных данных конструируем первый калибр. Аналогичный подход должен быть и при определении размеров остальных калибров.

### Построение прямоугольных (ящичных) калибров

При определении размеров прямоугольных калибров рекомендуется использовать следующие зависимости и соотношения (рис. 42).

Ширина  $b_k$  по дну ручья определяется в зависимости от максимальной ширины  $b$  задаваемого в валки металла:

$$b_k = (0,95 \div 1,0) b.$$



Р и с. 42. Элементы ящичного калибра

Ширина калибра в месте разъема валков

$$B_k = b + (1,25 \div 1,75) \Delta b,$$

где  $\Delta b$  — свободное уширение.

Величину коэффициента при  $\Delta b$  принимают тем большей чем больше размер раската.

Радиусы закругления углов:

$$r = (0,22 \div 0,25) h_p; \quad r_1 = (0,8 \div 1,0) r.$$

Глубина ручья  $h_p$  зависит от обжатия, принятого в данном калибре, и условий прокатки профиля. Исходя из проведенных исследований устойчивости раската при его обжатии\*, глубину вреза ящичного ручья можно рекомендовать следующей.

При всех случаях прокатки прямоугольных профилей, когда отношение их высоты к ширине  $\frac{h}{b} < 1,2$  (т. е. профилей, близких к квадратным),  $h_p = 0$ ; профили прямоугольного сечения (полосы) можно прокатывать на валках с гладкой бочкой.

Если прокатывают профили со сравнительно малым соотношением сторон  $\left(\frac{h}{b} < 1,25 \div 1,3\right)$  и при этом надо удерживать металл калибром, то

$$h_p = (0,2 \div 0,3) h,$$

где  $h$  — высота раската после прокатки.

При прокатке профилей с большим соотношением сторон  $\left(\frac{h}{b} > 1,25 \div 1,3\right)$ , а также с учетом возможности прокатки профилей

\* Новейшими результатами проведенных исследований показана большая устойчивость раската при прокатке.

примерно одинаковой ширины, но разной высоты, что требует многократной установки валков по вертикали (блюминги),

$$h_p = (0,35 \div 0,45) h_{\min},$$

где  $h_{\min}$  — минимальная высота раската, выходящего из данного калибра.

Если прокатывают профили с большим соотношением высоты к ширине ( $\frac{h}{b} > 2$ ) и при этом не производят значительную регулировку положения валков (черновые группы клетей сортовых станов),

$$h_p = \frac{h_k - t}{2},$$

где  $h_k$  — общая высота калибра;  
 $t$  — зазор между валками.

Зазор между валками рекомендуется принимать в зависимости от диаметра валков:

$$t = (0,02 \div 0,08) D.$$

Чем больше диаметр бочки валков, тем меньшее значение коэффициента принимают в расчетах.

Приведенные соотношения размеров прямоугольных калибров приемлемы для калибровки валков черновых клетей сортовых и заготовочных станов. Выпуск боковых сторон ящичных калибров при указанных размерах и зависимостях элементов калибра составляет 10—20%. В ряде случаев приходится принимать выпуски в ящичных калибрах до 40÷45%.

Калибр строят следующим образом. Вначале определяют ширину калибра по дну  $b_k$ , а затем — по известной величине глубины ручья  $h_p$  ширину его  $B_k$  в месте разъема валков; выпуск калибра принимают в соответствии с уширением раската и условиями деформации его в калибре.

#### *Расположение калибров на валках блюминга*

Существуют три способа расположения калибров на бочке валков блюминга:

1) калибры расположены последовательно по длине бочки от первого до последнего. Глубина вреза ручьев всех калибров большая (так называемый европейский способ);

2) первый калибр расположен посередине валка и представляет собой гладкую широкую бочку. Остальные ящичные калибры расположены по обе стороны от первого калибра (так называемый американский способ);

3) калибры расположены последовательно. Все калибры и особенно первый имеют небольшую высоту. Первый калибр широкий. Этот способ расположения калибров впервые предложен и получил широкое распространение на наших заводах.

Преимуществами первого способа расположения калибров является обеспечение устойчивого положения раската в валках. Передача раската из калибра в калибр совершается при минимальном времени пауз, что способствует повышению производительности блюминга. Недостатками этого способа являются: ослабление прочности бочки валков и ухудшение условий захвата в связи с глубокими врезами ручьев, сокращение общего срока службы валков, невозможность прокатки слябов. Максимальное давление при таком расположении калибров приходится

на подшипник, находящийся со стороны расположения первого калибра, что вызывает преждевременный износ этого подшипника. К тому же на этот подшипник часто попадает окалина. Такой способ калибровки валков на отечественных блюмингах не применяют.

Преимуществами второго способа расположения калибров являются более равномерное распределение давления на подшипники, следовательно, сравнительно равномерный износ их; отделяющаяся окалина в меньшей мере попадает на подшипники, поэтому увеличивается срок их службы; увеличенный диаметр первого калибра способствует улучшению захвата металла валками. Однако передача раската из калибра в калибр связана с увеличением времени паузы, что снижает производительность блюминга. Этот способ нашел применение на наших блюмингах в связи с возможностью прокатки слябов в первом калибре.

Преимуществом третьего способа является то, что калибры расположены по ходу прокатки; это дает экономию во времени и повышает производительность блюминга. На рис. 43 и 44 показаны калибровки валков блюмингов по второму (видоизмененному) и третьему способам. Калибровка валков одного из отечественных блюмингов, прокатывающего вместе с блюмами и большое количество слябов, показана на рис. 45. В этом случае, являющемся разновидностью третьего способа калибровки, особенно заметна малая глубина вреза первого калибра.

*Размеры буртов и форма дна ящичных калибров.* Крайние бурты на валках принимают шириной 100—200 мм; чем больше их ширина, тем меньше вероятность попадания окалина на подшипники.

Ширину бурта между калибрами определяют, исходя из условий его прочности. Обычно между двумя смежными калибрами ширину бурта принимают не меньше максимальной глубины вреза одного из ручьев.

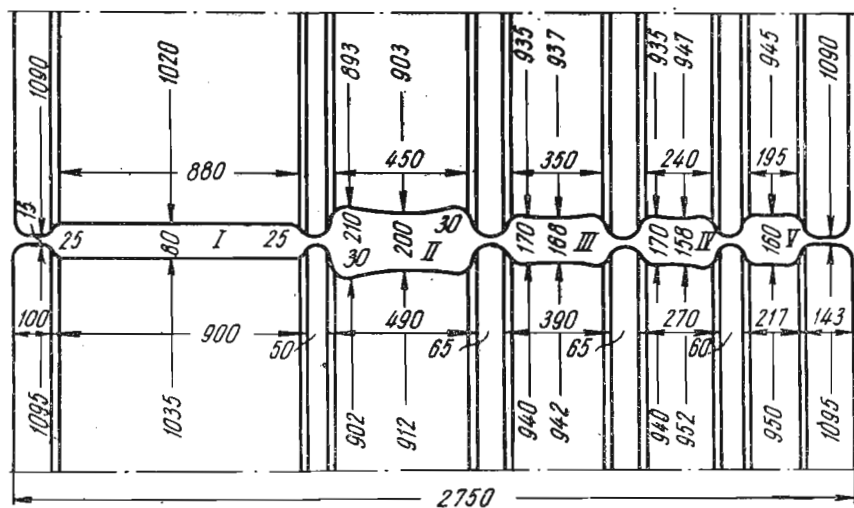
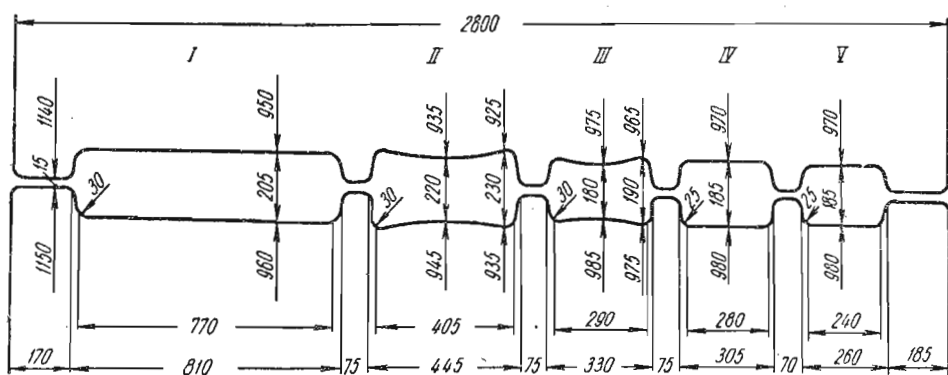
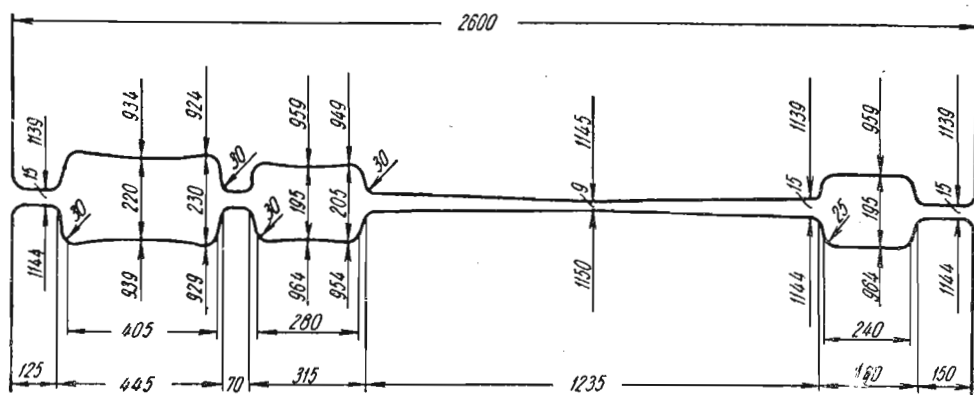
При ширине раската менее 400 мм и большой его высоте он неустойчив на роликах раскатных рольгангов. Для придания раскату устойчивости при движении по рольгангу предусматривают в ящичных калибрах (за исключением первого и последних) выпуклость дна, определяемую как разность диаметров по крайним и средней точкам этого дна величиной порядка 10 мм. Благодаря такой выпуклости уменьшаются, кроме того, удары раската о валки при захвате, так как соприкосновение металла с валками происходит не по всей ширине калибра одновременно. Выпуклость дна обеспечивает также простор для уширения в последующем калибре после кантовки раската.

При втором способе калибровки первый калибр (см. рис. 43) имеет выпуклость 4—6 мм. В этом случае выпуклость увеличивает срок службы первого калибра, который наиболее загружен.

## 2. Расчет режимов обжатий на слябинге

При прокатке слитков на слябинге осуществляют и высотную, и поперечную деформацию. Поэтому в этом случае определение режимов обжатий сводится к расчетам высотной деформации в горизонтальных валках и поперечной деформации в вертикальных валках. Абсолютные обжатия в горизонтальных валках можно определять по одному из методов, рассмотренных во II главе. Наибольшее применение получили методы расчета режимов обжатий по предельным условиям захвата (в первых проходах), по прочности прокатных валков (проверка по максимальному давлению металла на валки) и мощности электродвигателя.

Обжатия в вертикальных валках незначительны и главным образом имеют целью обработку боковых сторон раската. Эти обжатия ограни-



чиваются возможностью установки и мощностью привода валков. При расчете обжатий на слябингах необходимо стремиться к тому, чтобы обжатия в вертикальных валках были не меньше уширения раската в горизонтальных валках.

Уширение по высоте слитка при обжатии горизонтальными валками неравномерно, особенно в первых проходах. Его ориентировочно можно определять по одной из приведенных ранее формул, например Б. П. Бахтинова, С. И. Губкина. В этих формулах не учитывается неравномерность деформации по высоте раската, но получаемые по ним значения можно считать оправданными для всех последующих расчетов.

Валки слябинга как горизонтальные, так и вертикальные делают гладкими, без калибров.

В ряде случаев на слябинге первые два прохода при прокатке слитков прямоугольного сечения осуществляют в горизонтальных валках в положении на ребро. Цель таких обжатий — устранение конусности слитка, удаление окалина с его больших граней и получение заданной ширины раската.

Схему обжатий на слябинге составляют по полученным расчетным величинам абсолютных обжатий по проходам. Ширина раската определяется положением вертикальных валков слябинга.

### 3. Определение длины раската при прокатке на блюминге и слябинге

При определении машинного времени и производительности блюминга или слябинга важно знать длину раската  $l$  по проходам. Расчет этой длины удобнее вести против хода прокатки. Массу слитка приравнивают массе раската конечного сечения

$$G = \gamma h b l;$$

откуда

$$l = \frac{G}{\gamma h b},$$

где  $h$  и  $b$  — высота и ширина раската в данном проходе;  
 $\gamma$  — удельный вес стали.

Расчет против хода прокатки надо вести до тех пор, пока расчетная длина не будет равна длине исходного слитка. Во всех остальных проходах длину раската принимают равной длине слитка. Это вызвано тем, что в первых проходах происходит уплотнение литой структуры слитка и длина его не увеличивается. Практика подтвердила правильность данной методики определения длины раската как на блюминге, так и на слябинге.

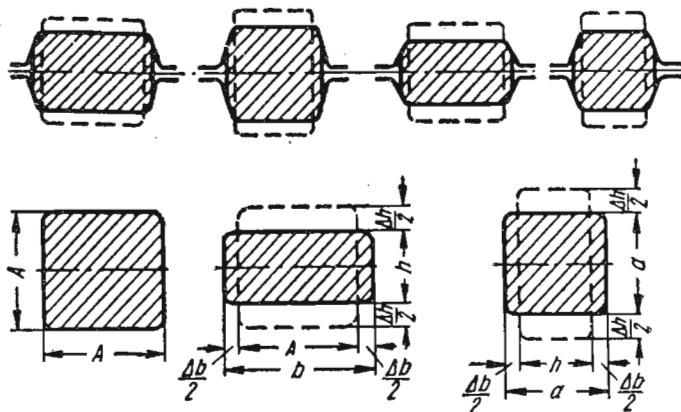
### 4. Калибровка заготовочных станов и черновых клетей сортовых станов

В настоящее время на заготовочных станах и в черновых клетях сортовых станов, в том числе мелкосортных и проволочных, наибольшее распространение получила система калибров прямоугольник — ящичный квадрат (рис. 46). Эта система может применяться при минимальном размере квадратного раската в переходном сечении со стороной 26—28 мм (рис. 47), если не требуется получение профиля точного квадратного сечения.

Разновидностью системы калибров прямоугольник — ящичный квадрат является система гладкая бочка — ящичный квадрат. Замена ящич-

ного калибра гладкой бочкой возможна тогда, когда обеспечивается устойчивое положение раската в валках в процессе обжатия и не происходит скручивание его относительно продольной оси.

Система прямоугольник — ящичный квадрат имеет следующие преимущества: равномерность деформации металла по ширине в каждом калибре; постоянство глубины вреза ручьев на бочке валка; хорошее отслаивание окалины с боковых граней раската, простота конструкции валковой арматуры, ее установки и настройки.



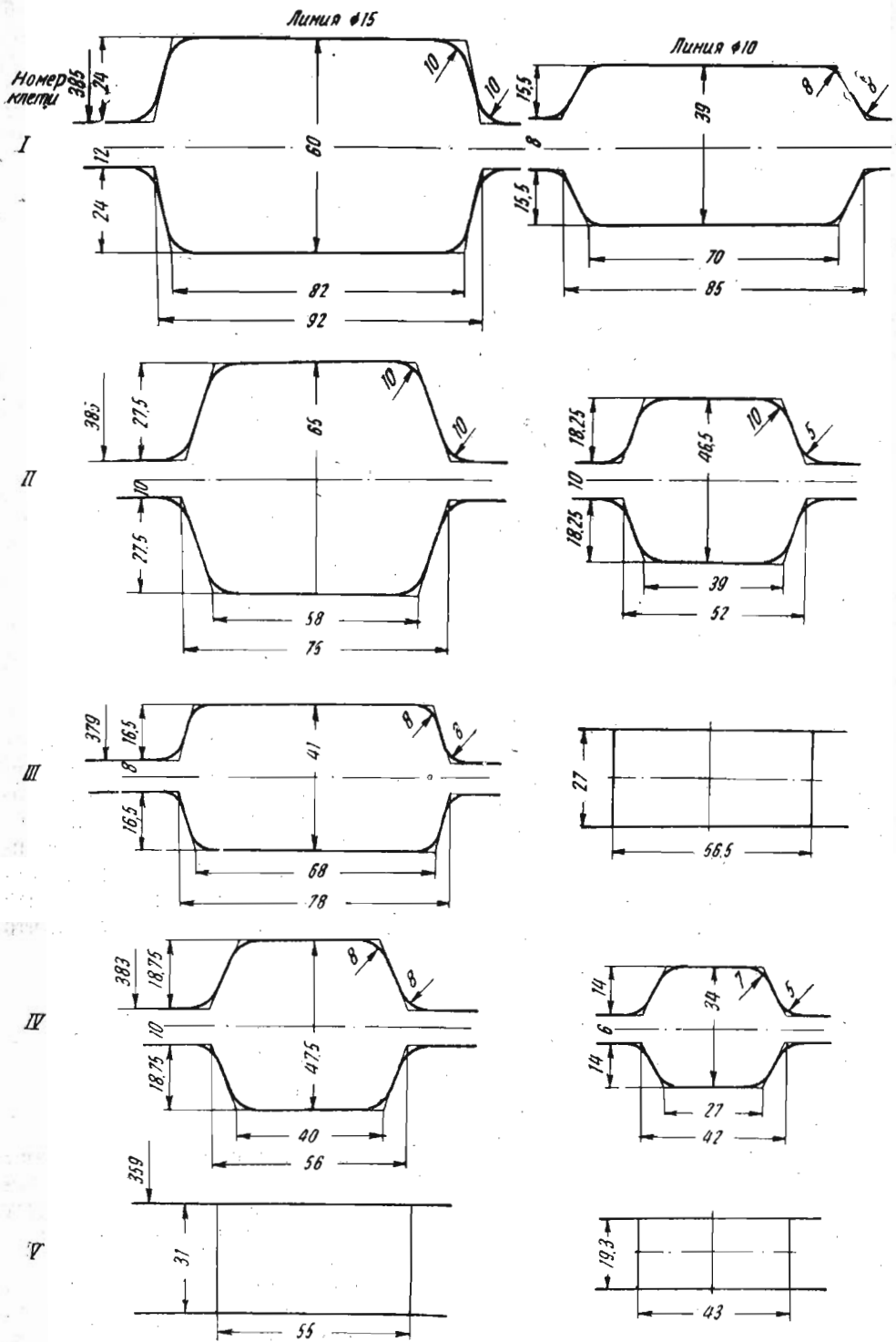
Р и с. 46. Калибры и схема деформации металла по системе калибров прямоугольник — ящичный квадрат

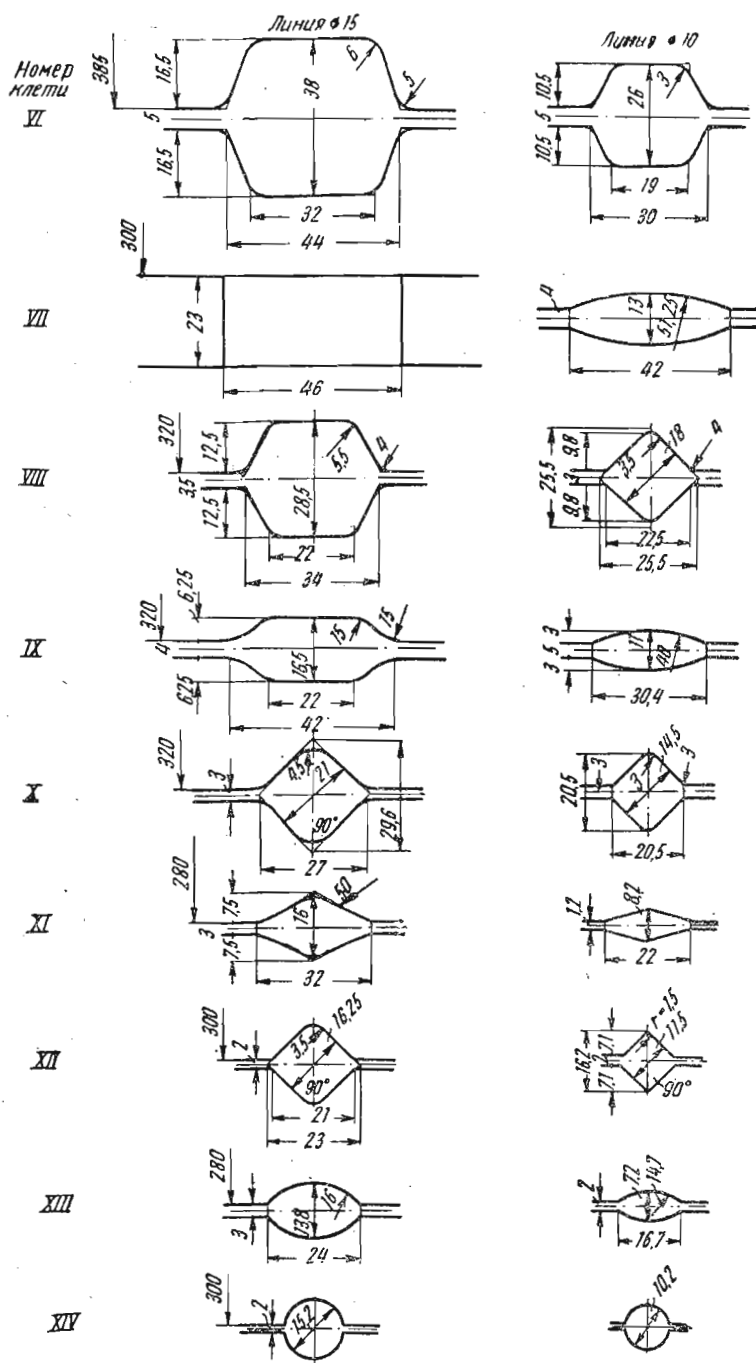
Применение валков с гладкой бочкой вместо калиброванных имеет следующие преимущества: не требуется никакой расточки, кроме обычной подготовки поверхности валка; полностью используется отбеленный слой валка (на чугунном валке), что способствует повышению его стойкости и улучшению качества поверхности прокатываемого профиля; облегчаются условия захвата; упрощается и удешевляется подготовка валков к прокатке. Недостатком системы прямоугольник — ящичный квадрат является некоторая неточность в размерах сторон квадрата, что неизбежно при наличии свободного уширения.

## 5. Методы расчета режимов обжатий при применении системы калибров прямоугольных — ящичный квадрат

В связи с тем, что в настоящее время проектируют, устанавливают и применяют в основном непрерывные станы или станы с непрерывными группами клетей, в методике расчета режимов обжатий следует учитывать особенности технологического процесса непрерывной прокатки.

Существует несколько методов расчета режимов обжатий и размеров переходных сечений для системы калибров прямоугольник — ящичный квадрат. Из них наиболее приемлемыми являются четыре метода, основанные: 1) на предельных условиях захвата, 2) на равенстве вытяжек по проходам, 3) на заданных вытяжках и 4) на заданных размерах переходных сечений квадратов.





круглой стали на мелкосортном стане 250

Исходными данными для этого метода являются диаметры прокатных валков по клетям, размеры исходной заготовки, числа оборотов валков (для непрерывных станов или групп клетей), температурный режим прокатки и мощность электродвигателей (для проверки результатов расчета).

Расчет может производиться по трем вариантам.

В первом варианте задано сечение исходной заготовки и требуется найти путем расчета конечное сечение. Во втором — задано конечное сечение и необходимо определить размеры исходной заготовки. В третьем варианте могут быть заданы как размеры исходной заготовки, так и сечение конечного профиля.

В первом варианте расчет следует вести по ходу прокатки, во втором — против хода прокатки. В третьем варианте можно вести расчет как по ходу, так и против хода прокатки с последующей корректировкой переходных сечений.

Таким образом, в самом начале расчета надо принять для него определенный порядок, основываясь на исходных данных. Расчет производят в пять этапов.

*Первый этап.* Определяют максимально возможные обжатия по одной из формул, например (16), с учетом вреза калибров. Однако точно учесть глубину вреза ручья в той или иной клети невозможно. Поэтому можно принять следующие величины уменьшения  $\Delta D$  диаметра валков  $D$  по буртам, взятые из анализа практических данных:

черновые (первая — третья) клети заготовочных станов (ящичный калибр)

$$\Delta D = (0,18 \div 0,2) D; \quad (45)$$

промежуточные и предчистовые клети заготовочных станов, черновые клети крупносортовых и среднесортовых станов (ящичный калибр)

$$\Delta D = (0,13 \div 0,15) D; \quad (46)$$

черновые клети мелкосортовых и проволочных станов (ящичный калибр)

$$\Delta D \approx 0,1 D;$$

черновые клети заготовочных станов (ящичный квадрат)

$$\Delta D = (0,24 \div 0,26) D; \quad (47)$$

промежуточные и предчистовые клети заготовочных станов, черновые клети крупносортовых и среднесортовых станов (ящичные квадраты)

$$\Delta D = (0,15 \div 0,16) D; \quad (48)$$

черновые клети мелкосортовых и проволочных станов (ящичный квадрат)

$$\Delta D = (0,11 \div 0,13) D. \quad (49)$$

Обычно последние две клети заготовочных станов или черновых групп клетей сортовых станов имеют калибры системы ромб — квадрат. Методика расчета этой системы калибров будет рассмотрена особо (см. ниже).

Для системы калибров прямоугольник — ящичный квадрат следует использовать зависимости (48) и (49).

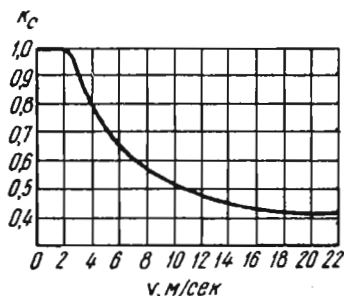
В общем виде уравнение для расчета максимального обжатия с учетом условий захвата и уменьшения диаметра валков при врезе ручья и переточках можно записать в виде

$$\Delta h_{\text{макс}} = 0,77 f^2 (R - \Delta R),$$

где  $\Delta R = \frac{\Delta D}{2}$  — уменьшение радиуса валков за счет глубины вреза ручья.

*Второй этап.* Определяют коэффициент трения и устанавливают расчетным путем температурный режим прокатки по специальной методике (или непосредственными измерениями).

Р и с. 48. Зависимость поправочного коэффициента  $k_c$  от скорости прокатки (для расчета коэффициента трения)



При определении коэффициента трения необходимо учитывать скорость прокатки. Как известно, коэффициент трения уменьшается с повышением скорости прокатки. Однако строгих аналитических зависимостей между коэффициентом трения и скоростью прокатки нет. Поэтому при расчетах пользуются эмпирической зависимостью, показанной на рис. 48. Расчеты калибровок, сделанные для различных станов, в основном подтверждают эту зависимость.

После принятого изменения диаметра прокатных валков и найденного значения коэффициента трения окончательно определяют максимальное обжатие в данном проходе.

*Третий этап.* Определяют уширение в каждом проходе по принятым и найденным величинам. Затем с учетом уширения рассчитывают размеры переходных сечений.

*Четвертый этап.* Проверяют соответствие размеров переходных сечений. В частности, проверяют соответствие размеров прямоугольного раската условию получения квадратного сечения при обжатии этого раската в последующем калибре. Если обнаруживается несоответствие, то следует произвести перерасчет, изменяя режимы обжатий так, чтобы обеспечить получение переходных квадратных сечений.

*Пятый этап.* Если режимы обжатий рассчитывали для непрерывного заготовочного стана или данной непрерывной группы клетей стана, то далее определяют площади переходных сечений с учетом радиусов закругления углов, вытяжки по проходам и константу стана (группы клетей).

Результаты расчетов сводят в таблицу.

*Метод расчета, основанный на равенстве вытяжек в каждом проходе*

Если задано условие, что в каждой клетке (в каждом проходе) должно быть выдержано равенство вытяжек, то расчет упрощается. Обыч-

но конечное сечение профиля (квадрат) известно. Известны также характеристики стана: диаметр, скорость вращения валков и технологические данные процесса прокатки.

Расчет ведут против хода прокатки. Предварительные размеры катающих диаметров определяют по рекомендациям, приведенным выше. Порядок расчета следующий.

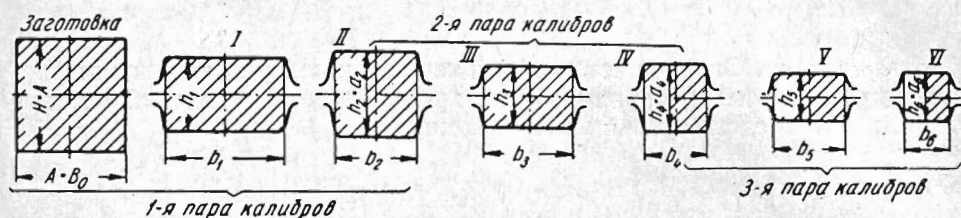


Рис. 49. Схема разделения калибров на отдельные пары и размеры переходных сечений при калибровке по системе прямоугольник — ящичный квадрат (расчет произведен по средним вытяжкам в каждом проходе)  
I—VI — номера клеток

Определяют площади сечения раската в каждом проходе по формуле

$$F_{n-1} = \mu_n F_n,$$

где  $F_n$  и  $\mu_n$  — площадь сечения раската и коэффициент вытяжки в  $n$ -м проходе.

Для системы калибров прямоугольник — ящичный квадрат определяют стороны квадрата в каждом четном проходе по выражению

$$a_x = \sqrt{F_x},$$

где  $x$  — номер четного прохода.

Далее определяют соотношения между размерами сторон исходного и последующего квадратов и размерами промежуточного прямоугольного раската.

Пусть требуется рассчитать калибровку для шестиклетового стана. Делим все калибры на расчетные пары, как показано на рис. 49. Стороны квадратов известны:  $a_6$  и  $a_4$ . Промежуточный прямоугольник имеет размеры  $h_5$  и  $b_5$ .

В этом случае для третьей пары калибров можно принять равенство вытяжек  $\mu_5 = \mu_6$ .

Но

$$\mu_6 = \frac{h_5 b_5}{a_6^2} \text{ и } \mu_5 = \frac{a_4^2}{h_5 b_5},$$

Приравняв эти выражения, после преобразования получим

$$a_4 a_6 = h_5 b_5.$$

Таким образом, при соблюдении равенства вытяжек в каждом проходе произведение сторон промежуточного раската прямоугольного сечения между двумя квадратами равно произведению сторон этих квадратов

$$Aa = bh,$$

где  $A$  — сторона исходного квадрата;

$a$  — сторона получаемого квадрата;

$b$  и  $h$  — ширина и высота промежуточного прямоугольного раската.

На основании этого правила можно по аналогии записать для остальных промежуточных прямоугольных раскатов:

$$b_3 h_3 = a_2 a_4; \quad b_1 h_1 = A a_2.$$

Далее принимают предварительно высоту каждого прямоугольного раската с учетом того, что при обжатии его в квадратном калибре возникающее уширение соответствует условиям формирования квадрата, т. е.:

$$h_1 = a_2 - \Delta b_2; \quad h_3 = a_4 - \Delta b_4; \quad h_5 = a_6 - \Delta b_6,$$

или

$$h_1 = A - \Delta h_1; \quad h_3 = a_2 - \Delta h_3; \quad h_5 = a_4 - \Delta h_5.$$

По этим предварительно принятым величинам  $h_1$ ,  $h_3$ ,  $h_5$  определяют по одной из формул уширение в прямоугольных калибрах и ширину раскатов:

$$b_1 = A + \Delta b_1; \quad b_3 = a_2 + \Delta b_3; \quad b_5 = a_4 + \Delta b_5.$$

Возможно, что ширина прямоугольного раската в каждом случае будет несколько отличаться от найденной по условиям

$$b_1 = \frac{A a_2}{h_1}; \quad b_3 = \frac{a_2 a_4}{h_3}; \quad b_5 = \frac{a_4 a_6}{h_5}.$$

При небольшой разнице размеров может быть принята любая из найденных ширин. Если разница будет значительной, то следует принять расчетную величину уширения и по ней определить ширину раската.

По найденным величинам  $b_1$ ,  $b_3$  и  $b_5$  определяют абсолютные обжатия и уширения в квадратных калибрах. Если найденные величины уширения обеспечивают получение квадратных сечений, то расчет на этом заканчивают. Если же они не обеспечивают получение таких сечений, то следует скорректировать обжатия в прямоугольных калибрах; в этом случае возможен пересчет уширения и в прямоугольных калибрах.

Все расчетные величины вносят в таблицу. При определении вытяжек в каждом проходе после корректировки размера вполне возможно отклонение их величин от первоначально принятого значения, но разница эта незначительна. Для непрерывных прокатных станов определяют их константу.

Расчет режимов обжатий, основанный на равенстве вытяжек в каждом проходе, может производиться и по ходу прокатки, если известны размеры заготовки. Тогда в итоге определяют конечное сечение. Если же известны размеры заготовки и конечного сечения, то тогда определяют среднюю величину вытяжки и по ней в любой последовательности определяют размеры промежуточных сечений.

#### *Метод расчета по заданным вытяжкам*

При расчете режимов обжатий по заданным вытяжкам (коэффициентам вытяжек) в каждом проходе также должны быть заданы характеристики стана (диаметр и скорость вращения валков, мощность электродвигателей, температура раската). В расчетах при предварительном определении катающих диаметров пользуются упомянутыми выше зависимостями глубины вреза ручья от его формы и степени уменьшения катающих диаметров.

Принимают порядок расчета по ходу или против хода прокатки. Если заданы размеры конечного сечения, то расчет ведут против хода прокатки. Если известны размеры заготовки, то расчет можно вести по ходу прокатки.

Рассмотрим расчет режимов обжатий по ходу прокатки.

Определяют площади поперечных сечений в каждом проходе по заданным величинам вытяжек:

$$F_1 = \frac{F_0}{\mu_1}; \quad F_2 = \frac{F_1}{\mu_2}; \quad F_3 = \frac{F_2}{\mu_3} \dots \quad F_n = \frac{F_{n-1}}{\mu_n}.$$

Определяют стороны квадратов в четных проходах по найденным площадям поперечного сечения:

$$a_2 = \sqrt{F_2}; \quad a_4 = \sqrt{F_4}; \quad a_6 = \sqrt{F_6} \text{ и т. д.}$$

Исходя из размеров сторон смежных квадратов определяют высоту и ширину промежуточных прямоугольных раскатов. Для этого принимают предварительно толщину раската с учетом получения последующего квадрата:

$$h_1 = a_2 - \Delta b_2; \quad h_3 = a_4 - \Delta b_4; \quad \dots \quad h_n = a_{n+1} - \Delta b_{n+1}.$$

Ширина раската может быть определена по найденным площадям поперечного сечения и принятым высотам:

$$b_1 = \frac{F_1}{h_1}; \quad b_3 = \frac{F_3}{h_3}; \quad b_n = \frac{F_n}{h_n}.$$

Обжатия в каждом проходе:

$$\begin{aligned} \Delta h_1 &= A - h_1; & \Delta h_3 &= a_2 - h_3; \\ \Delta h_2 &= b_1 - a_2; & \Delta h_4 &= b_3 - a_4. \end{aligned}$$

В общем виде обжатие можно представить выражениями: в ящичном прямоугольном калибре

$$\Delta h_n = a_{n-1} - h_n.$$

в ящичном квадратном калибре

$$\Delta h_n = b_{n-1} - a_n,$$

(здесь  $n$  — номер прохода).

По найденным обжатиям находят уширение в каждом проходе по любой из рекомендованных формул. Далее проверяют ширину раската в каждом проходе по формулам:

$$\begin{aligned} b_1 &= A + \Delta b_1; & b_3 &= a_2 + \Delta b_3; \\ b_2 &= a_2 = h_1 + \Delta b_2; & b_4 &= a_4 = h_3 + \Delta b_4. \end{aligned}$$

В общем виде эти зависимости можно представить так: для прямоугольных калибров

$$b_n = a_{n-1} + \Delta b_n;$$

для ящичных квадратных калибров

$$b_n = a_n = h_{n-1} + \Delta b_n.$$

Если будет несоответствие между найденными величинами уширения и предварительно принятыми обжатиями, а также толщинами раската, то следует произвести перерасчет. В этом случае легче будет ориенти-

роваться при предварительном принятии величин обжатий по проходам, и вторичный расчет будет окончательным.

Для непрерывных станов дополнительно определяют их константу. В связи с тем, что чаще всего нет равенства вытяжек в каждом проходе, приведенный расчет режимов обжатий по равенству вытяжек следует считать частным случаем.

#### *Метод расчета по заданным размерам переходных сечений квадратов*

Иногда приходится рассчитывать режимы обжатий по заранее заданным размерам квадратов в системе калибров прямоугольник — ящичный квадрат. В этом случае расчет может быть несколько упрощен. Если клетки стана имеют индивидуальный привод, то режимы обжатий в прямоугольных калибрах можно рассчитывать на основе равенства вытяжек с последующей корректировкой размеров.

Наиболее приемлемым для данного случая следует считать метод расчета, основанный на заданных вытяжках, поскольку стороны переходных квадратов заданы и остается определить лишь размеры переходных сечений прямоугольных раскатов. Расчет режимов обжатий и размеров переходных прямоугольных сечений между двумя заданными квадратными сечениями для данного случая рассмотрен в предыдущем разделе.

Если расчет вели применительно к непрерывным станам или отдельным непрерывным группам клеток, то дополнительно проверяют константу стана.

#### *Построение ящичных калибров системы прямоугольник — ящичный квадрат*

Ранее были приведены основные правила конструирования ящичных калибров. Рассмотрим дополнительно ряд особенностей, которые необходимо учитывать при определении размеров ящичных калибров, применяемых на непрерывных заготовочных станах и в черновых группах клеток сортовых станов.

Ширину  $b_k$  по дну ящичного калибра (см. рис. 42) принимаем несколько меньшей, чем ширина  $b$  задаваемого в него раската. Если в углах промежуточных калибров предусматривается закругление радиусом  $r$ , то

$$b_k = (0,9 \div 0,95) b.$$

Создаваемое этим защемление раската необходимо для того, чтобы он хорошо удерживался в ручье. Для чистового калибра — ящичного квадрата

$$b_k = (0,95 \div 1,0) b.$$

Если ставится задача получить в ящичном калибре квадратный раскат без закруглений углов (например, для последующей прокатки его в ромбическом и квадратном калибрах), то приходится учитывать возникающее уширение. Для прямоугольных калибров, главным образом квадратных ящичных, у которых отсутствуют закругления.

$$b_k = (1,0 \div 1,05) b.$$

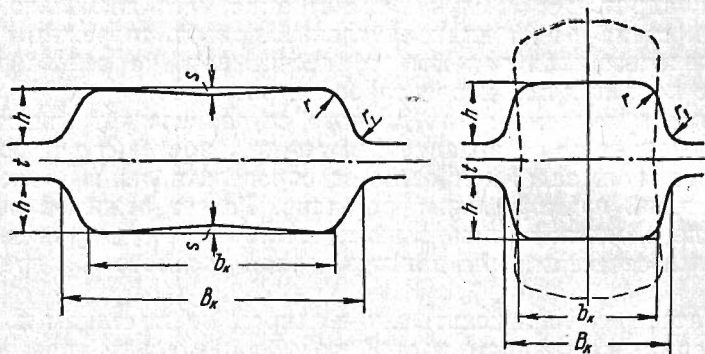
Ширина  $B_k$  калибра в месте разъема валков определяется выпуском и глубиной  $h_p$  вреза ручья. Глубина вреза ручья в свою очередь за-

висит от обжатия, соотношения размеров сторон раската, закруглений углов и т. д. Обычно принимают

$$h_p = (0,35 \div 0,45) h_{\min},$$

где  $h_{\min}$  — минимальная высота раската, выходящего из данного калибра.

Величину выпуска (имеется в виду односторонний выпуск) принимают в пределах 10—45% от глубины  $h_p$  вреза ручья. Бóльший процент выпуска относят к промежуточным ящичным калибрам (например, на проволочных и мелкосортных станах при калибровке валков черновой группы клетей по системе ящичных калибров).



Р и с. 50. Ящичный калибр с выпуклым дном и положение прямоугольного раската в последующем калибре

Как правило, при обычной калибровке выпуск рекомендуется иметь в пределах 10—20% от глубины  $h_p$  вреза ручья. Тогда

$$B_k = b_k + 2(0,1 \div 0,2) h_p.$$

Это равенство приемлемо, если после подсчета уширения калибр удовлетворяет условию нормального удерживания в нем раската. При стесненном уширении

$$b_k = (0,98 \div 1,0) b; \quad B_k = b + (0,1 \div 1,0) \Delta b.$$

Однако стенки у таких калибров быстро вырабатываются и на профиле могут получаться дефекты.

Радиусы закругления в углах калибра принимают конструктивно по равенствам:

$$r = (0,15 \div 0,25) h_p; \quad r_1 = (0,8 \div 1,0) r.$$

Зазор между валками можно принимать в зависимости от высоты раската:

$$t = (0,1 \div 0,3) h. \quad (50)$$

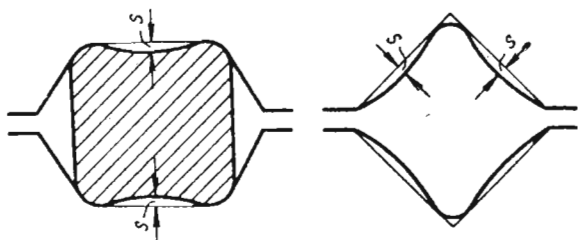
В ряде случаев приходится выпускать раскат из ручьев таким, чтобы он при значительном обжатии после кантовки не переполнял калибр (рис. 50). Тогда по дну калибра создают выпуклость

$$s = 0,5 \div 5 \text{ мм.}$$

Калибры изнашиваются неравномерно. Неравномерный износ выпускного квадратного калибра приводит к тому, что профиль имеет вы-

пуклость по сторонам. Во избежание этого рекомендуется растачивать выпускные квадратные калибры (ящичный и врезанный по диагонали) с некоторой выпуклостью дна и стенок  $s=0,5 \div 2,0$  мм на сторону (рис. 51)

Рис. 51. Выпуклость по дну ручьев ящичного квадратного калибра и стенок в квадратном калибре, врезанном по диагонали



### Системы калибров, применяемые на последних клетях непрерывных заготовочных станов

На заготовочных станках, особенно непрерывных, система калибров прямоугольник — ящичный квадрат получила самое широкое применение. Однако на двух последних клетях этих станков часто используют систему калибров ромб — квадрат (рис. 52). Объясняется это тем, что

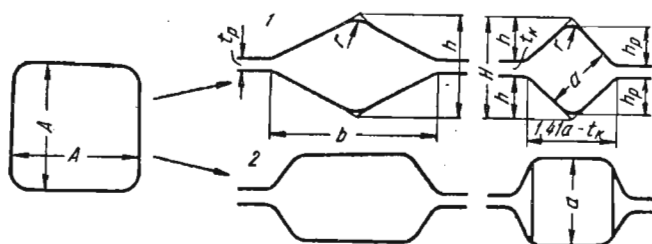


Рис. 52. Возможные системы калибров на последних двух клетях непрерывных заготовочных станков:  
1 — система ромб — квадрат; 2 — система прямоугольник — ящичный квадрат

при диагональном расположении квадратного калибра в чистовом проходе обеспечивается получение профиля квадратной заготовки с более точными размерами по сторонам и диагоналям. При этом упрощается и настройка валков. Предпоследний калибр в данном случае делают ромбическим.

В зависимости от размеров сторон квадратов  $A$  и  $a$  размеры предпоследнего ромба могут быть определены по следующим эмпирическим зависимостям:

общая высота ромба

$$h = (1,0 \div 1,02) A = (1,26 \div 1,28) a; \quad (51)$$

ширина ромба по разъему валков

$$b = (1,45 \div 1,5) A = (1,8 \div 1,9) a; \quad (52)$$

радиус закругления вершины ромба

$$r = (0,15 \div 0,2) A. \quad (53)$$

Зазор между валками принимают по равенству (50).

*Особенности расчета режимов обжатий для непрерывных станов или непрерывных групп клетей*

Обязательным условием расчета режимов обжатий и определения размеров переходных сечений при непрерывной прокатке является соблюдение константы стана по клетям

$$FD_k n_b = C.$$

В случае группового привода способом регулировки константы является только изменение площади поперечного сечения раската, так как другие величины неизменны.

В процессе расчета при несоответствии констант целесообразно изменять площади поперечного сечения раската и не уменьшать диаметры валков путем их переточки. Уменьшение диаметра валков только в целях выравнивания константы по клетям нежелательно, так как при этом ухудшаются условия захвата, снижается прочность валков, сокращается срок их службы. Переточка валков для выравнивания константы допустима только в том случае, если изменить площадь поперечного сечения раската невозможно.

*Пример расчета режимов обжатий на заготовочных станах*

*Пример 1.* Требуется рассчитать режимы обжатий и калибровку для прокатки заготовки квадратного сечения  $120 \times 120$  мм, исходя из средних величин вытяжек в каждой паре калибров. При этом требуется также рассчитать диаметры валков, считая, что величины обжатия являются предельными. Заготовочный стан — непрерывный шестиклетьевой.

Принимаем средние величины вытяжек от квадрата к квадрату. В предчистовом квадрате со стороной  $a_4$  возможная вытяжка  $\mu_4$  (см. табл. 2) может быть принята 1, 3; во втором проходе (II клеть)  $\mu_2 = 1,35$ .

В системах калибров прямоугольник — ящичный квадрат (первые четыре прохода по ходу прокатки) и ромб — квадрат (в последних проходах) размеры промежуточных квадратов определяются следующим путем.

Стороны квадратов  $a_4 = a_6 \mu = 120 \cdot 1,3 = 156$  мм и  $a_2 = a_4 \mu = 156 \times 1,35 = 210$  мм.

Если задаться средней вытяжкой  $\mu_{cp} = 1,32$  от заготовки к квадрату со стороной  $a_2$ , то сторона исходной квадратной заготовки

$$A = 1,32 a_2 = 1,32 \cdot 210 = 277 \text{ мм.}$$

Определяем размеры промежуточных сечений. Так как размеры квадратных сечений известны, расчет можно вести по ходу прокатки.

Рассчитаем размеры прямоугольного сечения в I клетке.

По равенству вытяжек  $\mu_1 = \mu_2$  имеем

$$b_1 h_1 = A a = 277 \cdot 210 = 58\,100 \text{ мм}^2.$$

Задаемся (предварительно) обжатием в I клетке  $\Delta h_1 = 80$  мм.

Тогда

$$h_1 = A - \Delta h_1 = 277 - 80 = 197 \text{ мм.}$$

Ширина раската

$$b_1 = \frac{A a}{h_1} = \frac{58\,100}{197} = 295 \text{ мм.}$$

Определим катающий диаметр валков. Расчет ведем применительно к новым валкам, без учета переточек. Для упрощения расчета принимаем условие, что раскат прокатывается во всех клетях с температурой  $t=1050^\circ\text{C}$ . Вообще же, следует учитывать температуру раската в каждом проходе.

Тогда из равенства  $\Delta h_{\text{макс}} = 0,9 f^2 R_k$  при  $f=1,05-0,0005 \cdot 1050=0,52$  для стальных валков ориентировочно катающий диаметр будет

$$D_{k_1} = 2R_{k_1} = \frac{2\Delta h_{\text{макс}}}{0,9 f^2} = \frac{2 \cdot 80}{0,9 \cdot 0,52^2} = 658 \approx 660 \text{ мм.}$$

Проверяем, будет ли получена необходимая ширина раската при принятом обжатии  $\Delta h_1=80 \text{ мм}$  и найденном катающем диаметра валков.

По формуле (35) уширение

$$\Delta b_1 = 0,35 \frac{80}{277} \sqrt{80 \cdot 330} = 16,2 \text{ мм.}$$

Тогда ширина раската

$$b_1 = A + \Delta b_1 = 277 + 16,2 = 293,2 \text{ мм.}$$

Как видно,  $b_1$  несколько меньше, чем при расчете по равенству вытяжек. При стремлении получить именно размер  $295 \text{ мм}$  следует сделать перерасчет, но можно остановиться и на полученном значении, учитывая, что при некоторой выработке валков изменится коэффициент трения, увеличится уширение и раскат будет иметь ширину  $b_1=295 \text{ мм}$ .

По полученным размерам сечения раската в первом проходе  $b_1 h_1 = 293,2 \times 197 \text{ мм}$  строим калибр согласно рекомендациям, приведенным ранее.

На этом расчет первого калибра и размеров раската заканчивается. Однако возможно, что при проверке уширения во II клети возникнет необходимость в перерасчете.

Проверим возможность получения квадрата во II клети. Имеем  $a_2=210 \text{ мм}$ . Прямоугольный раскат кантуется при подаче в квадратный калибр. Тогда обжатие

$$\Delta h_2 = b_1 - a_2 = 293,2 - 210 = 83,2 \text{ мм.}$$

При таком обжатии уширение

$$\Delta b_2 = 0,35 \frac{\Delta h_2}{H_2} \sqrt{\Delta h_2 R_2},$$

но в этом равенстве неизвестен радиус валков. Будем считать, что  $f=0,52$ . Тогда катающий радиус

$$R_{k_2} = \frac{83,2}{0,243} = 342 \text{ мм,}$$

откуда с округлением  $D_{k_2}=685 \text{ мм}$ .

Уширение

$$\Delta b_2 = 0,35 \frac{83,2}{293,2} \sqrt{83,2 \cdot 342,5} = 16,7 \text{ мм.}$$

Ширина раската во втором калибре

$$b_2 = a_2 + 16,7 = 213,7 \text{ мм.}$$

Следовательно, получается переполнение калибра и необходим перерасчет размеров раската, выпускаемого из I клети. В связи с этим требуется увеличить обжатие в I клети примерно на величину переполнения.

Принимаем  $\Delta h_1 = 84$  мм. Тогда

$$h_1 = 277 - 84 = 193 \text{ мм.}$$

Ширина раската

$$b_1 = \frac{58100}{193} = 300 \text{ мм.}$$

Снова находим катающий радиус, исходя из максимального обжатия

$$R_{\kappa_1} = \frac{84}{0,243} = 345 \text{ мм, } D_{\kappa_1} = 690 \text{ мм.}$$

Уширение в первом проходе

$$\Delta b_1 = 0,35 \frac{84}{277} \sqrt{84 \cdot 345} = 18 \text{ мм.}$$

Тогда ширина раската в первом проходе

$$b_1 = A + \Delta b_1 = 277 + 18 = 295 \text{ мм.}$$

Эти размеры теперь вторично проверяем по уширению во II клетки и по возможности получения квадрата.

Проверяем уширение во II клетки. Должен получиться квадрат со стороной  $a_2 = 210$  мм. Тогда обжатие во II клетки

$$\Delta h_2 = b_1 - a_2 = 295 - 210 = 85 \text{ мм.}$$

Катающий радиус  $R_{\kappa_2} = \frac{85}{0,243} = 350$  мм; откуда  $D_{\kappa_2} = 700$  мм.

Уширение

$$\Delta b_2 = 0,35 \frac{85}{295} \sqrt{85 \cdot 350} = 17,1 \text{ мм.}$$

Следовательно, ширина раската во втором калибре

$$a_2 = b_2 = 193 + 17,1 = 210,1 \text{ мм.}$$

При этом размере можно расчет сечения раската закончить. Далее строим калибр II клетки.

Таким образом, расчетными размерами раската окончательно являются:  $b_1, h_1 = 295 \times 193$  мм для I клетки и  $a_2 = 210$  мм для II клетки.

На этом расчет первой по ходу прокатки пары ящичных калибров можно закончить.

Аналогично производим расчет и для второй пары калибров: определяем  $b_3, h_3$  с последующей проверкой возможности получения квадрата со стороной  $a_4$ .

Для расчета исходными являются размеры  $a_2 = 210$  мм и  $a_4 = 156$  мм.

Расчет ромбического калибра (V клеть). Имеем исходные размеры  $a_4 = 156$  мм и  $a_6 = 120$  мм. В этом случае согласно уравнениям (51) — (53) размеры ромбического калибра будут следующие: ширина калибра по разьему  $b_5 = 1,5 a_4 = 1,5 \cdot 156 = 234$  мм, общая высота по вершинам  $h_5 = 1,0 a_4 = 156$  мм; радиус закругления вершин ромба  $r_5 = 0,15 a_4 = 0,15 \cdot 156 \approx 25$  мм, зазор между валками  $t_5 = 0,13 \times \times h_5 = 0,13 \cdot 156 \approx 20$  мм.

При проведении расчетов в каждом проходе требуется определить площади поперечного сечения раската, вытяжки, константу стана и другие величины. Все данные должны быть сведены в таблицу.

**Пример 2.** Требуется рассчитать калибровку для непрерывного шестиклетевого заготовочного стана 720 с определенными исходными (номинальными) диаметрами валков, жесткой кинематической связью между клетями, определяемой передаточными числами. Задано исходное

сечение заготовки  $H \times B = 295 \times 295$  мм. Необходимо прокатать квадратную заготовку сечением  $150 \times 150$  мм. Для этой цели необходимо определить обжатия по проходам и соответственно размеры калибров.

Исходные диаметры прокатных валков, мм:

$$D_{0_1} = 770; \quad D_{0_2} = 750; \quad D_{0_3} = 725; \quad D_{0_4} = 700; \quad D_{0_5} = 710 \\ \text{и } D_{0_6} = 715.$$

Скорости вращения валков, об/мин:

$$n_1 = 14,5; \quad n_2 = 19,4; \quad n_3 = 23,15; \quad n_4 = 31,6; \\ n_5 = 35,8 \text{ и } n_6 = 45,1;$$

Температура прокатываемого металла, °C:

$$t_1 = 1100; \quad t_2 = 1080; \quad t_3 = 1060; \quad t_4 = 1040; \quad t_5 = 1020 \text{ и } t_6 = 1000.$$

Расчет можно вести по ходу и против хода прокатки. Расчет против хода прокатки проще, так как известны размеры сечения конечной заготовки, числа оборотов валков и их диаметры. Без затруднений определяется и константа стана. Но можно вести расчет и по ходу прокатки, основываясь на константе, найденной также по данным последней клетки.

Приведем пример расчета по ходу прокатки с определением константы по последней клетки.

VI клетъ. Сечение профиля  $150 \times 150$  мм. Радиус закругления углов  $r = 20$  мм. Тогда площадь поперечного сечения профиля с учетом радиуса закруглений

$$F_6 = 150^2 - 0,86 \cdot 20^2 = 22156 \text{ мм}^2.$$

Катающий диаметр

$$D_{к_6} = D_{0_6} - \frac{F_6}{b_6} = 715 - \frac{22156}{1,41 \cdot 150 - 0,83 \cdot 20} = 602 \text{ мм}.$$

Константа стана по шестой клетки

$$C_6 = C = 22156 \cdot 602 \cdot 45,1 = 60 \cdot 10^7.$$

Эта константа является определяющей для всех клеток. Однако она определена для новых валков. Если режимы обжатий рассчитать для новых валков, то может получиться, что после полной переточки не будет обеспечен естественный захват раската. В связи с тем, что на переточки предусматривают общее уменьшение диаметра на 10%, уменьшим полученный диаметр в VI клетки на 10%. Тогда

$$D_{к_6} = 0,9 \cdot 602 \approx 542 \text{ мм}.$$

Константа

$$C = 22156 \cdot 542 \cdot 45,1 = 54 \cdot 10^7.$$

I. Клетъ. Предварительно принимаем согласно приведенным рекомендациям глубину вреза ручья ящичного калибра  $h_p = 0,25$   $H = 0,25 \cdot 295 = 74$  мм и зазор между валками  $t = 0,08 \cdot D_{0_1} = 0,08 \cdot 770 = 62$  мм.

Тогда катающий диаметр

$$D_{к_1} = 770 - (2 \cdot 74 + 62) = 560 \text{ мм}.$$

С учетом переточки катающий диаметр валков  $D_{к_1} = 0,9 \cdot 560 = 504$  мм.

Коэффициент трения  $f = 1,05 - 0,0005 \cdot 1100 = 0,5$ .

Определим максимально возможное обжатие и проверим, будет ли это удовлетворять константе стана

$$\Delta h_{\text{макс}} = 0,9 \cdot 0,5^2 \cdot 252 \approx 57 \text{ мм.}$$

Тогда высота раската, выходящего из I клетки,

$$h_1 = 295 - 57 = 238 \text{ мм;}$$

уширение

$$\Delta b_1 = 0,35 \frac{57}{295} \sqrt{57 \cdot 252} = 8 \text{ мм;}$$

ширина раската

$$b_1 = 295 + 8 = 303 \text{ мм;}$$

радиус закругления углов

$$r_1 = 0,15 \cdot 238 = 35 \text{ мм;}$$

площадь поперечного сечения

$$F_1 = b_1 h_1 - 0,86 r_1^2 = 303 \cdot 238 - 0,86 \cdot 35^2 = 71145 \text{ мм}^2.$$

Константа стана по первой клетки

$$C_1 = F_1 D_{\kappa_1} n_{B_1} = 71145 \cdot 504 \cdot 14,5 = 52 \cdot 10^7.$$

Константа получилась меньшей, чем должна быть. Следовательно, необходимо сделать перерасчет. Увеличить константу можно за счет увеличения либо диаметра валков, либо площади сечения раската. Обычно стремятся не изменять диаметры прокатных валков и сводить все расчеты к новому определению режимов обжатий. Оставляя диаметр валков неизменным, находим необходимую площадь поперечного сечения раската

$$F_1 = \frac{C}{D_{\kappa_1} n_{B_1}} = \frac{54 \cdot 10^7}{504 \cdot 14,5} = 73800 \text{ мм}^2.$$

Для получения этой площади сечения необходимо уменьшить обжатие и, следовательно, увеличить высоту раската на

$$\Delta h'_1 = \frac{\Delta F_1}{b_1} = \frac{73800 - 71145}{303} \approx 8,5 \text{ мм.}$$

Таким образом, из I клетки по константе стана надо выпускать раскат высотой

$$h_1 = 295 - (57 - 8,5) = 246,5 \text{ мм.}$$

Тогда обжатие  $\Delta h_1 = 48,5 \text{ мм}$  и уширение

$$\Delta b_1 = 0,35 \frac{48,5}{295} \sqrt{48,5 \cdot 252} = 6,4 \text{ мм.}$$

Ширина раската

$$b_1 = 295 + 6,4 = 301,4 \text{ мм.}$$

Площадь поперечного сечения

$$F_1 = b_1 h_1 - 0,86 r_1^2 = 301,4 \cdot 246,5 - 0,86 \cdot 35^2 = 72945 \text{ мм}^2.$$

Изменение высоты выходящего из клетки сечения приводит к уменьшению катающего диаметра, что отрицательно скажется на константе. Поэтому требуется некоторое увеличение диаметра валков или снижение общей величины их переточки  $\Delta D$ .

Определим катающий диаметр по  $C_6$ :

$$D_{\kappa_1} = \frac{54 \cdot 10^7}{72945 \cdot 14,5} = 510 \text{ мм.}$$

Только при таком катающем диаметре после последней переточки валков клеть будет работать нормально. Тогда при

$$D_{\kappa} = D_{0_1} - h_1 = 770 - 246,5 = 523,5 \text{ мм}$$

допускаемая величина переточки

$$\Delta D = 523,5 - 510 = 13,5 \text{ мм.}$$

Следовательно, практически валки первой клетки могут работать всего одну — две переточки. Поэтому целесообразнее увеличить диаметр прокатных валков против заданного.

Если принять уменьшение диаметра валков с учетом переточек на 10%, то необходимо иметь валки диаметром

$$D_{\kappa_1} = 510 + 0,1 \cdot 510 = 561 \text{ мм.}$$

Тогда номинальный диаметр валков

$$D_{0_1} = D_{\kappa_1} + h_1 = 561 + 246,5 = 807,5 \text{ мм.}$$

На этом расчет заканчиваем и по найденным размерам раската строим калибр. Однако в связи с некоторым увеличением диаметра валков следует проверить угол наклона шпинделей к горизонтали.

II клеть. Исходные размеры сечения  $H_1 = 246,5 \text{ мм}$ ,  $B_1 = 301,4 \text{ мм}$ . Прямоугольный раскат после кантовки на  $90^\circ$  задается в квадратный калибр.  $D_{0_2} = 750 \text{ мм}$ ;  $n_2 = 19,4 \text{ об/мин}$ .

Допустим, что из второй клетки выдается квадратный раскат со стороной  $a_2 = 257 \text{ мм}$ . Такое допущение возможно потому, что уширение во втором калибре может быть в пределах 10 мм (его также принимаем предварительно).

Тогда площадь сечения с учетом радиусов закруглений  $r_2 = 0,15 \cdot 257 = 38 \text{ мм}$  составит

$$F_2 = 257 - 0,86 \cdot 38^2 = 64750 \text{ мм}^2.$$

Катающий диаметр

$$D_{\kappa_2} = D_{0_2} - a_2 = 750 - 257 = 493 \text{ мм.}$$

С учетом переточки  $D_{\kappa_2} = 0,9 \cdot 493 = 443 \text{ мм}$ .

Константа стана во второй клетке  $C_2 = 64750 \cdot 443 \cdot 19,4 = 55,5 \cdot 10^7$ .

Константа завышена, следовательно, необходим перерасчет.

Определим необходимую площадь квадратного сечения согласно константе по шестой клетке

$$F_2 = \frac{54 \cdot 10^7}{19,4 \cdot 443} = 62750 \text{ мм}^2.$$

Тогда сторона квадрата с учетом радиуса закруглений

$$a_2 = \sqrt{62750 + 0,86 \cdot 38^2} = 252,5 \text{ мм.}$$

Обжатие во второй клетке  $\Delta h_2 = 301,4 - 252,5 = 49 \text{ мм}$ ;

катающий диаметр  $D_{\kappa_2} = 750 - 252,5 = 497,5 \text{ мм}$ ;

с учетом переточки  $D_{\kappa_2} = 0,9 \cdot 497,5 = 447,5 \text{ мм}$ ;

уширение во втором калибре

$$\Delta b_2 = 0,35 \frac{49}{301,4} \sqrt{49 \cdot 223,75} = 6 \text{ мм.}$$

Ширина раската во втором калибре  $b_2 = 246,5 + 6 = 252,5 \text{ мм}$ .

Номер  
клетки

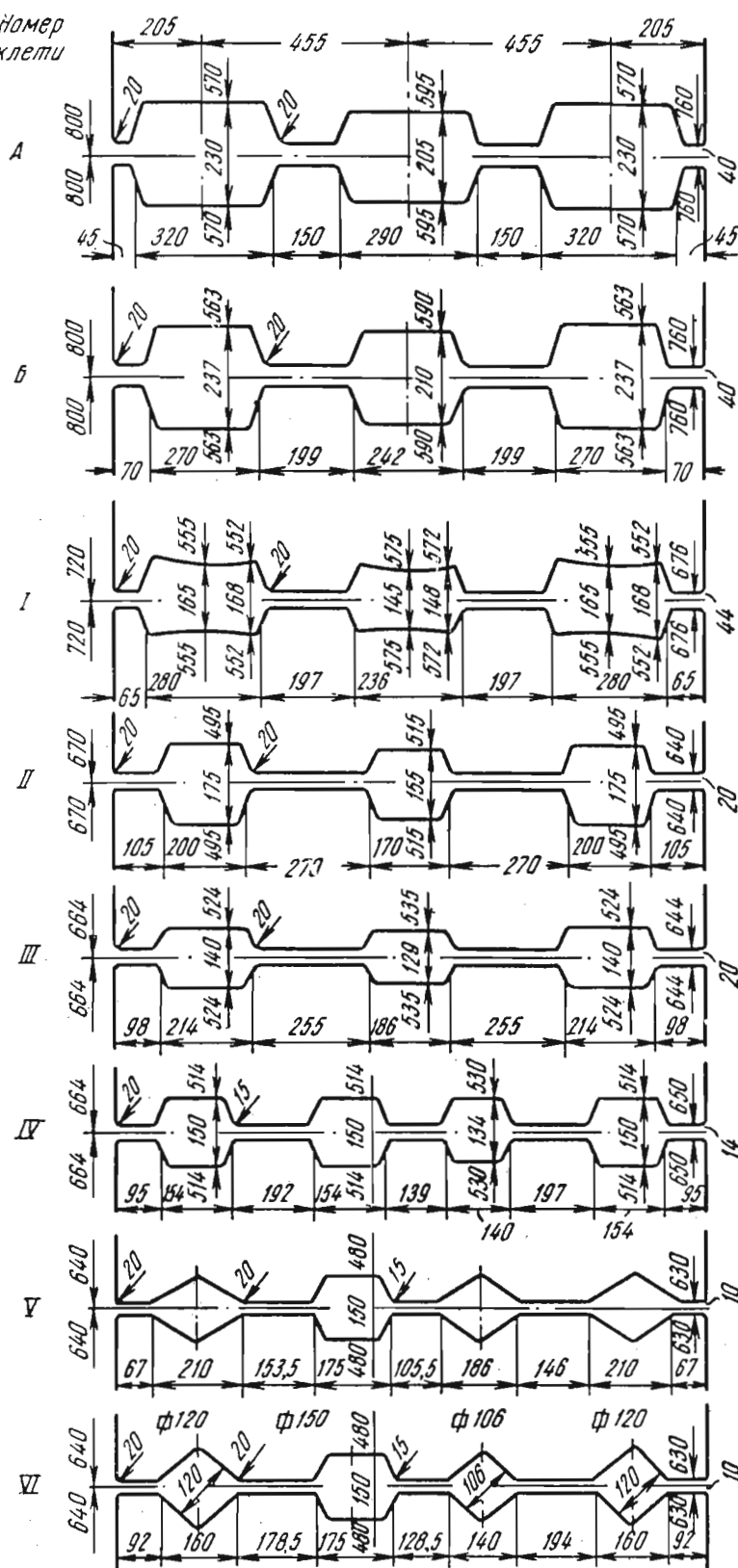


Рис. 53. Калибровка валков непрерывного заготовочного стана 630 для прокатки заготовок сечением 106×106, 150×150 и 120×120 мм

Таким образом, квадратное сечение  $252,5 \times 252,5$  мм является окончательным, удовлетворяющим условиям заполнения калибра и константе стана. На этом расчет размеров раската, выдаваемого из второй клетки, заканчивается. Далее по найденным размерам строим калибр.

Аналогично рассчитываем все остальные калибры. При этом важно, чтобы при всех проходах (клетях) сохранялось значение константы стана. Размеры ромбического калибра (V клеть) определяются так же, как они были определены в первом примере.

### *Расположение ящичных калибров на валках*

При врезе калибров на бочке валков горизонтальная ось симметрии калибра должна быть совмещена со средней линией валков. При определении размеров буртов и диаметров по элементам бочки валков необходимо руководствоваться следующими правилами.

Если на бочке валков располагается несколько калибров, то ширина крайних буртов определяется конструкцией вводной и выводной валковой арматуры. Ширина буртов между калибрами, как уже говорилось выше, должна быть не менее глубины вреза ручья. При врезе в валки нескольких калибров, определяющих самостоятельную прокатку отдельных профилей, необходимо соблюдать одинаковое расстояние между осями калибров на валках каждой последующей клетки, что очень важно для процесса непрерывной прокатки. На непрерывных станах при небольшом расстоянии между клетями искривление раската между ними крайне нежелательно; необходимо обеспечить по возможности прямолинейное движение металла. Иначе на поверхности раската образуются подрезы и другие дефекты от трения металла об арматуру.

Если в предчистовых клетях увеличивается число калибров на валках, то их следует располагать симметрично относительно предшествующих калибров, добиваясь этим меньшего искривления раската между клетями.

Для примера на рис. 53 показана калибровка валков одного из отечественных непрерывных заготовочных станов. Здесь имеются четыре линии для прокатки заготовок сечением  $120 \times 120$ ,  $150 \times 150$ ,  $106 \times 106$  и  $120 \times 120$  мм. Две линии отведены для заготовки сечением  $120 \times 120$  мм и расположены по краям валков. Посередине прокатывается заготовка сечением  $150 \times 150$  мм, а рядом —  $106 \times 106$  мм. В первых пяти клетях на бочке валков расположено по три калибра; расстояние между их вертикальными осями постоянно. Впоследствии по условиям расчетов калибровки оказалось возможным после пятой клетки ввести линию для прокатки заготовки сечением  $106 \times 106$  мм. Поэтому, начиная с шестой клетки, на бочке валков расположено уже по четыре калибра.

## **6. Расчет режимов обжатий на обжимно-заготовочных станах трио**

В связи с тем, что на старых металлургических заводах еще используют обжимно-заготовочные станы трио, кратко рассмотрим особенности их калибровки.

Первыми по ходу прокатки здесь применяют системы ящичных калибров. Исходя из условий деформации раската в калибрах обжимно-заготовочных станов трио и других однотипных станов в данном случае соблюдают при расчетах следующие принципы. Нечетные проходы предусматривают по нижнему ряду калибров — между нижним и средним валком; часто эти калибры имеют форму ящичных квадратов. Чет-

ные проходы осуществляют по верхнему ряду калибров — между средним и верхним валком; калибры этого ряда выполнены в форме ящичных прямоугольников. Металл проходит через каждый калибр только один раз, поэтому высота калибра должна равняться высоте выходящего раската.

Порядок прокатки исходной заготовки или слитка следующий. Первый проход осуществляют с обжатием в первом нижнем калибре, затем раскат передается без кантовки в верхний — прямоугольный калибр, расположенный над первым. После этого раскат кантуется на

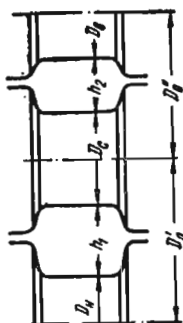


Рис. 54. Общая схема расположения калибров на валах обжимно-заготовочного стана трио

90° и задается в следующий нижний калибр, а затем опять без кантовки — в следующий верхний калибр и т. д. (рис. 54). Таким образом, ручей среднего валка является общим для нижнего и верхнего калибров. Калибры, у которых имеется общий ручей, принято называть *сопряженными*.

Расчет режимов обжатий в этом случае аналогичен расчету режимов обжатий для заготовочных станов, особенно если принята система ящичных калибров квадрат — прямоугольник — квадрат. Методы расчета режимов обжатий для данной системы рассмотрены выше.

В обжимно-заготовочных станах трио и в других подобных клетях в любом ящичном квадрате или прямоугольном калибре нижний ручей обычно делают с большей глубиной вреза, чем верхний. Соотношение глубин верхнего и нижнего ручьев в каждом калибре принимают исходя из конструктивных особенностей стана. Высоты калибров  $h_1$  и  $h_2$  определяют расчетным путем.

Существенным недостатком расположения калибров в клетях трио является значительная разность катающих диаметров, т. е. большое верхнее давление.

Рассмотрим условия, когда при сопряженных калибрах верхнее давление может иметь минимальное значение.

Из рис. 54 имеем:

$$D_0' = \frac{D_n}{2} + \frac{D_c}{2} + h_1; \quad D_0'' = \frac{D_c}{2} + \frac{D_b}{2} + h_2;$$

где  $D_c$  — рабочий диаметр среднего валка.

Откуда

$$D_n = 2D_0' - D_c - 2h_1; \quad D_b = 2D_0'' - D_c - 2h_2.$$

При равенстве средних диаметров каждой пары валков ( $D_0' = D_0''$ ) величина верхнего давления составит:

для нижнего калибра

$$D_c - D_n = D_c - 2D_0' + D_c + 2h_1 = 2D_c + 2h_1 - 2D_0';$$

для верхнего калибра

$$D_{\text{в}} - D_{\text{с}} = 2D_0'' - D_{\text{с}} - 2h_2 - D_{\text{с}} = 2D_0'' - 2h_2 - 2D_{\text{с}}.$$

Сумма верхних давлений в обоих калибрах

$$(D_{\text{с}} - D_{\text{н}}) + (D_{\text{в}} - D_{\text{с}}) = 2(h_1 - h_2), \quad (54)$$

т. е. сумма верхних давлений при одинаковых средних диаметрах каждой пары валков равна удвоенному обжатию раската в верхнем калибре. Примем условие, что верхнее давление у обоих калибров будет одинаковым. Так обычно и бывает на практике. Тогда

$$(D_{\text{с}} - D_{\text{н}}) = (D_{\text{в}} - D_{\text{с}}) = h_1 - h_2. \quad (55)$$

Линейное обжатие при прокатке на обжимно-заготовочных станах трио ( $h_1 - h_2$ ) достигает 40—50 мм, а это означает, что и верхнее давление будет 40—50 мм, т. е. слишком большим. Применять в целях снижения верхнего давления уменьшение обжатия в верхнем калибре нецелесообразно, так как это приводит к снижению производительности стана. Для того чтобы снизить верхнее давление при расположении калибров один над другим, необходимо диаметр верхнего валка уменьшить, а нижнего — увеличить. Если диаметр верхнего валка уменьшить, а нижнего увеличить на величину обжатия в верхнем калибре, то согласно уравнению (55) верхнее давление можно довести до нуля. Тогда все валки будут разного диаметра, наибольший диаметр будет у нижнего валка, а наименьший — у верхнего. Будут разными и средние диаметры каждой пары валков,  $D_0' > D_0''$ . Сумма верхних давлений у обоих калибров

$$(D_{\text{с}} - D_{\text{н}}) + (D_{\text{в}} - D_{\text{с}}) = 2(h_1 - h_2) - 2(D_0' - D_0''), \quad (56)$$

т. е. меньше, чем по уравнению (54).

В случае равенства верхних давлений у обоих сопряженных калибров верхнее давление в каждом калибре

$$(D_{\text{с}} - D_{\text{н}}) = (D_{\text{в}} - D_{\text{с}}) = (h_1 - h_2) - (D_0' - D_0''). \quad (57)$$

Из уравнения (57) вытекает, что можно принять такие средние диаметры  $D_0'$  и  $D_0''$ , при которых верхнее давление будет равно нулю:

$$(h_1 - h_2) - (D_0' - D_0'') = 0$$

и

$$D_0' - D_0'' = h_1 - h_2.$$

Верхнее давление будет равно нулю тогда, когда разность средних диаметров каждой пары валков равна линейному обжатию в верхнем калибре.

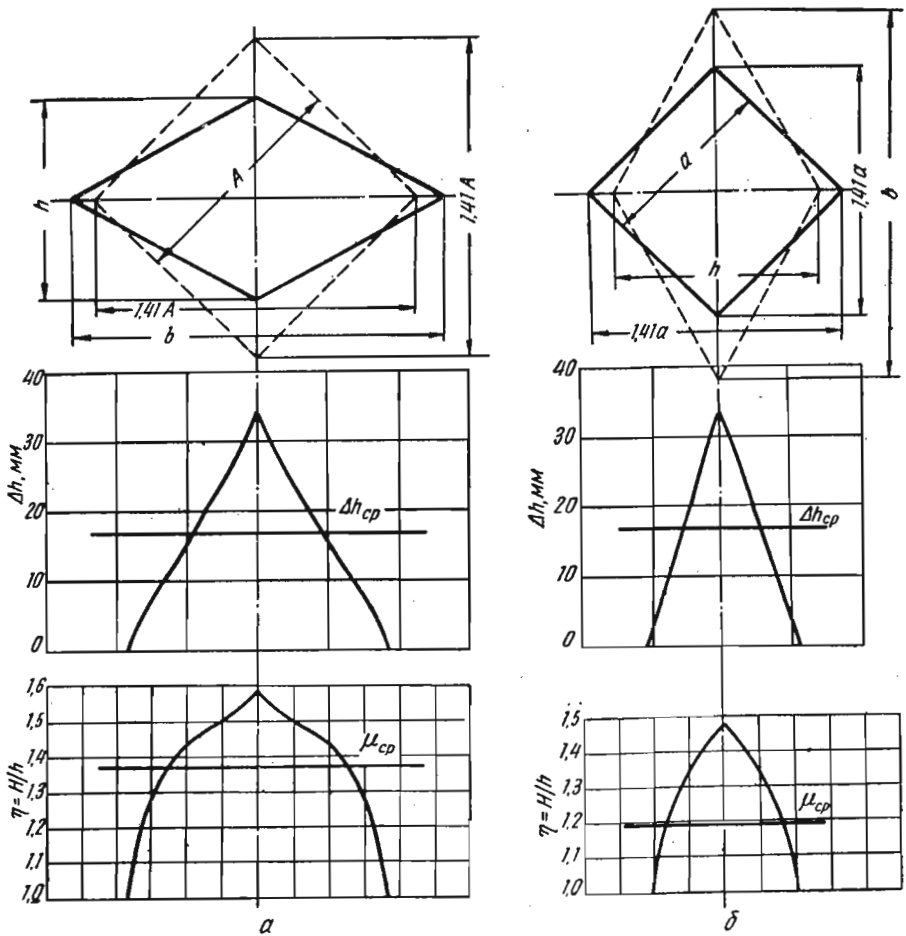
Следует заметить, что при изменении диаметров валков, например, уменьшении верхнего и увеличении нижнего, необходима проверка угла наклона шпинделей.

Построение ящичных калибров для данного случая аналогично приведенному ранее. Только при определении выпуска следует вначале принять выпуск в верхнем калибре, затем по нему построить выпуск в нижнем калибре. В целях достижения одинаковой продолжительности работы всех валков глубину вреза в средний валок делают меньше, чем в верхний и нижний. В остальном при расположении калибров на валках соблюдают те же правила, что приведены в предыдущем разделе.

# СИСТЕМЫ КАЛИБРОВ РОМБ—КВАДРАТ И РОМБ—РОМБ

## 1. Система калибров ромб — квадрат

Систему чередующихся квадратных и ромбических калибров широко применяют в качестве вытяжной для прокатки как мелко- и средне-сортной стали, так и специальной квадратной стали. Основное ее преимущество заключается в том, что при такой калибровке имеется возможность получать правильные по конфигурации квадратные сечения. Эта система обеспечивает достаточно высокие коэффициенты деформации и хорошую устойчивость раската при прокатке как в ромбических, так и квадратных калибрах.



Р и с. 55. Распределение абсолютного обжатия и коэффициента высотной деформации по ширине ручья:

$a$  — в ромбическом калибре;  $b$  — в квадратном калибре

Существенным недостатком системы ромб — квадрат является необходимость сравнительно глубокого вреза калибров в валки, что ограничивает применение такой системы на крупносортовых станах из-за большого снижения прочности валков. В отличие от ящичных калибров при системе ромб — квадрат наблюдается неравномерность деформации металла по ширине (рис. 55).

Если рассматривать деформацию квадратной стали, задаваемой в ромбический калибр по диагонали, то из рис. 55 следует, что наибольшее абсолютное обжатие и высотная деформация происходят на середине ширины раската и уменьшаются к его краям. Закругления углов в вершине калибра несколько снижают эту неравномерность. Неравномерность деформации наблюдается также при прокатке ромбического раската в квадратном калибре.

Среднее абсолютное обжатие  $\Delta h_{\text{пр}}$ , определенное по правилу приведенной полосы, а также средняя вытяжка  $\mu_{\text{ср}}$  не характеризуют действительной картины деформации в квадратном и ромбическом калибрах.

### *Методы расчета калибров вытяжной системы ромб — квадрат*

Так как основной задачей этой системы вытяжных калибров, помимо получения квадратных сечений, является уменьшение площади поперечного сечения прокатываемого металла, наиболее рационально вести прокатку с наибольшими допустимыми по условиям захвата обжатиями. Как видно из рис. 55, участок с наибольшим обжатием в обоих калибрах соответствует наименьший катающий диаметр. Следовательно, наибольшее допустимое обжатие по середине ширины раската зависит здесь от максимально возможной деформации по условиям естественного захвата.

Для вывода основных уравнений, необходимых для расчета системы ромб — квадрат, принимаем, что квадратные калибры имеют углы при вершине  $90^\circ$ , а вертикальные и горизонтальные диагонали равны между собой (см. рис. 55).

Величина наибольшего допустимого обжатия металла по условиям естественного захвата будет:

для квадратного сечения в ромбическом калибре

$$\Delta h_{\text{макс}} = 1,41 A - h = D_{\text{мин}} (1 - \cos \alpha_{\text{макс}}); \quad (58)$$

для ромбического сечения в квадратном калибре

$$\Delta h_{\text{макс}} = b - 1,41 a = D_{\text{мин}} (1 - \cos \alpha_{\text{макс}}). \quad (59)$$

По практическим данным можно рекомендовать:

для стальных валков  $\alpha_{\text{макс}} = 24 \div 26$  град;

для чугунных валков  $\alpha_{\text{макс}} = 19 \div 22$  град.

В ряде случаев, особенно при прокатке профилей малых сечений, степень деформации ограничивается не условиями захвата, а устойчивостью раската в калибре.

Учитывая сравнительно небольшую разницу в величинах минимальных катающих диаметров в ромбическом и квадратном калибрах, можно считать, что для обоих случаев наибольшее допустимое обжатие при данном диаметре валков будет:

для стальных валков

$$\Delta h_{\text{макс}} = D_{\text{мин}} [1 - \cos (24 \div 26)^\circ] = D_{\text{мин}} (0,085 \div 0,105); \quad (60)$$

для чугунных валков

$$\Delta h_{\text{макс}} = D_{\text{мин}} [1 - \cos (19 \div 22)^\circ] = D_{\text{мин}} (0,055 \div 0,072). \quad (61)$$

Это соответствует коэффициентам трения:  
для стальных валков

$$f = 0,43 \div 0,50,$$

для чугунных валков

$$f = 0,37 \div 0,42.$$

Если предусматривается прокатка на стане, имеющем скорость в черновых клетях более 2—3 м/сек, то величину наибольшего допустимого обжатия следует уменьшать в соответствии с уменьшением коэффициента трения, вызванным увеличением скорости прокатки, и в уравнения (60)—(61) надо внести поправку (см. рис. 48).

Минимальные диаметры  $D_{\min p}$  и  $D_{\min k}$  валков при ромбических и квадратных калибрах определяют посередине ширины ручья с учетом их переточки до 10%. Тогда без учета радиусов закруглений в вершине калибра в уравнения (58)—(61) необходимо подставлять значения диаметров:

$$D_{\min p} = 0,9 D_0 - h; \quad (62)$$

$$D_{\min k} = 0,9 D_0 - 1,41 a, \quad (63)$$

где  $D_0$  — номинальный диаметр валков;

$h$  — высота ромбического калибра;

$a$  — сторона квадрата.

Для получения нормального профиля промежуточного сечения по системе вытяжных калибров ромб — квадрат необходимо иметь в каждом из них достаточный простор для уширения. Поэтому

$$b > 1,41 A, \quad h < 1,41 a,$$

или

$$b = 1,41 A + \Delta b_p,$$

$$h = 1,41 a - \Delta b_k.$$

Уширения  $\Delta b_p$  и  $\Delta b_k$  в ромбическом и квадратном калибрах могут быть выражены в зависимости от соответствующих величин обжатий  $\Delta h_p$  и  $\Delta h_k$  и показателей уширения  $k_p$  и  $k_k$ :

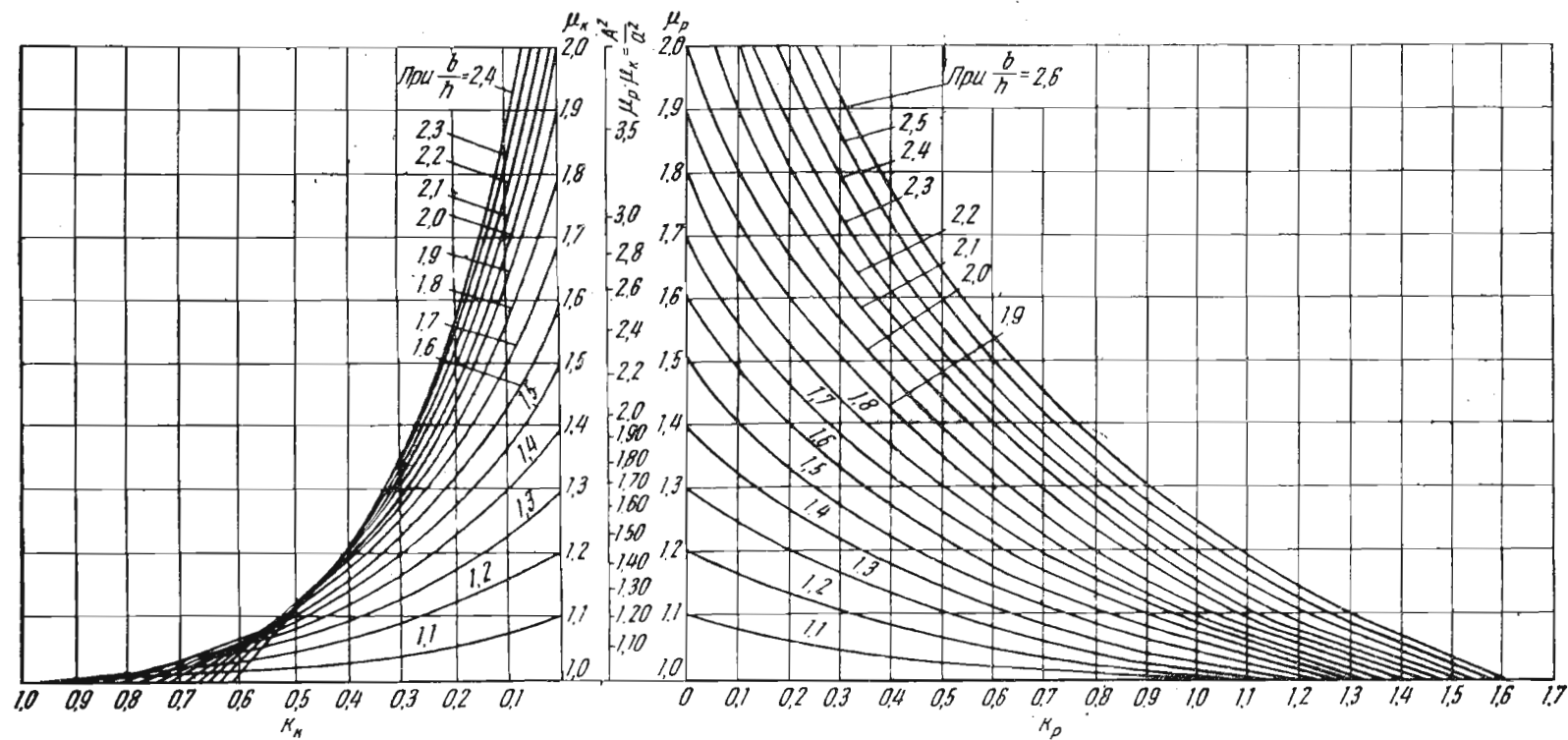
$$\Delta b_p = k_p \Delta h_p;$$

$$\Delta b_k = k_k \Delta h_k.$$

Развитие уширения в ромбическом и квадратном калибрах зависит от их формы и степени неравномерности деформации в них. Наклон боковых стенок квадратного и ромбического калибров уменьшает уширение по сравнению со свободным уширением при прокатке на гладкой бочке. Однако неравномерность деформации и, в частности, развитие внеконтактной деформации оказывают обратное влияние, т. е. увеличивают уширение. Установить влияние каждого фактора аналитически не представляется возможным. Поэтому величину показателя уширения обычно определяют как отношение уширения к величине обжатия по приведенным размерам полосы, т. е.

$$k_p = \left( \frac{\Delta b_p}{\Delta h_p} \right)_{\text{пр}} \quad \text{и} \quad k_k = \left( \frac{\Delta b_k}{\Delta h_k} \right)_{\text{пр}}.$$

Значения показателей уширения в ромбическом ( $k_p$ ) и квадратном ( $k_k$ ) калибрах можно определить по графикам (рис. 56).



Р и с. 56. Зависимость показателя уширения в ромбическом ( $\kappa_p$ ) и квадратном ( $\kappa_k$ ) калибрах от коэффициента вытяжки и отношения  $\frac{b}{h}$  диагоналей ромба

При расчетах системы калибров ромб — квадрат возможны следующие варианты:

- а) известен размер исходного квадрата, необходимо определить размеры ромба и конечного квадрата;
- б) известен размер конечного квадрата, необходимо определить размеры промежуточного ромба и размер исходного квадрата;
- в) известны размеры исходного и конечного квадратов, необходимо определить размеры промежуточного ромба.

Во всех трех случаях расчета должны быть известны исходные данные: диаметры и длина бочки валков (для ее калибровки), материал валков, температурный режим прокатки; если стан непрерывный, тогда необходимо знать передаточные числа или числа оборотов валков по клетям.

*Методика расчета по первому и второму вариантам.* Если известны только размеры одного из калибров системы ромб — квадрат, то решение не может быть определенным. В самом деле, нельзя решить задачу, если не будет известна одна из дополнительных величин: вытяжка в ромбе, соотношение размеров ромба или общая вытяжка за два прохода. Если ни одна из этих величин не задана, то приходится либо принимать ее (допустим, размер стороны искомого квадрата, исходя из технологической необходимости), либо исходить из предельных условий захвата металла валками.

Приведем пример расчета для случая, когда дополнительно принимают размер искомого квадрата по величине средней вытяжки. Допустим, по известному размеру стороны исходного квадрата  $A$  определяют размеры ромба ( $b, h$ ) и сторону последующего квадрата  $a$ . Тогда порядок расчета будет следующий.

1. Принимают среднюю величину вытяжки за один проход в системе ромб — квадрат

$$\mu_{\text{ср}} = \frac{A}{a} = 1,25 \div 1,35. \quad (64)$$

2. По принятой величине  $\mu_{\text{ср}}$  находят общую вытяжку металла за два прохода в ромбическом и квадратном калибрах

$$\mu_{\text{общ}} = \mu_{\text{р}} \mu_{\text{к}} = \mu_{\text{ср}}^2. \quad (65)$$

3. В любом случае в силу геометрии калибров вытяжка в ромбическом калибре всегда больше, чем в квадратном

$$\mu_{\text{р}} > \mu_{\text{к}}; \quad \mu_{\text{р}} = (1,1 \div 1,25) \mu_{\text{к}}. \quad (66)$$

4. На основании принятой средней величины вытяжки определяют размер  $a$  искомого квадрата из равенства (64).

5. Принимают отношение  $\frac{b}{h}$  ширины ромба к его высоте.

Это отношение может изменяться в большом диапазоне:

$$\frac{b}{h} = 1,5 \div 2,5, \quad (67)$$

но для средних величин вытяжек наиболее приемлемое отношение ширины к высоте ромба может быть

$$\frac{b}{h} = 1,5 \div 1,7.$$

6. На основании принятых величин  $\frac{b}{h}$ ,  $\mu_{\text{р}}$  и  $\mu_{\text{к}}$  по графикам (рис. 56) определяют показатели уширения в ромбическом и квадратном калибрах.

7. По величине уширения уточняют размеры промежуточного ромба.

8. Проверяют обжатия по предельным условиям захвата согласно уравнениям (60)—(63) с учетом материала валков и скорости прокатки (зависимости коэффициента трения от скорости прокатки).

Если по условиям захвата все размеры калибров приемлемы, на этом расчет режимов обжатий и определение размеров ромбического и квадратного калибров заканчивают. Данные расчета заносят в таблицу.

*Методика расчета по третьему варианту.* При заданных размерах исходного и конечного квадратов расчет значительно упрощается. Порядок расчета следующий.

1. Определяют среднюю величину вытяжки за один проход

$$\mu_{\text{ср}} = \frac{A}{a}$$

и общую вытяжку

$$\mu_{\text{общ}} = \mu_{\text{ср}}^2 = \frac{A^2}{a^2}.$$

2. Предварительно распределяют общую вытяжку между двумя проходами в ромбическом и квадратном калибрах согласно уравнениям (65) и (66).

3. Принимают отношение ширины ромба к его высоте. Далее придерживаются последовательности расчета, рекомендованной для первых двух вариантов (пункты 5—8).

Выводы всех уравнений для расчета калибров вытяжной системы ромб — квадрат приведены для ручьев с незакругленными углами, что значительно упрощает окончательные формулы. Практически в черновых калибрах обязательно предусматривают значительные закругления углов, что обеспечивает более плавное формоизменение металла по сечению раската и предотвращает быстрое охлаждение острых кромок профиля.

Площадь поперечного сечения квадрата с закруглениями углов (рис. 57) составляет

$$F_k = a^2 \left( 1 - 0,86 \frac{r^2}{a^2} \right). \quad (68)$$

Диагональ квадрата с учетом закруглений углов

$$a_c = a \left( 1,414 - 0,83 \frac{r}{a} \right), \quad (69)$$

где  $a$  — сторона квадратного сечения;

$r$  — радиус закругления.

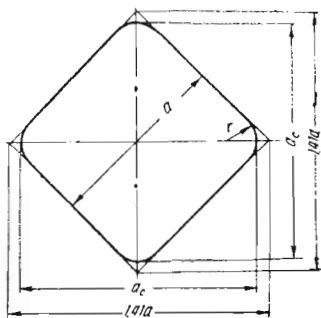
Практически  $\frac{r}{a} = 0,1 \div 0,2$ . Этому соответствует коэффициент уменьшения площади поперечного сечения

$$C_k = \frac{F_k}{a^2} = 1 - 0,86 \frac{r^2}{a^2} \approx 0,965 \div 0,99.$$

При расчете ромбических сечений соотношения имеют более сложный вид. Однако для расчета можно и для них принять такой же коэффициент уменьшения площади поперечного сечения, т. е.  $C_p = 0,965 \div 0,99$ .

Система вытяжных калибров ромб — квадрат находит применение в последних клетях станов, когда ставится задача получения квадратного сечения с высокой точностью размеров сторон.

В зависимости от принятых величин вытяжек в каждом проходе можно вывести определенное соотношение между размером стороны исходного квадрата, высотой и шириной ромбического калибра и стороной последующего квадрата. Эти зависимости представляют в виде соответствующих графиков, которые позволяют по одному из исходных размеров (задаваемого или конечного квадратного сечения) определять остальные размеры рассчитываемых калибров.

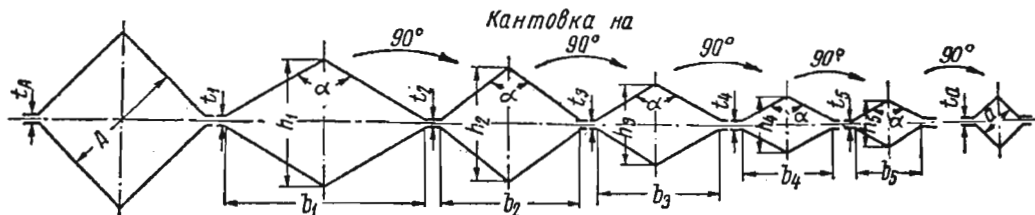


Р и с. 57. Основные размеры квадратного сечения с учетом радиусов закругления

В связи с тем что система калибров ромб — квадрат находит широкое применение при калибровке квадратной стали, графический метод расчета калибров этой системы подробно рассмотрен в гл. VIII.

## 2. Система калибров ромб — ромб

Систему геометрически подобных калибров ромб — ромб (рис. 58), при которой после каждого прохода раскат кантуют на  $90^\circ$ , применяют в настоящее время сравнительно редко. Ее используют главным обра-



Р и с. 58. Схема калибровки ромб—ромб для прокатки квадратной стали

зом для прокатки качественных сталей, когда по условиям пластической деформации допустимы лишь незначительные вытяжки. В этом случае исходную заготовку квадратного сечения со стороной  $A$  последовательно задают в ромбические калибры. Конечный проход производят в квадратном калибре со стороной  $a$ .

Расчетными положениями для системы ромб — ромб являются:

$$1,41 A > h_1; \quad h_1 < b_2; \quad h_2 < b_3; \quad h_3 < b_4; \quad h_4 < b_5; \quad h_5 < 1,41 a.$$

Коэффициенты вытяжки в системе ромбических калибров обычно не превышают значения  $\mu = 1,28 \div 1,3$ . Средние вытяжки для качественных сталей находятся в пределах  $\mu_{cp} = 1,15 \div 1,2$ .

Ромбические калибры строят на основе указанных коэффициентов вытяжки. Отношение высоты к ширине для ромбических калибров составляет

$$\frac{h}{b} = 0,7 \div 0,85.$$

В ряде случаев ромбические калибры строят по углу при вершине  
 $\alpha = 95 \div 97^\circ$ .

Для ряда последовательных ромбов выдерживают примерно соотношение

$$\frac{h_1}{b_2} = \frac{h_2}{b_3} = \frac{h_3}{b_4} = \frac{h_4}{b_5} = \dots = \frac{h_n}{b_{n+1}} = 0,93 \div 0,94.$$

Высоту первого ромба после исходного квадрата определяют по средней величине вытяжки или отношению

$$\frac{h_1}{1,41 A} = 0,9 \div 0,92,$$

тогда

$$\frac{h_1}{A} = 1,27 \div 1,3.$$

Расчет режимов обжатий и определение размеров калибров можно произвести по указанным выше соотношениям размеров.

#### *Расположение калибров на валках*

При расположении на бочке валков ромбических и квадратных калибров (ручьев) необходимо учитывать ширину буртов. Ширина буртов между калибрами обычно составляет половину глубины ручьев (или несколько больше). Ширину крайних буртов определяют в зависимости от габаритов вводной и выводной арматуры.

Необходимо обратить внимание на некоторые особенности расположения калибров на валках непрерывных станов. На этих станах клетки находятся друг от друга на близком расстоянии, в связи с чем надо стремиться к прямолинейности движения раската. Это особенно важно при многониточной прокатке на мелкосортных и проволочных станах. Поэтому те замечания, которые относились к расположению калибров по клетям непрерывных заготовочных станов (см. гл. III), во многом справедливы и здесь. Что же касается выбора величины давления валков, то можно рекомендовать верхнее давление, равное 1—1,5 мм. Однако за последнее время на наших металлургических заводах наблюдается тенденция вести прокатку валками одинакового диаметра.

## СИСТЕМЫ КАЛИБРОВ ОВАЛ — КВАДРАТ И ШЕСТИУГОЛЬНИК — КВАДРАТ

### 1. Характеристика систем калибров овал — квадрат и шестиугольник — квадрат

Система калибров овал — квадрат является одной из наиболее распространенных систем, применяемых на среднесортных, мелкосортных и проволочных станах. Более того, эту систему продолжительное время применяли даже на средних группах клетей крупносортных станов.

В настоящее время теорией и практикой доказана нецелесообразность применения этой системы на крупносортных и среднесортных станах; в последнее время систему овал — квадрат применяют в основном только на мелкосортных и проволочных станах. Преимуществом этой системы является обновление углов в квадратном сечении, что позволяет иметь одинаковую температуру раската по его сечению (рис. 59).

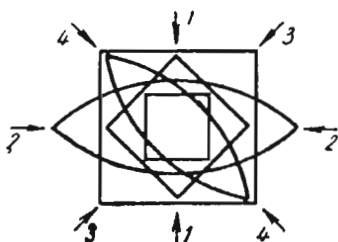


Рис. 59. Изменение направления обжатию при прокатке в системе калибров овал—квадрат. Цифрами показаны последовательность и направление обжатию

Данное обстоятельство важно как с точки зрения расчетов режимов обжатию и определения размеров калибров, так и технологического процесса прокатки в целом.

Однако система калибров овал — квадрат имеет и существенный недостаток: распределение вытяжек в каждой паре калибров всегда неравномерно — в овальном калибре вытяжка больше, чем в квадратном. Вследствие этого возникает неравномерное распределение нагрузок по клетям, неодинаковая нагрузка на электродвигатели.

Это подтверждается следующим расчетом. Пусть имеется исходная заготовка квадратного сечения со стороной  $A$ ; эту заготовку задают в овал с высотой  $h$  и шириной  $b$ . Далее овал задают в следующий квадратный калибр со стороной  $a$  (рис. 60). Для упрощения рассмотрим случай, когда квадратные калибры не имеют закруглений в вершинах углов. Применим принцип описанных прямоугольников, предложенный Б. П. Бахтиновым. Представим, что овал описан прямоугольником со сторонами  $b$  и  $h$ , а последующий квадрат описан квадратом со стороной  $a_0$ . Тогда вытяжка в овальном калибре

$$\mu_{ов} = \frac{F_A}{F_{ов}} = \frac{A^2}{\frac{2}{3}bh} \quad (70)$$

Вытяжка в квадрате, расположенном по диагонали, при прокатке в нем овала

$$\mu_{\text{кв}} = \frac{F_{\text{ов}}}{F_{\text{кв}}} = \frac{\frac{2}{3}bh}{\frac{1}{2}a_0^2}. \quad (71)$$

Построив около профилей описанные прямоугольник и квадрат, получим систему, подобную системе прямоугольных калибров, для которой при равенстве вытяжек в каждом проходе справедливо уравнение

$$bh = Aa_0.$$

Заменяя в уравнениях (70) и (71) произведение  $bh$  равнозначной величиной  $Aa_0$ , получаем:

$$\mu_{\text{ов}} = \frac{A^2}{\frac{2}{3}Aa_0} = \frac{3A}{2a_0};$$

$$\mu_{\text{кв}} = \frac{\frac{2}{3}Aa_0}{\frac{1}{2}a_0^2} = \frac{4A}{3a_0}.$$

Отношение вытяжек

$$\frac{\mu_{\text{ов}}}{\mu_{\text{кв}}} = \frac{9}{8} = 1,125. \quad (72)$$

Следовательно,  $\mu_{\text{ов}} > \mu_{\text{кв}}$ .

В частном случае, когда  $A = a_0 = 1,41 a$ , будем иметь:

$$\mu_{\text{ов}} = \frac{3}{2} = 1,5;$$

$$\mu_{\text{кв}} = \frac{4}{3} \approx 1,333,$$

или

$$\frac{\mu_{\text{ов}}}{\mu_{\text{кв}}} = \frac{1,5}{1,333} = 1,125.$$

Приравнивание  $A = a_0$  имеет физический смысл. Оно означает, что суммарная вытяжка распределяется по двум проходам равномерно

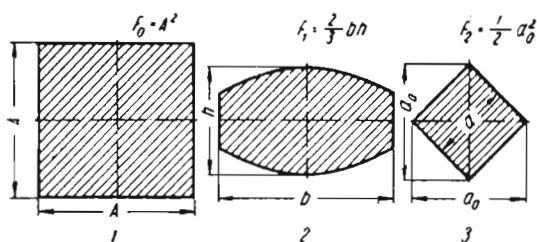
$$\mu_{\text{общ}} = \mu_{1-2} = \frac{F_A}{F_a} = \frac{A^2}{\frac{1}{2}a_0^2} = \frac{A^2}{\frac{1}{2}A^2} = 2.$$

Но  $\mu_{\text{общ}} = \mu_{\text{ов}} \cdot \mu_{\text{кв}} = \mu_{\text{ср}}^2 = 2$ .

Тогда средняя вытяжка

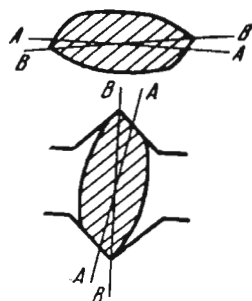
$$\mu_{\text{ср}} = \mu_{\text{кв}} = \mu_{\text{ов}} = \sqrt{2} = 1,41.$$

Для примера приведем расчет распределения величин вытяжек без учета закруглений, который затем можно пересчитать также для калибра с закруглениями.

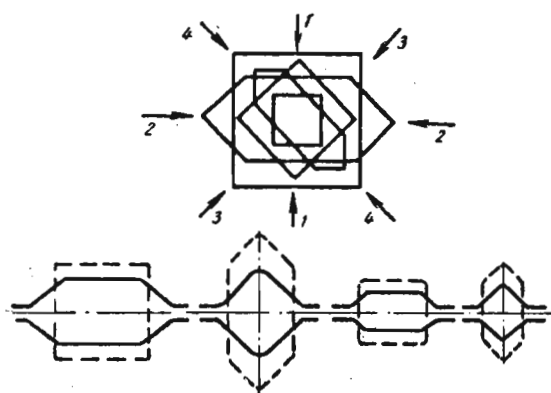


Р и с. 60. Схема прокатки квадратной заготовки в квадрат через промежуточный овал, вписанный в прямоугольник:

1 — заготовка; 2 — первый проход; 3 — второй проход



Р и с. 61. Положение неправильного овального раската в квадратном калибре



Р и с. 62. Система калибров шестиугольник—квадрат. Цифрами показаны последовательность и направление обжатия

Допустим, что исходный квадрат имеет размер стороны  $A=30$  мм; конечный квадрат после второго прохода по системе овал — квадрат имеет сторону  $a=20$  мм.

Вытяжки в каждом проходе:

$$\mu_{\text{ов}} = \frac{\frac{A^2}{2}}{\frac{2}{3}bh} = \frac{\frac{A^2}{2}}{\frac{2}{3}Aa_0} = \frac{3A}{2a_0} = \frac{3 \cdot 30}{2 \cdot 1,41 \cdot 20} = 1,59;$$

$$\mu_{\text{кв}} = \frac{\frac{2}{3}bh}{a^2} = \frac{\frac{2}{3}bh}{\frac{1}{2}a_0^2} = \frac{4Aa_0}{3a_0^2} = \frac{4 \cdot 30}{3 \cdot 1,41 \cdot 20} = 1,41.$$

Таким образом, если принять суммарную вытяжку в обоих проходах за 100%, то в овальном калибре она приближается к 60%, а в квадратном — к 40% от суммарной величины вытяжки.

Соотношение вытяжек позволяет судить о правильности выбранных размеров калибров системы овал — квадрат. Если при рассчитанной калибровке соотношение вытяжек находится в пределах  $\frac{\mu_{ов}}{\mu_{кв}} = 1,1 \div 1,2$ ,

то, следовательно, калибровка соответствует характеру формоизменения металла в калибрах системы овал — квадрат. Возможно, что указанное отношение будет меньше величины 1,1; это означает, что углы в квадратном калибре, расположенные по горизонтальной диагонали, не будут выполняться и раскат будет выходить с разностью диагоналей, что нежелательно. На практике возможны и случаи, когда отношение

$\frac{\mu_{ов}}{\mu_{кв}} > 1,2$ ; при этом будет увеличиваться неравномерность распределения вытяжек по калибрам, что также нежелательно. Один из существенных недостатков овального калибра заключается в том, что у прокатываемого в нем раската не всегда правильно формируются края, расположенные по горизонтальной оси. Такой раскат не будет устойчивым в квадратном калибре, исключается при этом и получение правильного квадратного сечения (рис. 61).

За последние годы все большее распространение получает система калибров шестиугольник — квадрат (рис. 62). Объясняется это тем, что в этой системе также происходит обновление углов у квадратного раската, дополнительно облегчаются условия кантовки металла при подаче в квадратный калибр. Это особенно важно для непрерывных станов.

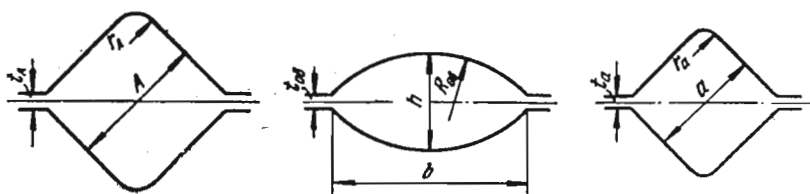
Применение шестиугольных калибров упрощает расточку валков и конструкцию валковой арматуры. В квадратном калибре положение шестигранного раската более устойчиво, чем овального. Наконец, в шестиугольном калибре деформация и вытяжка по ширине прокатываемого в нем квадратного раската более равномерны, чем в овальном; более равномерны обжатие и вытяжка также и в квадратном калибре при деформации в нем шестиугольного раската по сравнению с деформацией овального раската. При деформации шестиугольного раската в квадратном калибре вытяжка может быть больше, чем при обжатии в нем овального раската.

## 2. Расчет калибров системы овал — квадрат

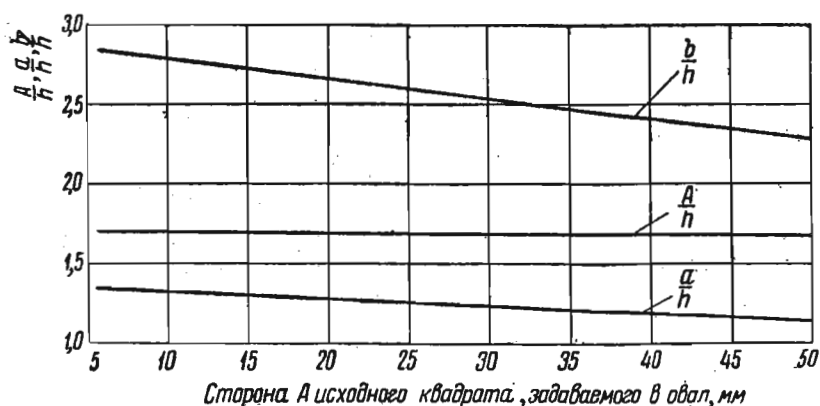
Аналитическое определение размеров овального и квадратного калибров сильно затруднено в связи со сложностью определения уширения в каждом из них.

Поэтому можно рекомендовать сравнительно простой, графический способ определения размеров калибров этой системы. Этот метод основан на зависимостях между размерами стороны задаваемого квадрата  $A$ , высоты и ширины овального калибра ( $h$ ,  $b$ ) и стороны получаемого квадрата  $a$ . Приведенные на графиках зависимости соответствуют положениям теории прокатки и конкретному характеру деформации.

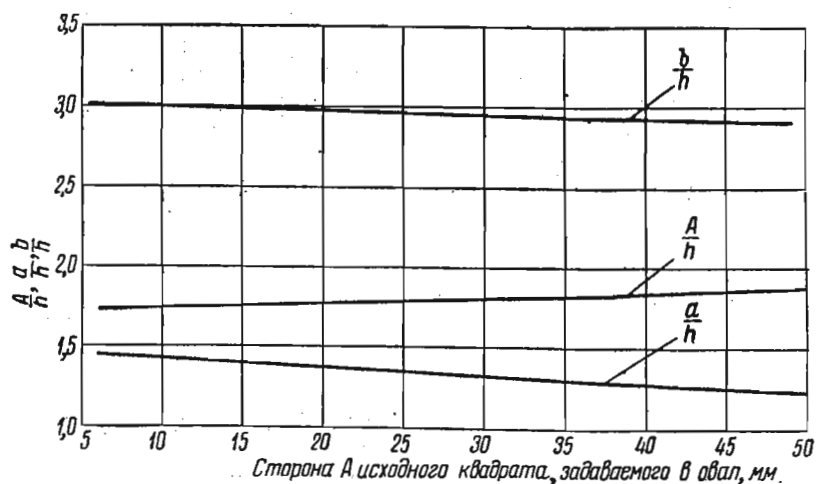
Данные зависимости получены опытным путем по средним величинам вытяжек, обеспечивающих вполне удовлетворительное заполнение металлом калибров этой системы. При определении размеров калибров по рекомендуемому методу из графика получают сразу окончательные размеры калибров, практически соответствующие размерам прокатываемых профилей. Как показали исследования, соотношения размеров



Р и с. 63. Элементы калибров системы овал—квадрат



Р и с. 64. Зависимость размеров овала и последующего квадрата от стороны А исходного квадрата



Р и с. 65. Зависимость размеров овала и последующего квадрата от стороны А исходного квадрата на проволочном стане

калибров (рис. 63) этой системы на мелкосортных станах отличны от таких же соотношений на проволочных станах. Поэтому графики (рис. 64 и 65) для определения размеров калибров построены отдельно для станов этих типов. Объясняется это тем, что на проволочных станах,

при узком сортаменте прокатываемых профилей, обеспечиваются более высокие частные вытяжки. В настоящее время на многих непрерывных проволочных станах страны достигнута величина средней вытяжки, равная 1,385.

Систему овал — квадрат в большей мере применяют для средних и предчистовых групп клетей. Черновые клетки калибруют по системе ящичный квадрат — прямоугольник — ящичный квадрат или квадрат — шестиугольник — квадрат.

### *Методы расчета для мелкосортных станов*

*Первый метод.* Допустим, необходимо определить размеры калибров системы овал — квадрат при стороне  $A$  исходного квадрата, равной 45 мм.

По графику (см. рис. 64) для  $A=45$  мм находим:

$$\frac{A}{h} = 1,68; \quad \frac{a}{h} = 1,16; \quad \frac{b}{h} = 2,35.$$

Тогда высота овала

$$h = \frac{A}{1,68} = \frac{45}{1,68} = 26,8 \text{ мм.}$$

Зазор между валками принимаем по графику, показанному на рис. 87, б (см. ниже) или по зависимостям:

$$t_A = (0,15 \div 0,2) A; \quad t_a = (0,15 \div 0,2) a; \quad t_{ов} = (0,15 \div 0,2) h.$$

Принимаем для нашего случая

$$t_{ов} = 0,15h = 0,15 \cdot 26,8 = 4,0 \text{ мм;}$$

ширина овала

$$b = 2,35h = 2,35 \cdot 26,8 = 63 \text{ мм;}$$

радиус очертания овала

$$R_{ов} = \frac{b^2 + (h - t_{ов})^2}{4(h - t_{ов})} = \frac{63^2 + (26,8 - 4,0)^2}{4(26,8 - 4,0)} = 49,25 \text{ мм;}$$

сторона последующего квадрата

$$a = 1,16h = 1,16 \cdot 26,8 \approx 31 \text{ мм.}$$

Зазор в исходном квадрате  $t_A = 5$  мм. Зазор в конечном квадрате  $t_a = 4$  мм. Радиусы закругления в вершинах квадратов принимаем соответственно 5 и 4 мм.

Площади калибров:

$$F_A = 45^2 - 0,86 \cdot 25 = 2004 \text{ мм}^2;$$

$$F_{ов} = \frac{2}{3} b(h - t_{ов}) + bt_{ов} = \frac{2}{3} 63 \cdot 22,8 + 63 \cdot 4,0 = 1212 \text{ мм}^2;$$

$$F_a = 31^2 - 0,86 \cdot 16 = 947 \text{ мм}^2.$$

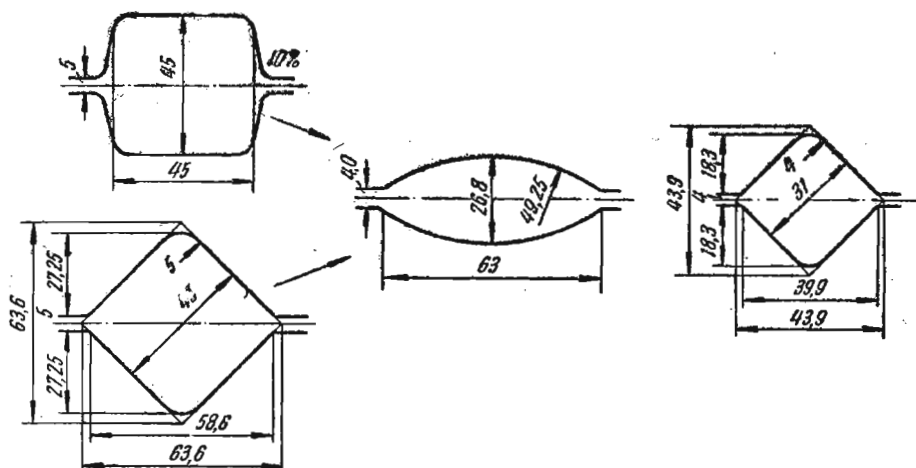
Вытяжка в овальном калибре

$$\mu_{ов} = \frac{F_A}{F_{ов}} = \frac{2004}{1212} \approx 1,65;$$

вытяжка в конечном квадратном калибре

$$\mu_a = \frac{F_{ов}}{F_a} = \frac{1212}{947} = 1,28.$$

Результаты расчета приведены на рис. 66.



Р и с. 66. Калибры системы овал—квадрат, рассчитанные по графику на рис. 64

*Второй метод.* Если заранее заданы стороны исходного  $A$  и конечного  $a$  квадратов, то вначале определяют ширину овала, в котором будет прокатываться исходный квадрат со стороной  $A$ . Затем по стороне  $a$  конечного квадрата находят высоту  $h$  овала.

Пусть из квадрата со стороной  $A=30$  мм требуется получить квадрат со стороной  $a=21$  мм. Определить размеры овала.

Для  $A=30$  мм по графику (см. рис. 64) находим  $\frac{A}{h}=1,69$  и  $\frac{b}{h}=2,53$ . Тогда

$$h = \frac{A}{1,69} = \frac{30}{1,69} = 17,75 \text{ мм};$$

$$b = 2,53h = 2,53 \cdot 17,75 = 45 \text{ мм}.$$

Для нахождения фактической высоты овала следует взять отношение  $\frac{a}{h}$  при  $a$ , равной условной ширине исходного квадрата  $A_{yc}=21$  мм, так как конечный квадратный калибр будет нормально заполнен в том случае, если стороне  $a$  будет соответствовать вполне определенное отношение  $\frac{a}{h}$ . В нашем случае  $\frac{a}{h}=1,28$ .

Тогда действительная высота овала

$$h = \frac{a}{1,28} = \frac{21}{1,28} = 16,40 \text{ мм}.$$

Округлив, получим окончательно  $h=16,5$  мм.

Принимаем зазоры между валками и радиусы закругления в вершинах  $t_A=4$  мм,  $r_A=4$  мм,  $t_{ов}=3$  мм,  $r_a=3$  мм,  $t_a=3$  мм. Далее определяем площади калибров и вытяжки в них.

Для нашего примера радиус очертания овала

$$R_{ов} = \frac{45^2 + (16,5 - 3)^2}{4 \cdot 13,5} = 40,9 \text{ мм};$$

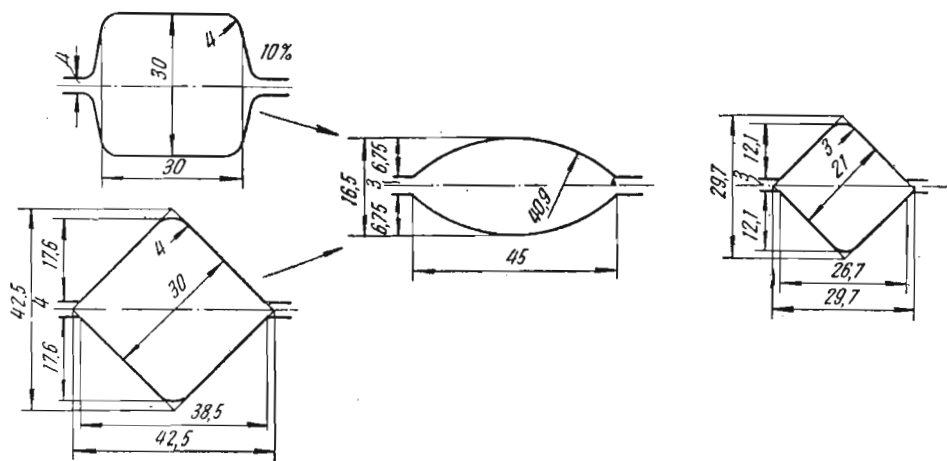


Рис. 67. Калибры системы овал — квадрат, рассчитанные по заданным сторонам квадратов

площади сечения:

$$F_A = 30^2 - 0,86 \cdot 16 = 886 \text{ мм}^2;$$

$$F_{\text{ов}} = \frac{2}{3} 45 \cdot 13,5 + 45 \cdot 3 = 540 \text{ мм}^2;$$

$$F_a = 21^2 - 0,86 \cdot 9 = 433 \text{ мм}^2;$$

вытяжки:

$$\mu_{\text{ов}} = \frac{886}{540} = 1,64; \mu_a = \frac{540}{433} = 1,25.$$

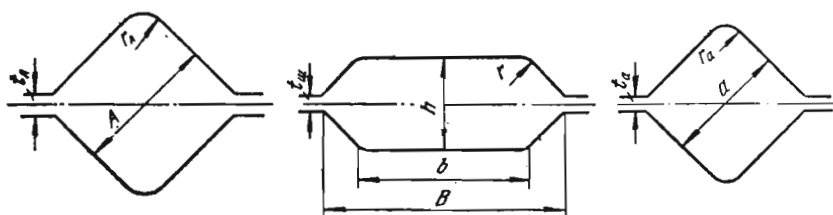
Результаты расчетов приведены на рис. 67.

Методика расчета калибров системы овал — квадрат для черновых и средних групп клетей проволочных станов аналогична приведенной выше; расчет калибров в данном случае следует вести при помощи графика на рис. 65. Можно рассчитывать калибры для мелкосортных и проволочных станов только с помощью одного графика (см. рис. 64), составленного для мелкосортных станов. График, составленный для проволочных станов (см. рис. 65), следует использовать тогда, когда необходимы более высокие вытяжки. Более интенсивные вытяжки, применяемые на проволочных станах, объясняются стремлением уменьшить падение температуры металла, что особенно важно при малых сечениях катанки. Высокие коэффициенты деформации вызывают повышение температуры прокатываемого металла, что облегчает условия получения заданного профиля.

### 3. Расчет калибров системы шестиугольник — квадрат

Система калибров шестиугольник — квадрат находит широкое применение на черновых и средних группах клетей мелкосортных и проволочных станов.

В связи с тем, что расчет уширения при обжатии квадратного раската в шестиугольном калибре и далее шестигранного раската в квадратном калибре (рис. 68) затруднителен, рекомендуется пользоваться спе-



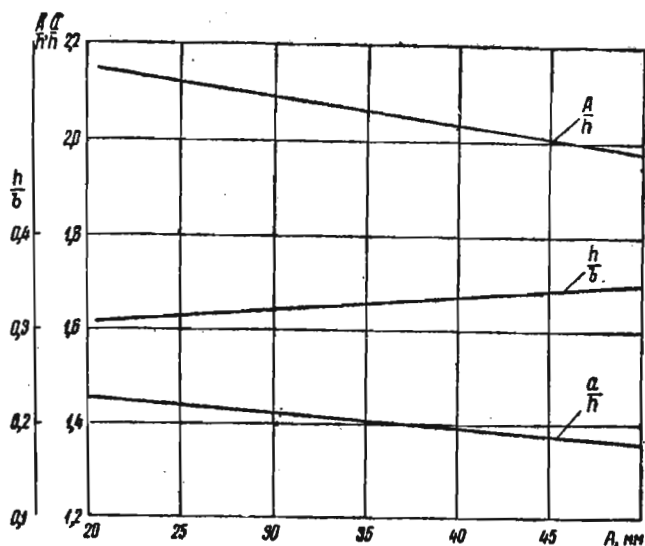
Р и с. 68. Элементы калибров системы шестиугольник—квадрат

циальным графиком (рис. 69), построенным исходя из анализа практических данных для случая, когда боковые стенки калибров имеют угол наклона  $45^\circ$ .

Зазоры между валками  $t_A$ ,  $t_{ш}$  и  $t_a$  определяют по графику на рис. 87, б (см. ниже) или они могут быть приняты из соотношений:

$$t_A = (0,15 \div 0,2) A; \quad t_a = (0,15 \div 0,2) a; \quad t_{ш} = (0,15 \div 0,2) h.$$

Высоту  $h$  шестиугольного калибра и его общую ширину  $B$  находят по графику, исходя из соответствующих соотношений.



Р и с. 69. Зависимость основных размеров калибров системы шестиугольник—квадрат от стороны  $A$  исходного квадрата

Ширина  $b$  по дну калибра может быть получена после определения зазора  $t_{ш}$  графическим построением (если наклон боковых стенок под углом  $45^\circ$ ), либо аналитически по выражению

$$b = (0,85 \div 1,05) A.$$

#### Методы расчета калибров

*Первый метод.* Допустим, необходимо определить размеры шестиугольного калибра и сторону последующего квадрата, если исходный квадрат имеет сторону  $A=45$  мм и радиус закругления углов  $r_A = 5$  мм.

По графику (см. рис. 69) имеем:  $\frac{A}{h} = 2,008$ ;  $\frac{a}{h} = 1,374$ ;  $\frac{h}{B} = 0,342$ .

Площадь исходного квадрата

$$F_A = 45^2 - 0,86 \cdot 5^2 = 2004 \text{ мм}^2.$$

Высота шестиугольного калибра

$$h = \frac{A}{2,008} = \frac{45}{2,008} = 22,4 \text{ мм};$$

общая ширина шестиугольного калибра

$$B = \frac{h}{0,342} = \frac{22,4}{0,342} = 65,6 \text{ мм}.$$

Округлим этот результат до значения  $B = 65 \text{ мм}$ .

Ширина по дну ручья определится, если принять

$$t_{\text{ш}} = 0,2h = 0,2 \cdot 22,4 = 4,5 \text{ мм}.$$

Тогда при наклоне боковых сторон под углом  $45^\circ$

$$b = B - (h - t_{\text{ш}}), \quad (73)$$

или

$$b = 65 - (22,4 - 4,5) \approx 47 \text{ мм}.$$

Площадь шестиугольного калибра

$$F = 2 \left( \frac{B+b}{2} \right) \left( \frac{h-t_{\text{ш}}}{2} \right) + B t_{\text{ш}} = \left( \frac{B+b}{2} \right) (h - t_{\text{ш}}) + B t_{\text{ш}},$$

или

$$F = \left( \frac{65 + 47}{2} \right) (22,4 - 4,5) + 65 \cdot 4,5 = 1292 \text{ мм}^2.$$

Радиус закругления углов в шестиугольном калибре рекомендуется принимать

$$r = (0,45 \div 0,5) h.$$

Для расчета принимаем  $r = 0,45 \cdot 22,4 \approx 10 \text{ мм}$ .

Сторона последующего квадрата

$$a = 1,374h = 1,374 \cdot 22,4 \approx 31 \text{ мм}.$$

Площадь сечения квадрата при радиусе закругления  $r_a = 4 \text{ мм}$

$$F_a = 31^2 - 0,86 \cdot 4^2 = 946 \text{ мм}^2.$$

Вытяжка в шестиугольном калибре

$$\mu_{\text{ш}} = \frac{2004}{1292} = 1,55.$$

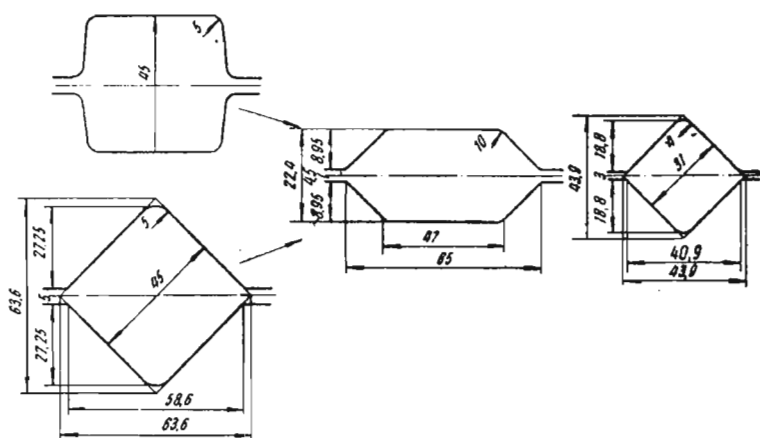
Вытяжка в последующем квадратном калибре

$$\mu_a = \frac{1292}{946} = 1,365.$$

Результаты расчетов показаны на рис. 70.

*Второй метод.* Если средняя вытяжка между квадратными калибрами превышает величину, на которую рассчитан график на рис. 69, то последовательность расчета будет иная.

Пусть заданы стороны исходного и конечного квадратов  $A = 45 \text{ мм}$  и  $a = 29,5 \text{ мм}$ . Определить размеры  $h$ ,  $B$  и  $b$  промежуточного шестиугольника.



Р и с. 70. Калибры системы шестиугольник—квадрат, рассчитанные по графику

Общая ширина шестиугольника должна удовлетворять условию заполнения калибра при обжатии в нем исходного квадратного раската со стороной  $A=45$  мм.

Для определения  $B$  находим по рис. 69 условную высоту  $h_{yc}$  шестиугольника:

$$\frac{A}{h_{yc}} = 2,008, \text{ откуда } h_{yc} = 22,4 \text{ мм.}$$

Действительная ширина шестиугольника будет

$$\frac{h_{yc}}{B} = 0,342 \text{ или } B \approx 65 \text{ мм.}$$

Высота  $h$  шестиугольника определится из условия, что последующий квадрат со стороной  $a$  не должен переполняться при обжатии в нем шестигранного раската.

Тогда, приняв сторону  $a=29,5$  мм за условный размер  $A_{yc}$  стороны исходного квадрата, по графику (рис. 69) находим отношение  $\frac{a}{h} = 1,422$ .

Следовательно,

$$h = \frac{a}{1,422} = \frac{29,5}{1,422} = 20,7 \text{ мм.}$$

Ширина по дну калибра по формуле (73) составит

$$b = 65 - (20,7 - 4,5) \approx 49 \text{ мм.}$$

Таким образом, шестиугольник будет иметь размеры:  $h=20,7$  мм,  $B=65$  мм и  $b=49$  мм.

Далее определяем коэффициенты вытяжки по калибрам и вычерчиваем сами калибры.

### *Построение калибров и определение величины обжатия в них*

Построение квадратного калибра рассмотрено ранее. Шестиугольный и овальный калибры обычно строят в следующем порядке.

1. Относительно горизонтальной оси откладывают размеры зазора и общую ширину калибра. По вертикальной оси от центра пересечения



с горизонтальной осью откладывают по обе стороны половину высоты калибра.

2. Для овального калибра радиусом, найденным по формуле

$$R = \frac{b^2 + (h - t_{\text{ов}})^2}{4(h - t_{\text{ов}})},$$

проводят дуги. При проведении дуг верхнего и нижнего ручьев каждая из них должна проходить через все три точки: две крайние, определяющие ширину калибра, и верхнюю — границу высоты калибра.

3. Для шестиугольного калибра через точки высоты калибра проводят прямые, параллельные горизонтальной оси. Затем рассчитывают значение ширины дна ручья и проводят боковые стенки под углом  $45^\circ$  или определяют общую ширину калибра (см. рис. 69). Далее производят окончательное построение калибра.

4. Площади калибров определяют по формулам, приведенным в примерных расчетах.

Обжатие квадратного раската в овальном и шестиугольном калибрах определяют по приведенным высотам этих калибров:  $\Delta h_{\text{пр}} = A - h_{\text{пр}}$ . Если необходимо производить деформацию овального или шестиугольного раската в последующем квадратном калибре, то обжатие следует определять как разность приведенных высот овала (шестиугольника) и квадрата. При этом высоты этих фигур должны быть приведены соответственно к ширине  $h$  (бывшей высоте овала, шестигранника) и диагонали  $1,41 a$  квадрата. Найденные величины приведенных обжатий можно проверить по условиям захвата металла валками или по максимальным углам захвата.

#### *Расположение калибров на валках*

Овальные и шестиугольные калибры являются простейшими. Они имеют две оси симметрии, перпендикулярные между собой. При расположении на валках ось симметрии овального или шестиугольного калибра совмещают со средней линией валков, если не предусматривают какое-либо (верхнее или нижнее) давление.

Число калибров на бочке валков определяют исходя из типа стана, числа калибров на валках предшествующей и последующей клетей (для непрерывных групп клетей), конструкции валковой арматуры и т. д. Ширину крайних буртов определяют в зависимости от габаритов вводной и выводной арматуры. Ширина буртов между калибрами обычно составляет половину глубины ручья или ее принимают конструктивно  $5 \div 10$  мм.

На рис. 71 показана калибровка валков черновой группы клетей мелкосортного стана 250 с различными калибрами.

На чертеже показаны одинаковые межосевые расстояния по калибрам на всех клетях, что важно для процесса непрерывной прокатки.

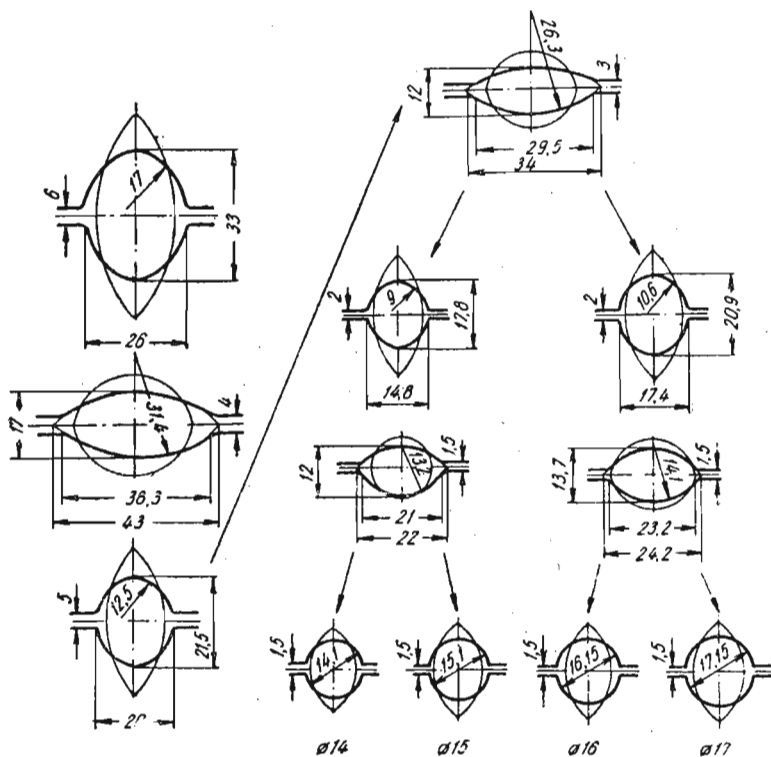
# СИСТЕМЫ КАЛИБРОВ

## ОВАЛ—ВЕРТИКАЛЬНЫЙ ОВАЛ, ОВАЛ—КРУГ, ОВАЛ — СТРЕЛЬЧАТЫЙ КВАДРАТ И ДРУГИЕ

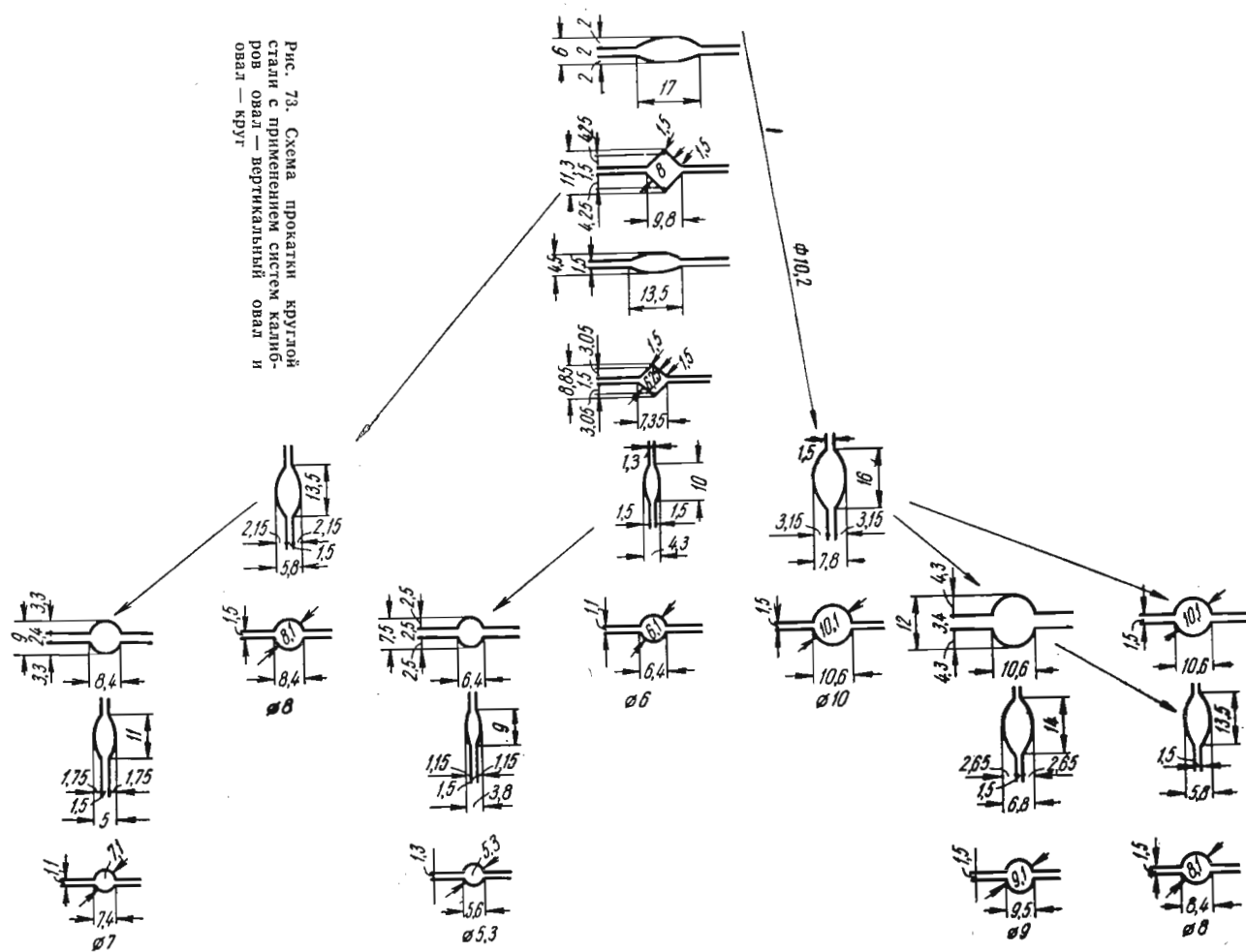
### 1. Система овал — вертикальный овал

Систему овал — вертикальный овал часто применяют в последних группах клетей непрерывных мелкоsortных и проволочных станов (рис. 72 и 73).

Преимущество системы овал — вертикальный овал заключается в том, что в вертикальном овале хорошо обрабатываются острые части задаваемого овального раската. Последующая прокатка раската, вышедшего из горизонтального овала, в любом другом калибре (вертикальном овале, круглом калибре, стрелчатом или обычном квадрате) происходит без образования дефектов, связанных с резким истиранием калибра острыми частями овала. Главное же преимущество данной системы калибров заключается в ее универсальности. Как следует из рис. 72 и 73, при прокатке круглой стали ряда размеров используются од-



Р и с. 72. Схема прокатки круглой стали с применением системы калибров овал — вертикальный овал



ни и те же овальные калибры при изменении лишь зазоров по буртам. Такая универсальность уменьшает непроизводительные простои стана, связанные с переходами и перевалками; уменьшается парк валков, улучшается их использование; сокращается число схем прокатки профилей всего сортамента стана.

При использовании этой системы упрощается и настройка стана, так как в вертикальном овале контролируется главным образом высота раската, заполнение же вертикального овала по ширине не всегда предусматривают и обычно его принимают предположительно. Благодаря большой разности ширины и толщины раскат, выходя из вертикального овала, кантуется сам и занимает устойчивое положение при деформации в горизонтальном овале.

С точки зрения качества поверхности прокатываемого металла и условий его деформации в горизонтальном овале необходимо еще отметить как положительный фактор равномерность или близость к ней деформации раската по ширине.

На непрерывных группах клетей искажение площади поперечного сечения раската в квадратном калибре приводит к некоторому нарушению принципа непрерывности процесса — константа стана увеличивается или уменьшается. При деформации же в вертикальном овале заметного искажения сечения металла не происходит, так как осуществляется плавное закругление острых частей задаваемого овального раската.

Однако система калибров овал — вертикальный овал имеет один весьма существенный недостаток, который ограничивает область применения ее на многих станах. В частности, в вертикальном овале нельзя обеспечить высокую вытяжку, вследствие чего получается большая недогрузка клетей с вертикальными овалами. Поэтому не используется полностью проектная мощность стана. Средняя вытяжка в вертикальном овале достигает значения  $\mu_{\text{ср}} = 1,2 \div 1,22$ . Перенесение же части нагрузки на клетки с горизонтальными овалами крайне нежелательно. Кроме того, в вертикальном овале нет обработки раската по всему периметру. В направлении горизонтальной оси вертикального овала металл с калибром не соприкасается.

#### *Построение вертикального овального калибра. Определение величины обжатия*

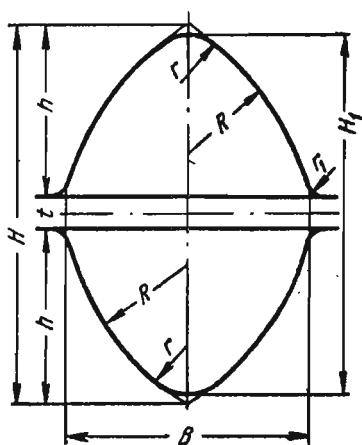
Вертикальные овальные калибры могут быть построены по двум вариантам.

На рис. 74 показан первый вариант построения, который сводится к следующему. По известной высоте  $H$  и ширине  $B$  вначале проводят дуги радиусом  $R$ , затем закругляют их вершины радиусом  $r$ . В результате получается действительная высота овала  $H_1$ . Аналитически величина  $H_1$  определяется по весьма сложному уравнению, поэтому рекомендуется определять ее графическим построением калибра.

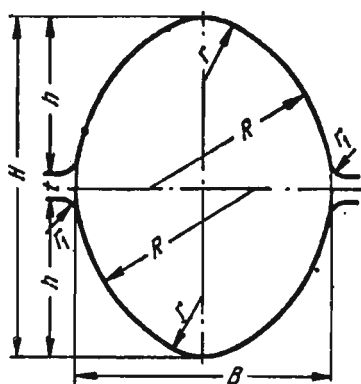
Второй вариант построения вертикального овала (рис. 75) сводится к тому, что по известной высоте  $H$ , ширине  $B$  и радиусу закругления  $r$  овала вначале очерчивают вершины, а затем проводят к разъему и вершинам калибра сопрягающие дуги радиусом  $R$ .

Расчет калибров следует вести против хода прокатки. Расчетные данные для построения вертикального овала основываются на следующих технологических особенностях.

Дальнейшую прокатку раската, вышедшего из вертикального овала, в последующем горизонтальном овале можно считать протекающей



Р и с. 74. Вариант построения вертикального овала при первоначальном очертании дуг радиусом  $R$



Р и с. 75. Вариант построения вертикального овала применительно к первоначальному закруглению вершин радиусом  $r$

в условиях почти равномерной деформации. Тогда высота  $H$  вертикального овала должна быть меньше ширины горизонтального овала на величину уширения

$$H = b - \Delta b.$$

Уширение в овале можно приближенно рассчитать по одной из ранее приведенных формул. При этом ширина вертикального овала может быть определена по принимаемому заранее коэффициенту  $\eta_{ов}$  высотной деформации в горизонтальном овале

$$B = \eta_{ов} h.$$

При расчетах уширения обжатие в горизонтальном овале можно принимать как разность абсолютных значений

$$\Delta h = B - h.$$

или определить по приведенной ширине вертикального овала и приведенной толщине горизонтального овала.

Радиус  $R$  подбирают по конструктивным точкам вертикального овала; его величина находится в пределах

$$R = (0,7 \div 1,0) B.$$

Радиусы закруглений:

$$r = (0,2 \div 0,25) R;$$

$$r_1 = (0,5 \div 0,75) r.$$

Зазор между валками

$$t_{в.о} = (0,1 \div 0,15) H.$$

Чем больше действительная высота вертикального овала, тем большим должен быть коэффициент при  $H$ .

Обжатие в вертикальном овале можно определять двумя методами: по абсолютной разности ширины предшествующего горизонтального овала и высоты вертикального овала:

$$\Delta h = b - H; \quad (74)$$

по разности приведенных высот задаваемого раската овального сечения и вертикального овала

$$\Delta h_{пр.во} = H_{пр} - h_{пр}, \quad (75)$$

где

$H_{пр} = \frac{F_{ов.г}}{h_{ов.г}}$  — приведенная высота горизонтального овала с учетом положения его в вертикальном овале;

$h_{пр} = \frac{F_{ов.в}}{B_{ов.в}}$  — приведенная высота вертикального овала.

Рассмотрим конкретный пример определения размеров горизонтального и вертикального овальных калибров.

Допустим, необходимо рассчитать предовальный калибр формы вертикального овала для прокатки круглой стали диаметром 50 мм. При таком размере круглого профиля (см. рис. 87, б) высота предчистового овала должна быть  $h = 46,5$  мм, а ширина калибра  $b = 71,5$  мм.

Задаемся коэффициентом высотной деформации в предчистовом овале  $\eta_{ов} = 1,35$ .

Тогда ширина вертикального овала

$$B = 1,35 \cdot 46,5 = 62,8 \text{ мм.}$$

Обжатие в предчистовом овале (условное для приближенного расчета)

$$\Delta h = 62,8 - 46,5 = 16,3 \text{ мм.}$$

При катающем диаметре валков предчистового овала  $D_k = 320$  мм (принимаем только для примера) уширение в овальном калибре составит (приближенно)

$$\Delta b = 0,35 \frac{16,3}{62,8} \sqrt{16,3 \cdot 160} \approx 5 \text{ мм.}$$

Высота вертикального овала

$$H = 71,5 - 5 = 66,5 \text{ мм;}$$

при зазоре  $t = 5$  мм высота каждого ручья

$$h = \frac{H - t}{2} = \frac{66,5 - 5}{2} = 30,75 \text{ мм;}$$

радиус очертания боковых сторон находится в пределах

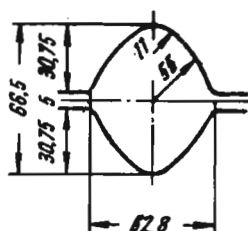
$$R = (0,7 \div 1,0) 62,8 = 44,0 \div 63,0 \text{ мм.}$$

Примем  $R = 55 \text{ мм}$ ;

малый радиус закругления

$$r = 0,2R = 0,2 \cdot 55 = 11 \text{ мм.}$$

По полученным данным строим калибр (рис. 76).



Р и с. 76. Предовальный калибр для прокатки круглой стали по системе калибровки вертикальный овал—горизонтальный овал—круг по схеме VII (см. рис. 82)

Таким образом, методика расчета вертикального и горизонтального овальных калибров следующая.

Расчет ведем против хода прокатки. Вначале определяем размеры предчистового горизонтального овала.

Принимаем коэффициент высотной деформации для горизонтально-го овала как отношение ширины вертикального овала к высоте горизонтального овала

$$\eta_{г.о} = \frac{B_{в.о}}{h_{г.о}}$$

в пределах 1,1—1,5 в зависимости от поставленной практической задачи.

Определяем ширину вертикального овала

$$B_{в.о} = \eta_{г.о} h_{г.о}$$

Определяем уширение в горизонтальном овале по одной из приведенных выше формул; обжатие рассчитываем по равенствам (74)—(75).

Определяем высоту вертикального овала как разность ширины горизонтального овала и уширения в нем.

Принимаем: зазор  $t$ , радиусы очертания  $R$ ,  $r$  и  $r_1$ . Затем строим калибр вертикального овала.

Размеры предшествующего горизонтального овала по найденным размерам вертикального овала рекомендуется определять следующим образом.

Принимаем коэффициент высотной деформации в вертикальном овале

$$\eta_{в.о} = \frac{b_{г.о}}{H_{в.о}}.$$

Значения  $\eta_{в.о}$  можно принимать, как и для  $\eta_{г.о}$ . По принятому коэффициенту высотной деформации и известной высоте вертикального овала определяем ширину предшествующего горизонтального овала:

$$b_{г.о} = \eta_{в.о} H_{в.о}.$$

Определяем обжатие в вертикальном овале

$$\Delta h_{в.о} = b_{г.о} - H_{в.о}.$$

По одной из формул определяем уширение в вертикальном овале по найденному обжатию  $\Delta h_{в.о}$ .

Тогда высота предшествующего горизонтального овала определится как разность ширины вертикального овала и уширения в нем:

$$h_{г.о} = B_{в.о} - \Delta b_{в.о}.$$

Окончательное построение горизонтального овала производим по рекомендациям, изложенным ранее.

## 2. Система калибров овал — круг

Систему калибров овал — круг применяют главным образом в предчистовых клетях, когда прокатывают круглую и шестигранную сталь, а также ряд других профилей, для которых в качестве предчистового может служить круглый калибр. Кроме того, эту систему используют в случае, когда по одной и той же схеме прокатывают круглую сталь нескольких размеров — от меньшего размера к большему. В последнем случае вначале прокатывают профиль минимального диаметра. Затем отключают последние две клетки, и начинают прокатку профиля большего размера. Далее, если в схеме имеется еще один профиль круглой стали, то отключают еще две клетки и вновь начинают прокатку профиля большего диаметра (см. рис. 73).

Положительной стороной системы овал — круг является ее высокая универсальность: черновые круглые калибры можно использовать как чистовые при прокатке круглой стали различных диаметров.

Систему овал — круг с успехом применяют и при прокатке металла с пониженными пластическими свойствами, так как форма калибров этой системы обеспечивает плавный переход от одного сечения к другому. Отсутствие острых углов в сечениях раската способствует повышению стойкости чистового калибра и получению чистового профиля с высоким качеством поверхности. Однако система овал — круг имеет и существенные недостатки, основные из которых: сравнительно низкие вытяжки, неравномерная деформация по ширине профиля и неустойчивость овала в круглом калибре.

### *Расчет предовального круглого калибра*

В основном систему овал — круг применяют при прокатке круглой или шестигранной стали. Рассмотрим принцип расчета круглого калибра, расположенного перед овальным (по ходу прокатки).

Расчет предовального круга сводится к определению его диаметра. Обычно при этом задаются средней величиной вытяжки, определяемой отношениями диаметров предовального  $d_{нр}$  и чистового  $d$  кругов:

$$\mu_{ср} = \frac{d_{нр}}{d}. \quad (76)$$

Средняя величина вытяжки может приниматься в пределах 1,1—1,35.

В этом случае необходимо привести в соответствие диаметр предовального круга с шириной предчистового овала, чтобы не было переполнения овального калибра. Для этого следует учесть, что

$$d_{нр} = B - \Delta b.$$

Строгой зависимости между размерами задаваемого круга и последующего овала (в данном случае предчистового) не имеется. Ее определяют только упомянутыми выше практическими соображениями.

Обжатие в овальном калибре при деформации в нем круглого раската должно определяться по приведенным размерам. Приблизительно это может быть определено из формулы

$$\Delta h = d_{\text{пр}} - h. \quad (77)$$

*Пример.* Для круглой стали диам. 50 мм и найденным для нее размерам предчистового овального калибра  $h=46,5$  мм,  $b=71,5$  мм и  $t=5$  мм определить диаметр  $d_{\text{пр}}$  предовального круга по системе калибровки круг — овал — круг. Катающий диаметр валков овального калибра  $D_{\text{ов}} = 320$  мм.

Зададимся средней вытяжкой между предовальным и чистовым кругами  $\mu_{\text{ср}} = 1,16 \div 1,25$ .

$$\text{Принимаем } \mu_{\text{ср}} = \frac{d_{\text{пр}}}{d} = 1,16.$$

Тогда диаметр профиля в горячем состоянии

$$d_{\text{пр}} = 1,16d \cdot 1,013 = 1,16 \cdot 50 \cdot 1,013 = 58,75 \text{ мм}$$

обжатие в овальном калибре

$$\Delta h = d_{\text{пр}} - h = 58,75 - 46,5 = 12,25 \text{ мм};$$

уширение (приблизительно)

$$\Delta b = 0,35 \frac{12,25}{58,75} \sqrt{160 \cdot 12,25} = 3,2 \text{ мм}.$$

Следовательно, овальный калибр заполнится на ширину

$$B = d_{\text{пр}} + \Delta b = 58,75 + 3,2 = 61,95 \approx 62 \text{ мм}.$$

По ширине овального калибра диаметр предчистового круга можно увеличить до 62 мм. Это будет соответствовать средней вытяжке

$$\mu_{\text{ср}} = \frac{62}{50 \cdot 1,013} = 1,225.$$

Проверим уширение в овальном калибре:

$$\Delta h = 62 - 46,5 = 15,5 \text{ мм};$$

$$\Delta b = 0,35 \frac{15,5}{62} \sqrt{160 \cdot 15,5} = 4,5 \text{ мм}.$$

Фактически овальный калибр заполнится на ширину

$$B = 62 + 4,5 = 66,5 \text{ мм}.$$

Оставшиеся свободными несколько миллиметров ширины овала могут быть заполнены металлом при возможном изменении условий деформации (температуры, коэффициента трения и т. д.).

#### *Расчет круглого калибра*

Расчет калибров ведут против хода прокатки. По известному размеру чистового круга определяют диаметр предовального круга по принимаемой средней вытяжке в паре калибров согласно равенству (76). Этот диаметр определяют с учетом горячей усадки металла. Далее проверяют ширину овального калибра, в котором будет деформироваться круглый раскат, выходящий из круглого калибра. Уширение определяют по одной из известных формул, а обжатие круга в овале — по формуле (77).

Если же в результате расчетов уширения и проверки заполнения овального калибра будет обнаружено его переполнение, то следует произвести перерасчет круглого калибра в направлении уменьшения диаметра. Если же имеется значительное незаполнение овального калибра, то необходимо увеличить диаметр круга.

#### *Расчет овального калибра, расположенного перед круглым*

Размеры овального калибра перед круглым определяют по известным зависимостям, которые представлены в виде графиков на рис. 87. По существу здесь рассчитывают калибры, предназначенные для получения готового круглого профиля.

Построение овального и круглого калибров рассмотрено ранее. Наиболее точное построение круглого калибра приведено в гл. VII.

### **3. Система калибров овал — стрелчатый квадрат**

Система калибров овал — стрелчатый квадрат находит применение в предчистовых проходах на мелкосортных и проволочных станах. По своей форме стрелчатый квадрат в значительной мере напоминает вертикальный овал, но только с увеличенным наклоном боковых дуг. Условия деформации раската овального сечения в стрелчатом квадрате также близки к деформации его в вертикальном овале.

Прокатка раската, вышедшего из стрелчатого квадрата, в последующем овальном калибре, происходит в условиях, близких к равномерной деформации по ширине.

Стрелчатый квадрат применяют в том случае, когда необходимо передать большое сечение металла к чистовым проходам. При этом сохраняется квадратная форма и высокая температура раската, так как отсутствуют острые углы (ребра). При деформации стрелчатого квадрата в последующем овальном калибре происходит обновление углов. Температура по сечению раската при этом сохраняется более равномерной.

На рис. 82 (см. ниже) приведены два калибра системы овал — стрелчатый квадрат. При калибровке профиля это сочетание калибров может быть повторено несколько раз в зависимости от поставленной задачи.

#### *Расчет стрелчатого квадратного калибра*

Стрелчатый квадрат располагают перед овальным калибром, а в общем случае — между двумя овальными калибрами. Поэтому расчет стрелчатого калибра сводится к следующему.

**Первый случай.** Стрелчатый квадрат является предчистовым. В этом случае можно рекомендовать соотношение

$$A_{\text{стр}} = (0,9 \div 1,0) d.$$

где  $A_{\text{стр}}$  — сторона стрелчатого квадрата,  
 $d$  — диаметр чистового круга.

**Второй случай.** Стрелчатый квадрат расположен между двумя овальными калибрами. В этом случае расчет калибровки ведем против хода прокатки. Сторону стрелчатого квадрата определяем в первом приближении по принимаемому коэффициенту высотной деформации в последующем овальном калибре, предполагая равномерную деформацию металла по ширине

$$\eta_{\text{ср}} = \frac{A_{\text{стр}}}{h_{\text{ов}}} = 1,1 \div 1,35.$$

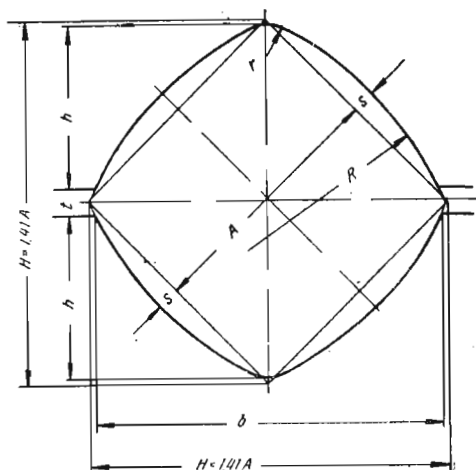


Рис. 77. Элементы и построение стрельчатого квадратного калибра

Тогда сторона стрельчатого квадрата

$$A_{\text{стр}} = \eta_{\text{ср}} h_{\text{ов}} = (1,1 \div 1,35) h_{\text{ов}},$$

где  $h_{\text{ов}}$  — высота последующего овального калибра.

Определяем условие заполнения овального калибра. Обжатие в овальном калибре

$$\Delta h = A_{\text{стр}} - h_{\text{ов}}.$$

Можно определять это обжатие и по приведенным высотам стрельчатого квадрата относительно стороны с учетом вогнутости сторон в калибре

$$A_{\text{стр}} = A + 2s.$$

Находим уширение в овальном калибре по одной из известных формул; затем определяем общую ширину (сумму уширения и стороны стрельчатого квадрата). Если будет отклонение полученных размеров от ширины овала, то производим уточняющий перерасчет.

Построение стрельчатого квадрата сводится к следующему (рис. 77). По стороне  $A$  вписанного квадрата находим диагонали:

$$H = 1,41A.$$

По принимаемым величинам вогнутости боковых сторон квадрата  $s$  определяем радиус кривизны сторон

$$R = \frac{A^2 + 4s^2}{8s}.$$

Полученным радиусом очерчиваем стороны так, чтобы дуги упирались в вершины квадрата. Вогнутость сторон принимаем конструктивно в зависимости от диаметра  $d$  чистового круга:

$$s = (0,05 \div 0,1) d.$$

Радиус закругления  $r$  должен быть таким, чтобы окружность сливалась с дугами боковых сторон квадрата:

$$r = (0,15 \div 0,20) A.$$

Ширина  $b$  — горизонтальная проекция калибра — может быть выражена равенством

$$b = H - \frac{2}{3} t.$$

Площадь стрельчатого квадрата

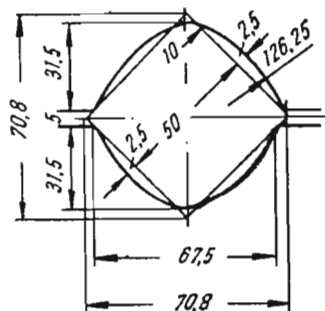
$$F = A^2 + \frac{2}{3} 2A \cdot 2s = A \left( A + \frac{8}{3} s \right).$$

*Пример 1.* Дано:  $A=75$  мм,  $s=5$  мм. Определить остальные размеры предовального стрельчатого квадрата:

$$H = 1,41 \cdot 75 = 105,7 \text{ мм};$$

$$R = \frac{75^2 + 4 \cdot 5^2}{8 \cdot 5} = 143,1 \text{ мм}.$$

Р и с. 78. Предовальный калибр для прокатки круглой стали диам. 50 мм по схеме VI (см. рис. 82)



Размер  $t$  принимаем по графику (см. рис. 98), а радиус  $r$  выбираем конструктивно. Размер  $h$  определится построением.

Площадь стрельчатого квадрата

$$F = 75 \left( 75 + \frac{8}{3} 5 \right) = 6620 \text{ мм}^2.$$

*Пример 2.* Для круглой стали диам. 50 мм определить размер предовального стрельчатого квадрата

$$A = 1,0d = 50 \text{ мм}.$$

Вогнутость стороны квадрата

$$s = 0,05d = 0,05 \cdot 50 = 2,5 \text{ мм};$$

радиус очертания сторон

$$R = \frac{50^2 + 4 \cdot 2,5^2}{8 \cdot 2,5} = 126,25 \text{ мм}.$$

площадь калибра

$$F = 50 \left( 50 + \frac{8}{3} 2,5 \right) = 2833,5 \text{ мм}^2.$$

Радиус закругления  $r$  у вершины принимаем конструктивно равным 10 мм.

Остальные размеры получаются по построению и из приведенных ранее уравнений. Результаты расчета приведены на рис. 78.

*Расчет овального калибра, расположенного перед стрельчатым квадратом*

Ширина овала, задаваемого в стрельчатый квадрат, может быть определена по коэффициенту высотной деформации как отношение ширины овала к диагонали стрельчатого квадрата:

$$\eta_{\text{стр}} = \frac{b}{1,41A} = 1,25 \div 1,4,$$

откуда

$$b = 1,41\eta_{\text{стр}} A = 1,41(1,25 \div 1,4) A = (1,75 \div 2,0) A.$$

Толщина овала может быть определена как разность размера диагонали стрелчатого квадрата и величины уширения в нем при обжатии овала:

$$h_{\text{ов}} = 1,41A - \Delta b_{\text{стр}}.$$

Но уширение в стрелчатом квадрате точно определить невозможно. Поэтому рекомендуется при указанных коэффициентах деформации или принимать уширение  $\Delta b_{\text{стр}} = 8 \div 12$  мм, или определять по одной из известных формул условное уширение, считая, что обжатие овала в стрелчатом квадрате

$$\Delta h_{\text{стр}} = b - 1,41A.$$

При этом катающий диаметр можно принимать по приведенной высоте стрелчатого квадрата.

Возможная ошибка в определении уширения и последующее незаполнение стрелчатого квадрата не скажутся сильно впоследствии на условиях деформации раската сечением в виде стрелчатого квадрата в овальном калибре.

Определение размеров овального калибра и его построение следует осуществлять по ранее изложенным рекомендациям.

#### 4. Система калибров ребровой прямоугольник с закругленными сторонами — овал

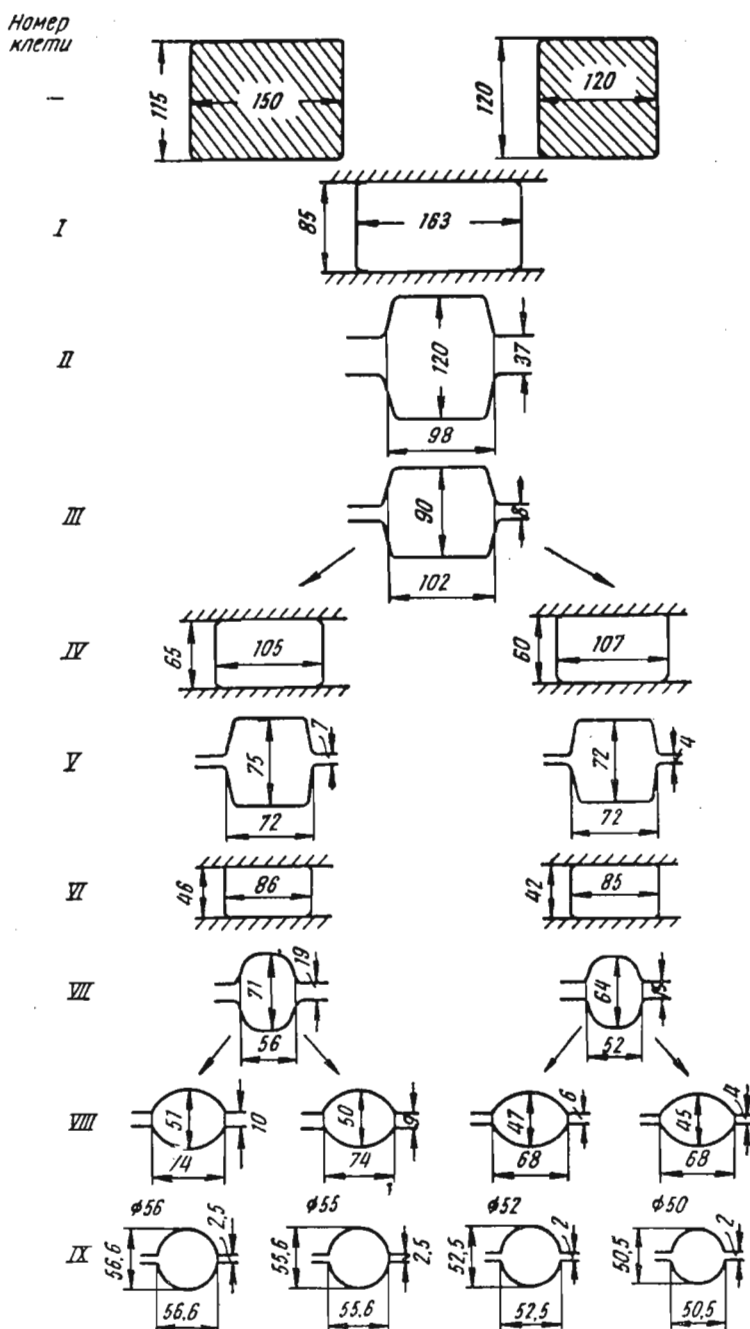
Систему калибров ребровой прямоугольник с закругленными сторонами — овал применяют только на предчистовых клетях при прокатке круглой стали.

Преимущество этой системы сводится к следующему. Если в предшествующих клетях (проходах) деформация металла осуществлялась в калибрах системы прямоугольник — ящичный квадрат, то предовальный раскат будет иметь в сечении четко выраженный прямоугольник. Такой раскат, имеющий прямоугольное сечение, при обжатии в овальном калибре будет прокатываться в условиях неравномерной деформации по ширине, что нежелательно.

Лучший результат будет в том случае, если в овальный калибр задавать раскат с закругленными большими сторонами, что способствует более равномерной деформации металла по ширине. Таким образом, предовальный раскат близок здесь по форме к квадратному, однако две его большие стороны очерчены определенным радиусом. Боковые стороны не являются параллельными. Такая форма калибра способствует самокантовке раската по выходе из валков. Если же по схеме прокатки кантовка не требуется и обжатие в овальном калибре совершается без изменения положения раската, то закругление двух сторон сечения, верхней и нижней, приближает процесс к условию равномерности деформации по ширине калибра. В ряде случаев предовальный калибр делают с очертанием боковых сторон по радиусу. Большей частью такие калибры применяют для прокатки круглой стали диаметром более 50 мм.

Данные для примерного построения последних трех калибров применительно к крупносортовому девятиклетевому стану 500 приведены в табл. 6. Общая схема прокатки показана на рис. 79.

Круглую сталь диаметром 32 ÷ 50 мм также рекомендуется прокатывать по данной системе калибров. Форма и размеры предпоследних



Р и с. 79. Схема прокатки круглой стали диам. 56, 55, 52 и 50 мм на стане 500 (размеры чистовых калибров указаны по размерам чистового профиля)

двух калибров для этого случая при использовании десятиклетевого среднесортного стана 300 приведены в табл. 7. Наибольшее применение эта система калибров нашла при прокатке арматурной стали. Поэтому вопросы, относящиеся к построению предовальных калибров при такой системе, будут рассмотрены подробно в соответствующем разделе.

Таблица 6

Данные для построения последних трех калибров для прокатки круглых профилей на девятиклетевом стане 500 (см. рис. 79)

Форма и размеры калибра, мм

предовального

диаметр  
профиля

h	B	b	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	R <sub>3</sub>
---	---	---	----------------	----------------	----------------

предчистового

диаметр  
профиля

h	b	R
---	---	---

чистового

Диаметр  
профиля

d	$\frac{1}{2}t$	k, %
---	----------------	------

Клеть V

65—70	33	72	38	90	53	10
-------	----	----	----	----	----	----

75	39	82,5	41	90	59	10
----	----	------	----	----	----	----

80—85	41	93	48,5	120	87	25
-------	----	----	------	-----	----	----

Клеть VII

50—56	33	42	38	90	53	10
-------	----	----	----	----	----	----

60—65	39	82,5	41	90	59	10
-------	----	------	----	----	----	----

70—75	41	93	48,5	120	87	25
-------	----	----	------	-----	----	----

50—52	24	52	22	—	25	12
-------	----	----	----	---	----	----

55—56	24	56	28	—	28	15
-------	----	----	----	---	----	----

60	27,5	62	35	—	41	10
----	------	----	----	---	----	----

90—95	44	99	49,6	60	85	30
-------	----	----	------	----	----	----

100—105	53	108	49	70	67,5	35
---------	----	-----	----	----	------	----

Клеть VIII

60—65	23	87	52,5
-------	----	----	------

70—75	28	99	58
-------	----	----	----

80—85	33	112	64
-------	----	-----	----

90—95	38	127	72
-------	----	-----	----

100—105	42	141	80
---------	----	-----	----

50—56	19,5	77	48
-------	------	----	----

Клеть IX]

50	50,5	2,0	30
----	------	-----	----

52	52,5	2,0	30
----	------	-----	----

55	55,5	2,0	30
----	------	-----	----

56	56,4	1,5	20
----	------	-----	----

60	60,55	2,5	20
----	-------	-----	----

65	65,6	2,5	20
----	------	-----	----

70	70,6	2,5	20
----	------	-----	----

75	75,7	2,5	20
----	------	-----	----

80	80,7	3,0	20
----	------	-----	----

85	85,8	3,0	20
----	------	-----	----

90	90,8	3,0	20
----	------	-----	----

95	95,9	3,0	20
----	------	-----	----

100	101,0	3,0	20
-----	-------	-----	----

105	106,0	3,0	20
-----	-------	-----	----

Расчет предовального калибра сводится к следующему.

Предположим, что этот калибр близок по форме к квадрату. Тогда соотношение между стороной предовального квадрата и диаметром круга  $\left(\frac{A}{d}\right)$  можно принять равным  $1,05 \div 1,1$ , а радиус закругления углов в калибре  $r = (0,1 \div 0,15) A$ . Площадь калибра определяют с учетом радиуса закругления углов. Если же предовальный раскат по форме сечения отличается от квадрата, тогда калибр следует строить по данным, приведенным в табл. 6 и 7.

*Пример.* Рассчитаем предовальный калибр для прокатки круглой стали диам. 50 мм:

$$A = 1,1 \cdot 50 = 55 \text{ мм}; \quad R \approx d = 50 \text{ мм}; \quad r \approx 0,2d = 0,2 \cdot 50 = 10 \text{ мм}.$$

Данные расчета приведены на рис. 80.

Р и с. 80. Предовальный калибр для прокатки круглой стали диам. 50 мм по схеме V (см. рис. 82)

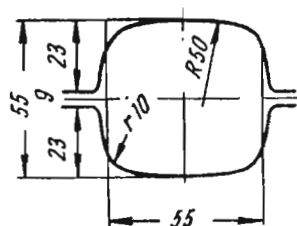
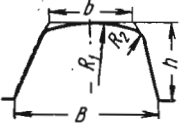
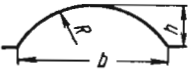


Таблица 7

Данные для построения предпоследних двух калибров для прокатки круглых профилей на десятиклетевом стане 300

Форма и размеры калибра, в мм									
предовального (клеть VIII)						предчистового (клеть IX)			
диаметр профиля, мм						диаметр профиля, в мм			
	h	B	b	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>		h	b	R
32—33	18	40	27	32	8	32—36	12	52	34
34—36	19	42	29	34	8				
38	20	45	31	38	8	38—40	15	57	34
40—42	21	49	34	40	10	42—43	17	60	35
43—45	23	53	37	43	10	45	18	63	36,5
48—50	26	58	40	48	10	48—50	19	66,5	38,5

### Определение размеров раската, задаваемого в ребровой прямоугольник с закругленными сторонами

При известных допущениях в калибре, имеющем вид ребрового прямоугольника, закруглениями боковых сторон можно пренебречь. В этом случае его можно рассматривать как ящичный калибр. Тогда определение размеров прямоугольного раската, задаваемого в ребровой прямоугольный калибр, сводится к рассмотрению условий высотной деформации и получающегося при этом уширения в ребровом прямоугольном калибре.

Методика расчета следующая. Принимаем коэффициент высотной деформации в калибре ребрового прямоугольника как отношение ширины задаваемого раската (по положению в калибре она будет высотой) к высоте калибра

$$\eta_{\text{рп}} = \frac{B}{H_{\text{рп}}} = 1,2 \div 1,4,$$

откуда ширина раската

$$B = \eta_{\text{рп}} H_{\text{рп}} = (1,2 \div 1,4) H_{\text{рп}}.$$

Обжатие в калибре ребрового прямоугольника

$$\Delta h_{\text{рп}} = B - H_{\text{рп}}.$$

По данному обжатию определяем уширение, которое при подсчете высоты задаваемого раската вычитаем из ширины ребрового прямоуголь-

ного калибра с дополнительным размером — допуском на незаполнение калибра:

$$H_{\text{пол}} = B_{\text{рп}} - [\Delta b_{\text{рп}} + (5 \div 10)] \text{ мм},$$

где  $H_{\text{пол}}$  — высота прямоугольного раската, задаваемого в калибр;  
 $B_{\text{рп}}$  — ширина ребрового прямоугольного калибра по разьему;  
 $\Delta b_{\text{рп}}$  — уширение в ребровом прямоугольном калибре.

При расчетах катающий диаметр можно принимать по дну ребрового прямоугольного калибра.

Калибр для получения прямоугольного раската может быть ящичным или просто гладкой бочкой, как это показано на рис. 79.

*Расположение на валках калибров вертикальный овал, круг, стрельчатый квадрат и ребровой прямоугольник с закругленными сторонами*

При расположении этих калибров на валках размеры крайних буртов определяют исходя из возможности установки вводной и выводной арматуры на крайнем калибре, т. е. определяют в зависимости от габаритов валковой арматуры. Ширину промежуточных буртов можно ориентировочно принимать равной половине глубины вреза ручьев.

## Часть третья

### КАЛИБРОВКА ПРОСТЫХ ПРОФИЛЕЙ

---

#### Глава VII

#### КАЛИБРОВКА КРУГЛОЙ СТАЛИ И АРМАТУРНОЙ СТАЛИ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ПРОФИЛЯ

##### 1. Схемы калибровки круглой стали

К горячекатаной круглой стали согласно ГОСТ 2590—57 относят профили, имеющие в поперечном сечении форму круга диаметром от 5 до 250 мм. При необходимости круглую сталь прокатывают и большего диаметра.

Круглую сталь диаметром от 5 до 9 мм относят к катанке, которую, как правило, поставляют в бунтах. Однако в настоящее время стремятся наматывать в бунты и круглую сталь больших диаметров.

В общем случае схема калибровки круглой стали может быть разделена на две части: первая представляет собой калибровку для черновых и средних групп клетей и удовлетворяет ряду профилей, являясь в этом смысле общей для нескольких конечных профилей различного сечения (квадратной, полосовой, шестигранной и др.), а вторая предназначена как определенная система для последних трех-четырех клетей и свойственна только данному профилю круглой стали. В черновых и средних группах клетей могут применяться системы калибров: прямоугольник — ящичный квадрат — прямоугольник, квадрат — шестиугольник — квадрат, квадрат — овал — квадрат (наиболее распространенная система) и овал — вертикальный овал — овал.

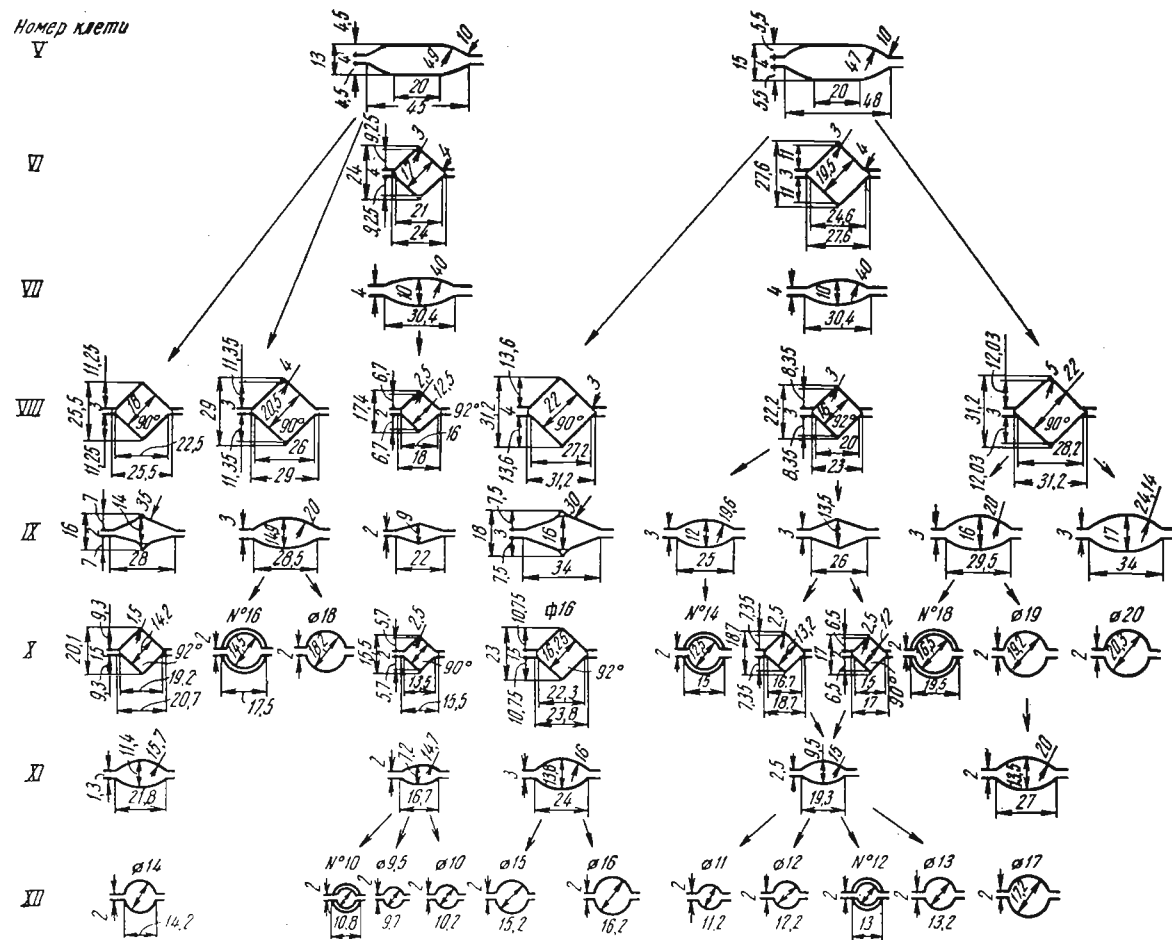
Для последних трех-четырех профилирующих клетей система калибровки также не является постоянной. Определенная закономерность имеется только в последних двух клетях: чистовая имеет круглый калибр, предчистовая — овальный. Третья же клеть от конца прокатки может иметь различную форму калибра, от которой и зависит система калибровки.

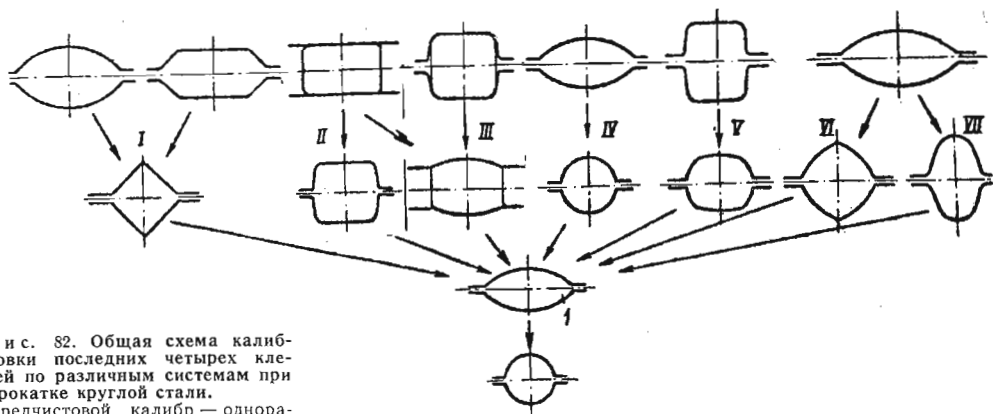
Прокатка же катанки глубоко специфична, и поэтому ее калибровка будет рассмотрена особо.

Калибровка круглой стали диаметром 10—20 мм и арматурной стали № 10—18 периодического профиля для последних клетей мелкосортного стана 250 показана на рис. 81.

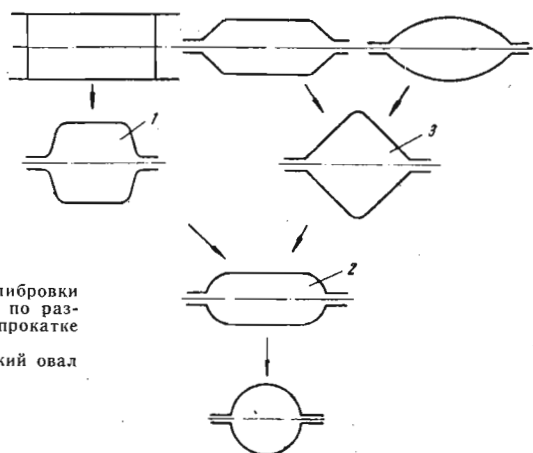
На рис. 82 и 83 показаны две общие схемы калибровки валков последних четырех клетей для прокатки круглой стали. По этим схемам видно, что в качестве предчистовых применяют овальные калибры двух форм: однорадиусные (рис. 82, 1) и плоские (рис. 83, 2). Первую используют при прокатке круглой стали большинства профилеразмеров, а вторую — главным образом для арматурной стали. Однако применение

Рис. 81. Калибровка и схема прокатки круглой стали и арматурной стали периодического профиля на стане 250





Р и с. 82. Общая схема калибровки последних четырех клеток по различным системам при прокатке круглой стали. Предчистовой калибр — однорадиусный овал



Р и с. 83. Общая схема калибровки последних четырех клеток по различным системам при прокатке круглой стали. Предчистовой калибр — плоский овал

плоского вала возможно также и для круглой стали больших диаметров.

По первой схеме прокатки можно отметить семь типов калибров, применяемых в предоальной клетке (см. рис. 82). По второй схеме (см. рис. 83) наибольшее применение нашли калибры только двух видов: ящичный квадрат 1 и квадрат 3, врезанный по диагонали. Однако при прокатке круглой стали больших диаметров схемы калибровки могут изменяться и приведенные схемы не всегда будут удовлетворять условиям получения качественного профиля.

Наибольшее распространение при прокатке круглой стали (см. рис. 82) получила калибровка трех последних клеток по схеме I (квадрат — овал — круг). Эта схема имеет преимущество в том, что при ней достигается высокая вытяжка в овальном калибре и обеспечивается вполне определенная форма предоального квадратного раската. Однако она не имеет большой универсальности и применяется главным образом для катанки и круглой стали диаметром до 16—18 мм, так как на применяемых для них узко специализированных станах не требуется больших перестроек при переходе с одного профилирующего размера на другой.

За последнее время большое распространение получила схема калибровки последних четырех клеток по системе прямоугольник — закругленный прямоугольник (черновой овал) — овал — круг (схема III). Эта схема характеризуется большой универсальностью и обеспечивает сравнительно равномерную деформацию металла по ширине во всех трех

предчистовых калибрах. Универсальность ее заключается в том, что, изменяя зазор между валками, можно получать желаемые переходные сечения для конечного размера круга. Таким образом, не делая перевалок и переходов в трех клетях, предшествующих чистовой, изменением зазора между валками можно получать несколько близких по размерам круглых профилей.

Схему IV калибровки овал — круг — овал — круг применяют в случае, если в сортаменте стана имеются профили, близкие по диаметрам, например, катанка диаметром 5 и 6,3 мм. В таком случае схему прокатки и калибровки составляют так, чтобы из чистовой клетки выходил профиль диаметром 5 мм, а вместо предчистового квадрата (схема I) выдавался профиль диаметром 6,3 мм. В случае перехода на профиль диаметром 6,3 мм последние клетки отключают, и стан без перестройки прокатывает указанный профилирующий размер. Схема IV менее универсальна по сравнению с предшествующей (III). Кроме того, здесь имеется большая разница в распределении коэффициентов вытяжек по проходам: в овальном калибре вытяжки больше, чем в круглых. При прокатке круглой стали диаметром более 20 мм в последние годы применяют предовальные калибры в виде стрельчатых ящичных квадратов с закруглением углов (схема V). Подобная форма предовального раската обеспечивает более равномерную деформацию металла по ширине в предчистовом однорадиусном овальном калибре. Схему V применяют для круглой стали больших диаметров при некотором изменении овального калибра.

Схема с предовальным квадратным калибром стрельчатого типа (VI) и схема овал — вертикальный овал — овал — круг (VII) близки между собой. Их применяют только в том случае, если необходимо иметь малые вытяжки в последних четырех проходах. Обе схемы обеспечивают хорошее закругление овального раската в местах по концам большой оси, что создает благоприятные условия для деформации такого раската в чистовом калибре.

Системы калибровок и формы калибров, применяемые для средних и черновых групп клетей, могут быть весьма разнообразными и зависеть от ряда факторов, главными из которых являются тип стана и конструкция его основного и вспомогательного оборудования. Расчеты калибров этих систем подробно рассмотрены в предшествующих главах.

#### *Методика расчета калибровки круглой стали*

Для того чтобы успешно решить задачу о калибровке того или иного круглого профиля, необходимо предварительно знать все основные характеристики стана, на котором будет прокатываться данный профиль (диаметр и длина бочки рабочих валков, числа оборотов валков, мощность электродвигателей, общие передаточные числа по клетям и т. д.).

Рекомендуется такой порядок расчета калибровки круглой стали.

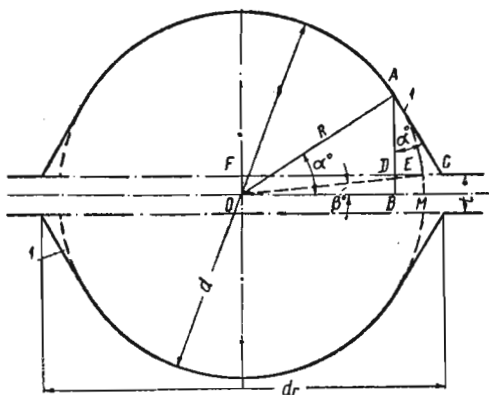
Определяют схему прокатки (систему последних трех-четырех калибров), чтобы она максимально согласовывалась с общей схемой прокатки других профилей сортамента стана. Расчет калибров следует вести против хода прокатки.

Определяют размеры чистового калибра для круглой стали (вертикальный и горизонтальный диаметры, зазор между валками, радиус закругления фасок). Диаметр калибра определяют с учетом температурной усадки и условий прокатки профиля с минусовыми допусками.

По диаметру чистового профиля из графиков по данным исследований определяют высоту и ширину предчистового овального калибра, зазор и радиус очертания калибра. По этим данным вычерчивают овальный калибр.

Калибры других систем, принятых для прокатки круглой стали, рассчитывают по методам, рассмотренным в предыдущих главах.

В настоящее время существует ряд приемов по построению чистового калибра для круглой стали. Сюда относятся: очерчивание калибра двумя радиусами из различных центров; снятие необходимых фасок у разьема валков с тем, чтобы не образовывался тонкий лампас и не было



На рис. 84 представлен следующий метод построения чистового калибра для круглой стали. Практика показывает, что чистовой калибр, очерченный одним радиусом и имеющий лишь один размер — внутренний диаметр  $d$ , не удовлетворяет требованиям получения геометрически правильного качественного профиля. Как правило, в таком калибре даже при самом незначительном изменении технологических условий (понижение температуры прокатки, выработка валков предчистового калибра, увеличение высоты овала и др.) происходит переполнение ручьев металлом и образование одного или двух усов. Получение профиля в соответствии с формой чистового калибра требует постоянного контроля размеров предчистового овального раската. В случаях переполнения калибра не всегда удается выдержать диаметр профиля даже в пределах плюсового допуска.

 $g^*$

### Расчет чистового калибра

При изготовлении шаблона, разметке длины бочки валков для вреза ручьев, а также для ведения процесса прокатки важно знать горизонтальный диаметр  $d_r$  по выпуску 1 в разъеме валков (см. рис. 84). Этот диаметр определяется величиной принятого выпуска, колеблющейся в пределах от 20 до 50%. Применяемые на практике выпуски в чистовых калибрах приведены ниже (см. рис. 84).

Диаметр чистового круга, мм	Выпуск на одну сторону ручья, %	Угол наклона касательной $\alpha$
105—56	20	11° 20'
55—50	25—30	14°—16° 40'
45—30	40	21° 50'
30—10	50	26° 35'

Согласно рис. 84 уравнение для расчета горизонтального диаметра по разъему валков с учетом выпуска

$$d_r = d + 2 \left[ b + \frac{a \left( a - \frac{t}{2} \right)}{b} \right] - d \cos \beta, \quad (78)$$

где  $a = AB$ ;  $b = OB$ .

При малых зазорах можно принять  $\cos \beta \approx 1$ . Тогда формула (78) примет вид

$$d_r = 2 \left[ b + \frac{a \left( a - \frac{t}{2} \right)}{b} \right].$$

Выражая величины  $a$  и  $b$  через радиус калибра  $R$  и задаваясь величиной выпуска, получаем ряд уравнений:

$$a^2 + b^2 = R^2; \quad \frac{a}{b} = k, \quad (79)$$

откуда  $a = kb$ .

Из уравнения (79) имеем

$$b = \frac{R}{\sqrt{1 + k^2}}.$$

Значения  $a$  и  $b$  в зависимости от величины  $k$  по данным исследований приведены в табл. 8.

Таблица 8

Значения  $a$  и  $b$  в зависимости от величины  $k$  для чистового профиля

$k$	$\sqrt{1+k^2}$	$b$	$a$
0,2	1,02	0,982 $R$	0,1964 $R$
0,25	1,02	0,972 $R$	0,243 $R$
0,3	1,042	0,958 $R$	0,288 $R$
0,4	1,074	0,932 $R$	0,3725 $R$
0,5	1,117	0,896 $R$	0,448 $R$

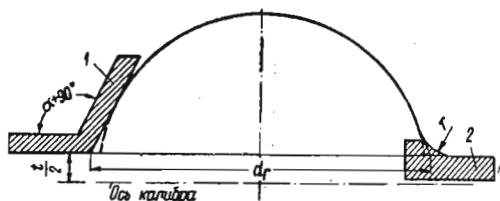
Окончательные выражения для определения горизонтального диаметра  $d_r$  по разъему валков с учетом выпуска указаны ниже.

$k$	$d_r$	$k$	$d_r$
0,2	2,042 $R-0,2 t$	0,4	2,162 $R-0,4 t$
0,25	2,065 $R-0,25 t$	0,5	2,24 $R-0,5 t$
0,3	2,089 $R-0,3 t$		

### Построение шаблона для чистового калибра

Шаблон (рис. 85) для чистового калибра строят следующим образом. Вначале вычерчивают полуокружность радиусом, равным половине диаметра  $d$ , принятого для расточки калибра. Затем откладывают от

Р и с. 85. Построение шаблона для чистового калибра



оси зазор  $t$ . Далее по принятому выпуску (см. выше) изготавливают угольник 1 для определения уклона по месту разъема.

Прикладывая угольник одной стороной к линии разъема валков, а другой — по касательной к окружности, получают очертание шаблона. С получающихся острых кромок у буртов на валках при врезе ручьев снимают фаски по радиусу  $r$ , принимаемому в пределах

$$r = (0,08 \div 0,1) d.$$

Для проверки фаски на валке служит специальный шаблон 2.

Круглую сталь стремятся прокатывать по минусовым допускам. В связи с этим диаметр чистового калибра целесообразно принимать

$$d = 1,013 [d_{\text{хол}} - (0,5 \div 0,8) \Delta], \quad (80)$$

где  $d_{\text{хол}}$  — диаметр круга в холодном состоянии;

$\Delta$  — минусовый допуск на данный диаметр по ГОСТу.

Однако на практике часто принимают и значение

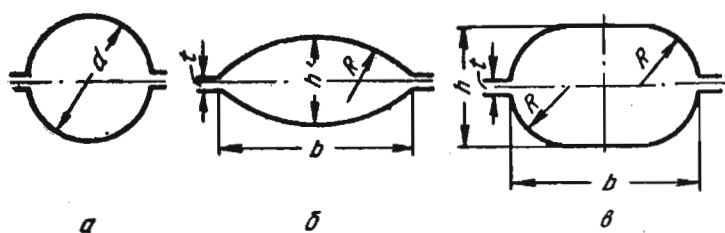
$$d = 1,013 d_{\text{хол}}.$$

### 3. Расчет и построение предчистового овального калибра

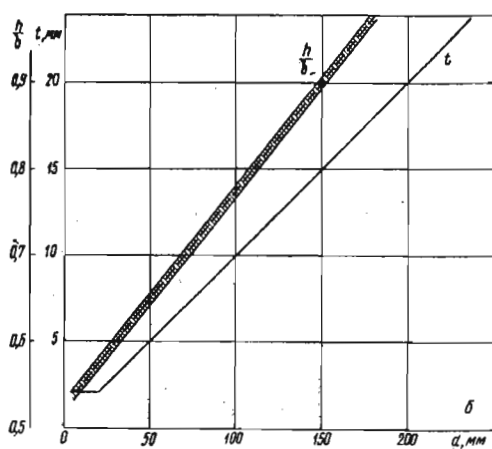
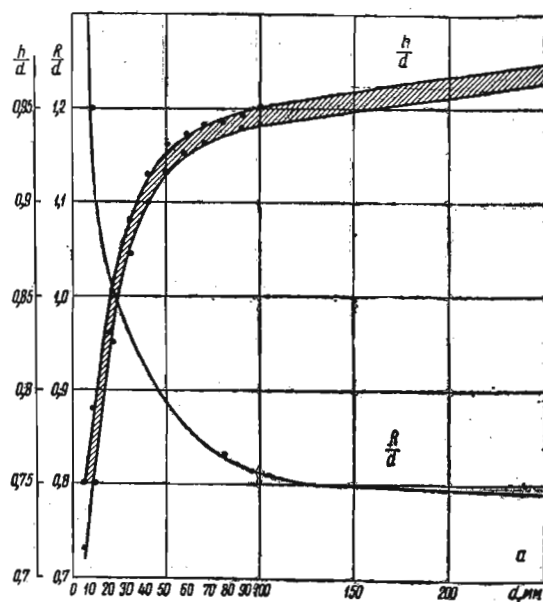
Предчистовые овалы могут быть однорадиусными (т. е. с одним радиусом очертания) и плоскими, имеющими параллельные плоские стороны с закруглениями по бокам (рис. 86).

Наибольшее применение при прокатке круглой стали находит однорадиусный овал. Анализ многочисленных практических данных показывает, что между размерами  $h$ ,  $R$ ,  $b$  и  $t$  предчистового овала и диаметром  $d$  чистового круглого профиля имеется вполне определенная зависимость. Эта зависимость может быть представлена соответствующими графиками (рис. 87).

Таким образом, зная диаметр чистового круга, можно легко определить по графику  $a$  толщину  $h$  овала, а по графику  $b$  ширину  $b$  овала



Р и с. 86. Форма и элементы чистового круга и предчистовых овалов:  
 а — чистовой круг; б — однорациусный овал; в — плоский овал



Р и с. 87. Изменение соотношений между размерами предчистового однорациусного овала и диаметром чистового круга

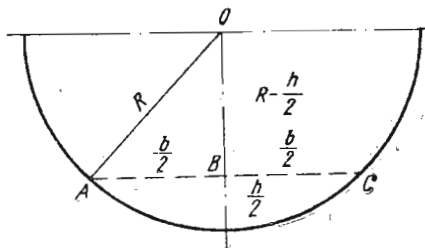
и зазор  $t$ . Окончательное уточнение ширины овала может быть произведено, если в этом калибре задана величина вытяжки. Если же вытяжка не задана, то величины  $h$  и  $b$ , полученные по графику, могут быть приняты окончательными.

Для круглой стали  $d=20 \div 250$  мм зазор между валками  $t \approx 0,1 d$ .

Радиус очертания  $R$  однорадиусного овала определяют расчетом (рис. 88):

$$R = \frac{b^2 + h^2}{4h}. \quad (81)$$

Р и с. 88. К выводу формулы для определения радиуса очертания овала



При зазоре  $t$  (см. рис. 86)

$$R = \frac{b^2 + (h - t)^2}{4(h - t)}; \quad (82)$$

площадь овала

$$F = bt + \frac{2}{3} b(h - t). \quad (83)$$

*Пример.* Определить размеры предчистового однорадиусного овала для прокатки круглого чистового профиля диам. 50 мм.

По графику (см. рис. 87, а) для круга  $d=50$  мм имеем  $\frac{h}{d} \approx 0,93$ .

Тогда толщина овала  $h=0,93 \cdot 50=46,5$  мм. По графику (см. рис. 87, б) находим  $\frac{h}{b}=0,65$ , откуда ширина овала

$$b = \frac{h}{0,65} = \frac{46,5}{0,65} = 71,5 \text{ мм.}$$

Примем  $t=5$  мм. Тогда по формуле (82) радиус очертания калибра

$$R = \frac{71,5^2 + (46,5 - 5)^2}{4(46,5 - 5)} = 41,0 \text{ мм.}$$

Площадь овального калибра по уравнению (83)

$$F = 71,5 \cdot 5 + \frac{2}{3} 71,5(46,5 - 5) = 2327,5 \text{ мм}^2.$$

Уравнение (81) позволяет при известном радиусе  $R$  и толщине  $h$  овала определить его ширину  $b$  по формуле

$$b = \sqrt{h(4R - h)}.$$

#### 4. Расчет предовальных калибров

Рассмотрим расчет предовальных калибров, применяемых в третьей клетки (см. рис. 82). Наиболее распространенными являются схемы I и II. Эти схемы имеют общую закономерность, определяющую калибровку последних трех клеток для круглой стали по системе квадрат-овал — круг.

Между размером  $A$  стороны предовального квадрата и диаметром  $d$  чистового круга существуют зависимости:  $A=d$  для круглой стали малых диаметров (5—15 мм) и  $A=(1,05 \div 1,1) d$  для круглой стали средних и больших диаметров.

Радиус закругления углов в квадратном калибре

$$r = (0,1 \div 0,15) A.$$

В схеме III между квадратным калибром и предчистовым овалом дополнительно имеется овальный калибр. Закругление углов в этом «черновом» овальном калибре способствует повышению стойкости предчистового овала, равномерному его износу, улучшению качества поверхности готового профиля. Предовальный калибр по схеме III может быть очерчен радиусом, равным или близким радиусу предчистового овала. В этом случае предовальный раскат можно рассчитывать по коэффициенту высотной деформации, так как она в предчистовом овальном калибре будет близкой к равномерной по ширине. Уширение можно рассчитывать как и при прокатке прямоугольного раската в валках с гладкой бочкой.

Коэффициентом высотной деформации можно задаваться по любому из режимов, принимаемых при прокатке узкополосной стали.

При толщине  $h$  овала предовальный раскат должен иметь высоту

$$H = \eta h.$$

Обжатие в предчистовом овальном калибре может быть принято как разность величин

$$\Delta h = H - h.$$

Уширение в овале (а по нему и ширину  $B$  предовального раската) можно приближенно определить по одной из известных формул.

**Пример.** Для круглой стали диаметром 50 мм по найденным размерам овального калибра  $h=46,5$  мм,  $b=71,5$  мм и  $t=5$  мм определить размеры предовального раската по схеме III при коэффициенте  $\eta=1,35$ . Катающий диаметр валков овального калибра  $D_{ов}=320$  мм.

Толщина предовального раската

$$H = 1,35 \cdot 46,5 = 62,75 \text{ мм};$$

обжатие в предчистовом овальном калибре

$$H - h = 62,75 - 46,5 = 16,25 \text{ мм};$$

уширение (приближенно)

$$\Delta b = 0,35 \frac{16,25}{62,75} \sqrt{160 \cdot 16,25} = 4,6 \text{ мм};$$

ширина предовального раската

$$B = b - \Delta b = 71,5 - 4,6 = 66,9 \text{ мм.}$$

Форма и размеры предовальных калибров для прокатки круглой стали приведены на рис. 89.

Если радиус закругления калибра для предовального раската сильно отличается от радиуса, которым очерчен овал, то расчет можно вести по приведенным высотам предчистового овала и предовального раската. Приведенную высоту предовального раската также определяют по принимаемому коэффициенту высотной деформации. Приведенная высота предчистового овального калибра

$$h_{\text{пр}} = \frac{F}{b}.$$

Приведенная толщина предовального раската

$$H_{\text{пр}} = \eta h_{\text{пр}}.$$

Далее расчет аналогичен приведенному выше.

#### *Определение размеров квадрата, задаваемого в предовальный калибр*

Если при прокатке круглой стали последние три калибра представляют собой квадрат — овал — круг, то зависимость между диаметром чистового круга и размером квадрата вполне определенная. С применением еще одного овального калибра между квадратом и предчистовым овалом появляется необходимость в некотором увеличении размера квадратного раската, следовательно, и квадратного калибра.

В связи с тем что в первом по ходу прокатки овальном калибре можно принять вытяжку, равную 1,15—1,20, размер стороны задаваемого квадрата относительно размера чистового профиля круглой стали должен быть увеличен пропорционально корню квадратному из указанных пределов вытяжки.

Тогда для круглой стали диаметром 5—15 мм сторона исходного квадрата

$$A = \sqrt{(1,15 \div 1,20)} d = (1,07 \div 1,09) d;$$

для круглой стали больших диаметров

$$A = \sqrt{(1,15 \div 1,20)} (1,05 \div 1,1) d = (1,12 \div 1,19) d.$$

При принятии таких размеров сторон квадратов необходимо произвести проверку заполнения предчистового овального калибра. Если по расчету получается переполнение предчистового овального калибра, то необходимо увеличить его ширину.

Методика расчета сводится к следующему.

В зависимости от размеров готового профиля круглой стали принимают размеры стороны задаваемого квадрата  $A$ . По рис. 87 определяют размеры предчистового овала — толщину  $h$  и ширину  $b$ . По принятому коэффициенту высотной деформации в предчистовом овале находят толщину «чернового» овала. По разности толщин, следовательно, по обжатию определяют уширение в предчистовом овале. Вычитая это уширение из ширины предчистового овала, получают ширину «чернового» овала. По одной из формул определяем уширение в «черновом» овале по обжатию — разности стороны квадрата и приведенной высоты этого овала:

$$\Delta h_{\text{ор, черн}} = A - h_{\text{пр. ов.}}$$

Если полученное уширение  $\Delta b_{\text{ов.черн}}$  в сумме со стороной квадрата  $A$  не будет выходить за пределы размера ширины «чернового» овала, то, следовательно, размеры стороны предчистового квадрата изменять не следует. Если же

$$A + \Delta b_{\text{ов.черн}} > b_{\text{ов.черн}},$$

то следует увеличить ширину овала на разность

$$(A + \Delta b_{\text{ов.черн}}) - b_{\text{ов.черн}}.$$

На практике часто не изменяют размер исходного квадрата, а лишь только перераспределяют вытяжки между двумя овалами так, чтобы в предчистовом овале она была меньше, чем в предшествующем овальном калибре. Этим достигают увеличения стойкости предчистового овального калибра и повышенную точность готового профиля. Системы калибров, представленные схемами IV—VII, подробно рассмотрены в гл. VI. Правила расположения калибров на валках при прокатке круглой стали аналогичны ранее приведенным.

## 5. Калибровка арматурной стали периодического профиля

Несмотря на большую аналогию между схемами прокатки и калибровки круглой и арматурной стали периодического профиля, калибровка последней имеет свои особенности. При прокатке арматурной стали периодического профиля требуется определенное соотношение между диаметром профиля и катающим диаметром валков, а также специфическое построение двух калибров, предшествующих чистовому. Чистовой калибр после расточки подвергают дополнительному фрезерованию или электроимпульсной обработке для получения на его поверхности специальных впадин.

Таблица 9

Данные для построения предчистового овала при прокатке арматурной стали периодического профиля (см. рис. 90 и 94)

Номер профиля или $d_p$ , мм	Размеры, мм						
	внутренний диаметр профиля $d$	наружный диаметр профиля $d_1$	общая высота овала $H$	общая ширина овала $B$	зазор между валками $t$	радиус за- кругления овала $R$	прогиб в овале $S$
10	9,3	11,3	8,5	17	2	4	—
12	11	13,5	10	20	3	5	—
14	13	15,5	12	22	3	6	—
16	15	18,0	14,5	24	3	7,5	—
18	17	20,0	15	26	3	8,5	—
20	19	22,0	18	30,5	3	9	0,5
22	21	24,0	19	35	3	12	0,5
25	24	27,0	23	40	3	12	0,5
28	26,5	30,5	26	45	4	12	0,5
32	30,5	34,5	28	53	4	18,5	0,5
36	34,5	39,5	35	58,5	5	21	0,5
40	38,5	43,5	36	64	5	23	0,5
45	43	49,0	37	72	6	26	0,5
50	48	54,0	38	90	8	24	0,5
55	53	59,0	41	95,5	8	28	0,5
60	58	64,0	48	96	11	28	0,5
70	68	74,0	58	115	12	38	0,5
80	77,5	83,5	66	133	13	50	0,5
90	87,5	93,5	77	154	19	65	0,5



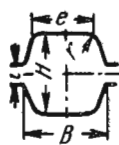

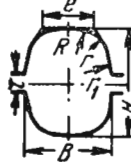
Методика расчета калибровки арматурной стали периодического профиля сводится к следующему. Расчет ведут против хода прокатки. Принимают согласно ГОСТу размер внутреннего диаметра  $d$  калибра до фрезерования с учетом номинального размера профиля или минусового допуска.

Определяют остальные размеры чистового профиля. Поверхностные выступы принимают исходя из максимальных допусков. Далее рассчитывают размеры предчистового овала и его элементы. Однорациусный овал строят на основе расчетных величин, получаемых по ранее приведенным уравнениям и согласно существующим зависимостям (табл. 9).

Определяют стороны предчистового квадрата или размеры раската прямоугольного и специального сечения в зависимости от номера профиля (табл. 10).

Таблица 10

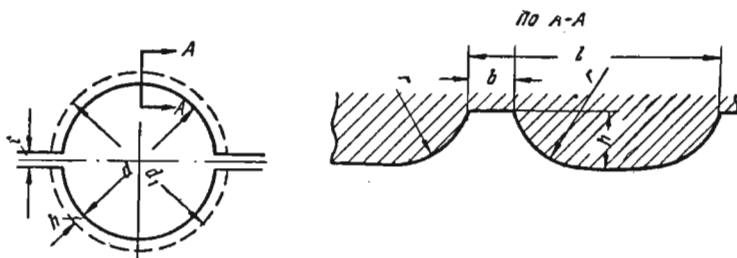
Данные для построения предчистовых калибров при прокатке арматурной стали периодического профиля

№ профиля	Форма калибра	Размеры, мм							
		$A$	$H$	$B$	$r$	$t$	$e$	$R$	$r_1$
10 12 14 16		12,5 14,5 17,0 19,5	— — — —	— — — —	— — — —	— — — —	— — — —	— — — —	— — — —
14 16 18 20		— — — —	18,2 22,0 25,0 28,0	15,2 18,0 20,0 22,0	7,5 8,5 9,5 10,5	3 3 3 3	— — — —	— — — —	— — — —
20 22 25 28		— — — —	31,0 31,0 34,0 41,0	25,0 27,0 30,0 36,6	6,0 7,0 8,0 8,0	11 9 10 13	15 16 18 22	— — — —	— — — —
32 36 40 45		— — — —	46,0 56,0 61,0 69,0	40,0 42,0 49,0 58,0	8,0 8,0 10,0 10,0	10 18 19 17	27 29 34 40	— — — —	— — — —
50 55 60 70 80 90		— — — — — —	73,0 73,0 88,0 110 125 142	62 62 72 72 93 99	10 10 10 10 25 30	18 32 24 24 43 54	35 35 38 38 48,5 49,5	— — 90 90 120 60	41 41 53 53 87 85

Схему прокатки и систему калибров принимают с учетом всего сортамента стана. Производят расточку валков чистовой клетки, а при необходимости и валков других клеток.

### *Построение чистового калибра*

Чистовой калибр (рис. 90) для арматурной стали периодического профиля изготавливают в две операции: нарезают на валках ручки по шаблону, а затем фрезерованием получают впадины. Впадины служат



Р и с. 90. Чистовой калибр для прокатки арматурной стали периодического профиля

для формирования на профиле поверхностных выступов, имеющих направление по трехзаходной винтовой линии.

Размеры элементов чистового калибра (профиля) в зависимости от номера (расчетного диаметра  $d_p$ ) прокатываемой стали определяют по ГОСТам на данный профиль.

Калибр с номинальным (внутренним) диаметром, изготовленный с учетом минусового допуска на профиль, позволяет осуществлять также его прокатку с минусовым допуском и более полно использовать валки.

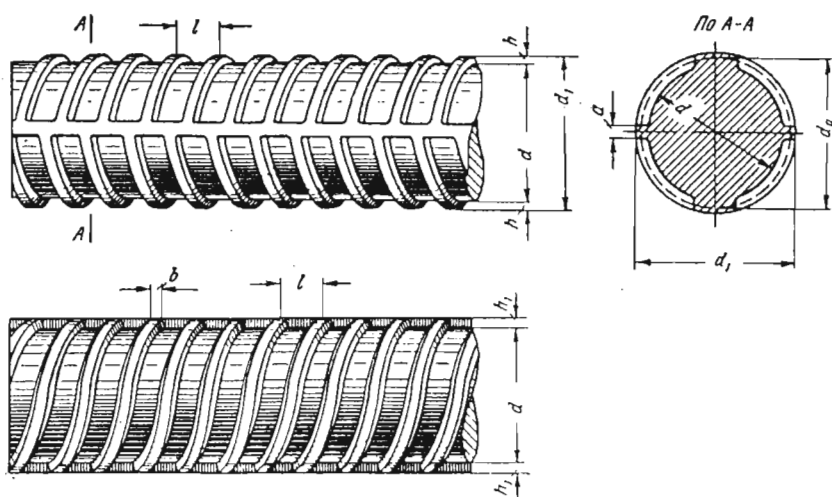
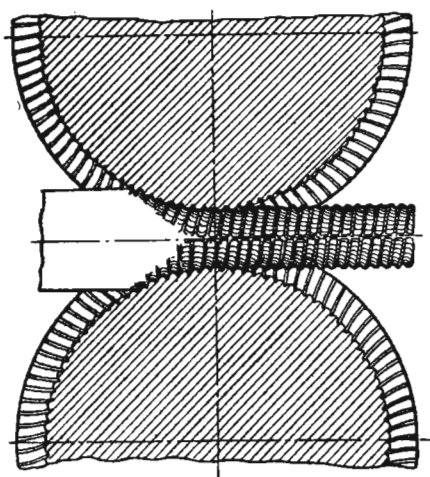
### *Отношение между расчетным диаметром арматурной стали периодического профиля и катающим диаметром валков*

Арматурная сталь периодического профиля (рис. 91) представляет собой круглый стержень, на поверхности которого имеются поперечные и продольные боковые выступы по месту разъема валков. В зависимости от марки стали выступы делают «елочкой» (рис. 92) или в одном направлении (рис. 93). Выступы предназначены для того, чтобы обеспечить более прочную связь металла с бетоном.

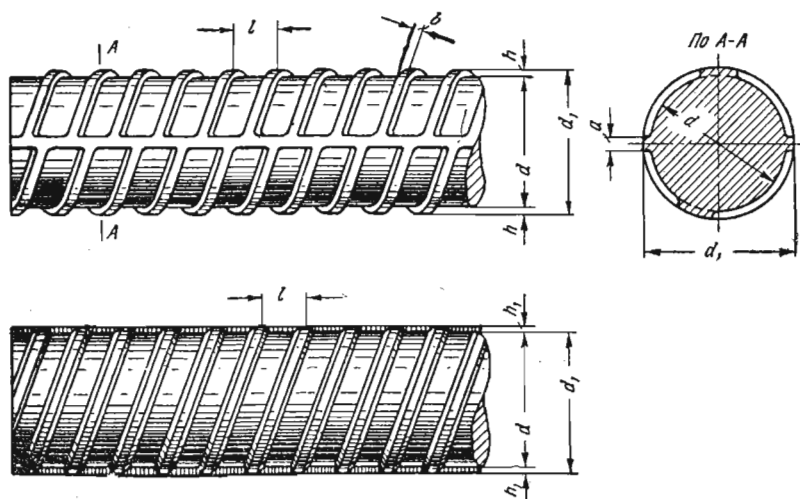
Исследования показывают, что правильное очертание поверхностных винтовых выступов (см. рис. 90) зависит главным образом от требуемого отношения между расчетным диаметром (номером)  $d_p$  профиля и катающим диаметром  $D_k$  валков. Это отношение должно составлять

$$\frac{d_p}{D_k} \leq 0,1.$$

Р и с. 91. Схема прокатки арматурной стали периодического профиля



Р и с. 92. Общий вид стержня из марганцевистой стали

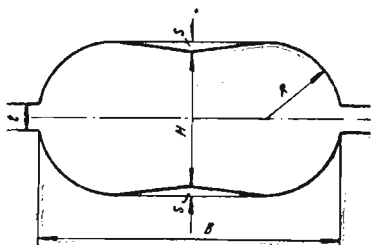


Р и с. 93. Общий вид стержня из углеродистой стали

### Форма и размеры предчистового овала

Обычную круглую сталь прокатывают при постоянном коэффициенте высотной деформации по длине раската, пренебрегая некоторым незначительным непостоянством ширины  $b$  предчистового овала, задаваемого в чистовой калибр.

Практика показывает, что наиболее рациональной формой предчистового калибра в этом случае является овал, очерченный одним радиусом. Однако применение такого овала для арматурной стали не дало



Р и с. 94. Форма предчистового овала для арматурной стали периодического профиля

положительных результатов. Причинами этому являются периодическая неравномерность коэффициента высотной деформации  $b/d$  по длине овального раската и наличие острых выступов на краях по большой оси овала.

Неравномерность коэффициентов высотной деформации по длине раската связана с формой готового профиля, имеющего впадины и выступы. Острые выступы у границ очертания овала по большой оси, охлаждающиеся значительно быстрее, чем остальные части сечения, приводят к дополнительной неравномерности коэффициента высотной деформации.

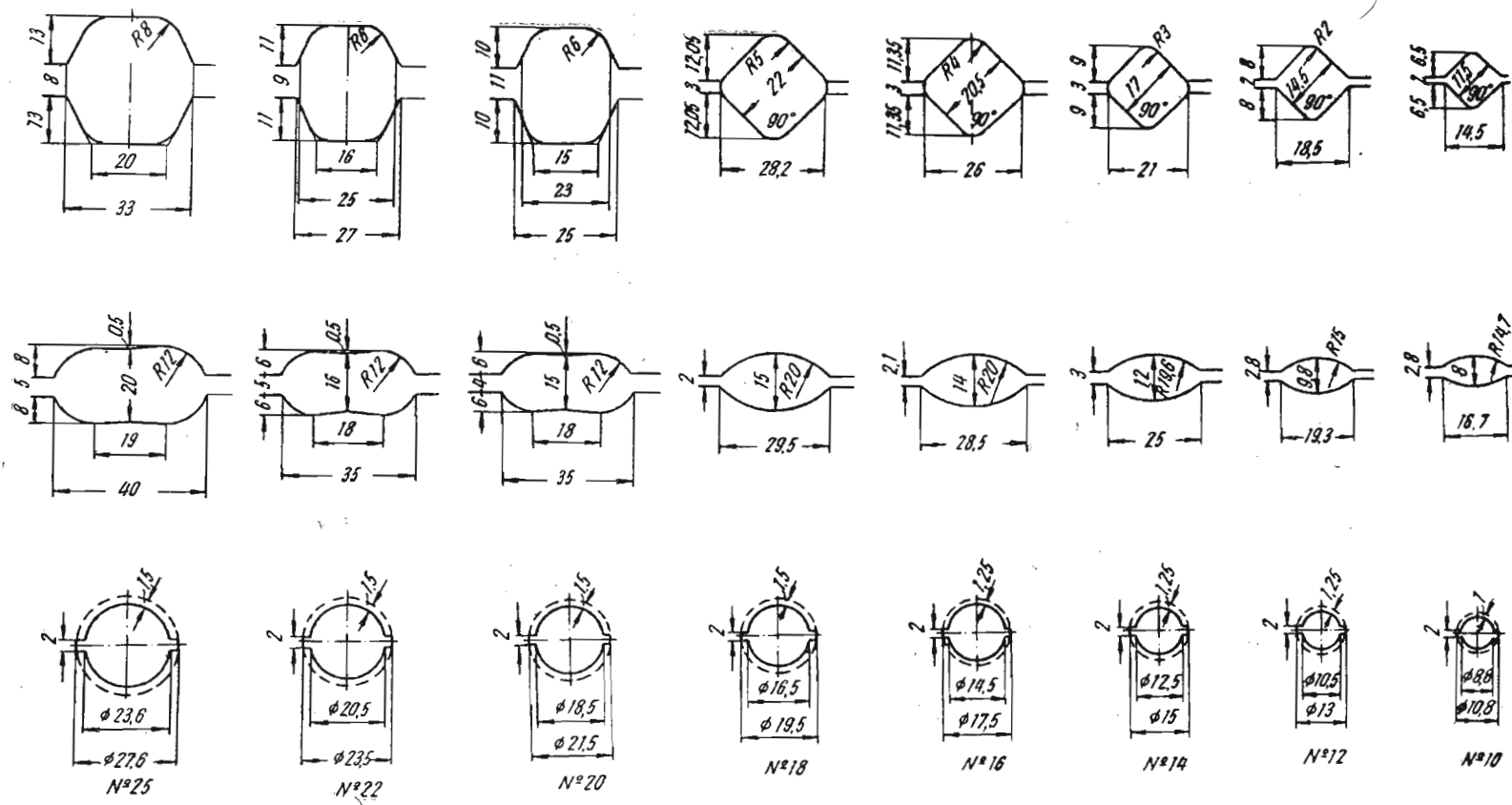
В связи с этим очертание чистового профиля не соответствует конфигурации калибра и по всей длине раската сверху и снизу (по вертикальному диаметру) образуются на выступах либо один острый «зубец», если овал имеет один острый выступ, либо площадка с двумя «зубцами», если овал имеет два острых выступа.

Как правило, высота винтового выступа готового профиля не соответствует глубине впадин калибра. Это несоответствие тем больше, чем больше разница в температурах острых выступов овала и остальной части сечения.

Точное получение поверхностных винтовых выступов и равномерное охлаждение металла по всему сечению готового профиля оказалось возможным при плоском предчистовом овале, имеющем форму, показанную на рис. 94. Размеры таких овалов приведены в табл. 9.

### Форма и размеры предовального раската

Для арматурного профиля можно применять различный по сечению предовальный раскат: квадратный — для малых размеров (до № 16), прямоугольный — для средних размеров (№ 18—45) и специальной конфигурации — для остальных размеров. В некоторых случаях предовальный раскат для средних размеров имеет сечение, близкое по своей форме к сечению для профилей больших размеров. Такая калибровка возможна лишь при универсальности предовального калибра, когда увеличением или уменьшением зазора валков можно выпускать из клетки



Р и с. 95. Форма и размеры калибров трех последних проходов для прокатки арматурной стали № 10—25 периодического профиля

раскаты разных сечений, отличающихся друг от друга главным образом по высоте.

Для получения требуемых размеров овального раската, указанных в табл. 9, необходимы предовальные калибры, форма и размеры которых приведены в табл. 10.

Сравнение данных табл. 10 показывает, что отдельные профили можно прокатывать из предовального раската как квадратного, так и овального сечений. Так, профили № 14 и 16 можно прокатывать по обеим схемам с равнозначными результатами. Однако с точки зрения характера деформации благоприятна прокатка из овального раската.

Из таблицы следует также, что с увеличением номера профиля сечение предовального раската изменяется от квадратного к специальной форме; применение предовального раската специальной формы для профилей выше № 18 более целесообразно, так как способствует лучшему заполнению овального калибра и получению более качественного готового профиля.

Соотношение между шириной и высотой предовального раската

$$\frac{B}{H} = 0,65 \div 0,84.$$

Отношение стороны  $A$  предовального квадрата к расчетному размеру  $d_p$  арматурного профиля

$$\frac{A}{d_p} = 1,20 \div 1,25.$$

Общая схема прокатки арматурной стали № 10—25 периодического профиля с указанием размеров калибров показана на рис. 95.

Все предшествующие калибры и схема калибровки в целом могут быть приняты в каждом конкретном случае в зависимости от типа стана. Системой калибровки может быть прямоугольник — ящичный квадрат или другая подходящая система.

#### *Расположение калибров на валках чистовой клетки*

Расположение калибров на валках чистовой клетки для арматурной стали периодического профиля имеет специфические особенности. Калибры нельзя располагать с произвольным расстоянием между их вертикальными осями, так как при прокатке арматурной стали необходима установка выводных проводок. Эти проводки не могут опираться своими носками на ручки верхнего и нижнего валков. Они должны опираться плечиками на бурты между калибрами. Поэтому минимальная ширина промежуточных буртов равна ширине опорного плечика проводки плюс две высоты продольных выступов профиля, плюс  $5 \div 10$  мм:

$$b_{\text{бурт}} = b_{\text{пл.пр}} + 2h + (5 \div 10), \text{ мм},$$

где  $b_{\text{пл.пр}}$  — ширина плечика проводки, мм.

$h$  — высота поверхностных выступов на профиле, мм.

Ширину крайних буртов принимают исходя из необходимости установки вводной и выводной арматуры.

## КАЛИБРОВКА КВАДРАТНОЙ СТАЛИ

Согласно ГОСТ 2591—57 горячекатаную квадратную сталь поставляют со стороной  $a=5\div 250$  мм. При этом профиль может иметь острые или закругленные углы. Квадратную сталь со стороной до 100 мм включительно обычно поставляют с острыми углами; свыше 100 мм — с углами, закругленными радиусом, равным не более 0,15 стороны квадрата.

В зависимости от формы кромок (острые или закругленные) могут быть две схемы прокатки и калибровки квадратной стали (рис. 96).

## 1. Расчет калибров системы ромб — квадрат

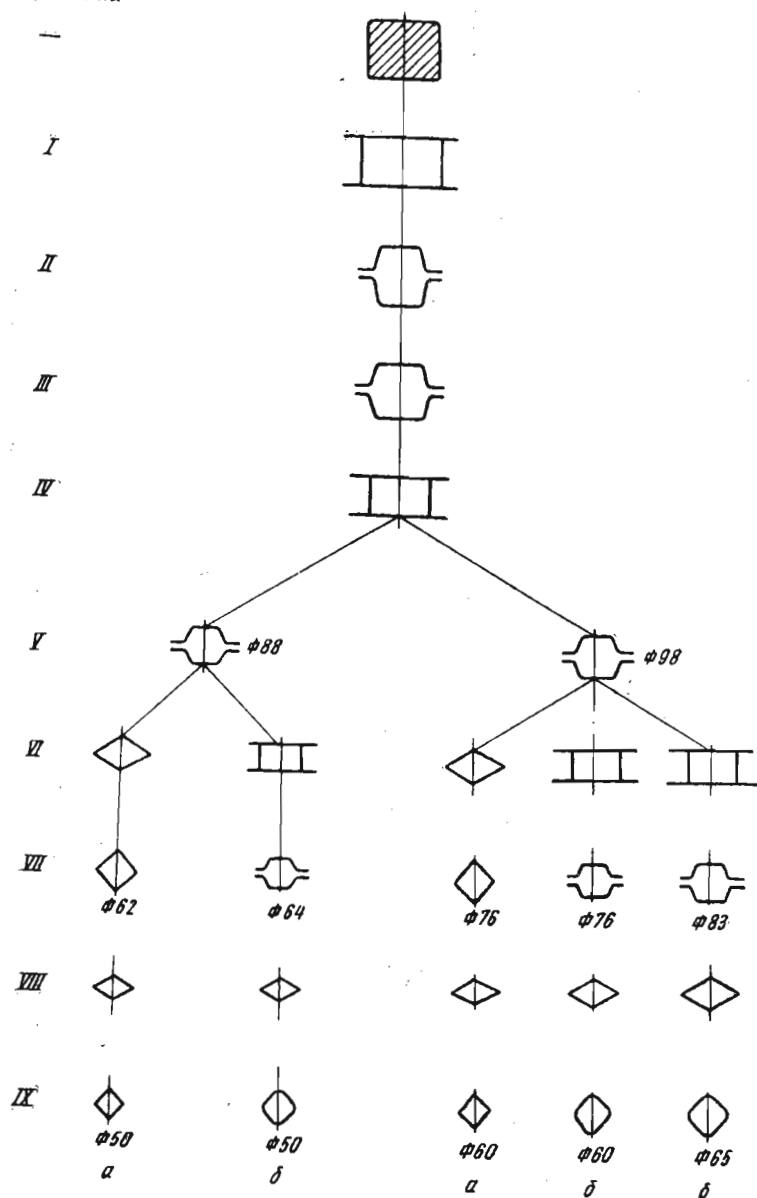
Калибровка квадратной стали зависит от формы конечного профиля. Если готовый квадратный профиль должен иметь острые кромки, то применяемая система квадрат — ромб — квадрат в промежуточных сечениях имеет квадратный и ромбический калибры с незакругленными углами при вершинах. Если же готовый профиль прокатывают без острых кромок, то во всех промежуточных ручьях должны быть закругления углов, расположенных по вертикальной оси симметрии.

На рис. 97 показаны графики зависимости величин  $\frac{A}{h}$ ,  $\frac{h}{b}$  и  $\frac{a}{h}$  от стороны задаваемого в калибр профиля при условии получения острых и закругленных кромок на готовом профиле. Эти графики получены на основе анализа калибровок многих заводов и построены с учетом характера деформации металла таким образом, что каждому отношению  $\frac{A}{h}$  соответствуют конкретные величины  $\frac{a}{h}$  и  $\frac{h}{b}$ , определяющие средние размеры пары калибров: ромба и стороны последующего квадрата. Графики построены по средним величинам вытяжек, обеспечивающим соответствие размеров калибра и прокатываемого раската.

Если задана вытяжка, заведомо отличная от средней по графику (большая), то в целях избежания переполнения калибров высота ромба должна определяться по стороне  $a$  получаемого квадрата и соотношению  $\frac{a}{h}$ , а ширина — по размеру  $A$  и отношениям  $\frac{A}{h}$  и  $\frac{h}{b}$ . Такой метод нахождения размеров ромба объясняется следующим.

Ширина ромба должна удовлетворять условиям, что в нем не будет переполнения. Поэтому вначале по отношению  $\frac{A}{h}$  получают «условное» значение  $h$ , по которому затем определяют ширину из отношения  $\frac{h}{b}$ , найденного по заданному  $A$ . Действительная высота  $h$  ромба определится из отношения  $\frac{a}{h}$ . При деформации ромба в последующем квадратном калибре со стороной  $a$  должно обеспечиваться нормальное заполнение калибра. Если высота  $h$  ромба определена неправильно, то последующий квадратный калибр будет либо переполняться, либо не

Номер клетки



Р и с. 96. Схема прокатки квадратной стали с острыми кромками (а) и с закруглением углов (б)

заполняться. Если же вытяжки принять меньше средних, то все расчеты следует вести по стороне А исходного квадрата. Практически при этом может быть лишь некоторое незаполнение ромбического калибра по ширине и невыполнение углов по горизонтальной диагонали. При расчетах вполне допустимо округление получаемых размеров до целых чисел.

Наличие одной линии на предлагаемых графиках для каждого соотношения упрощает расчет калибровки, так как это не вызывает затруднений в выборе приведенных коэффициентов.

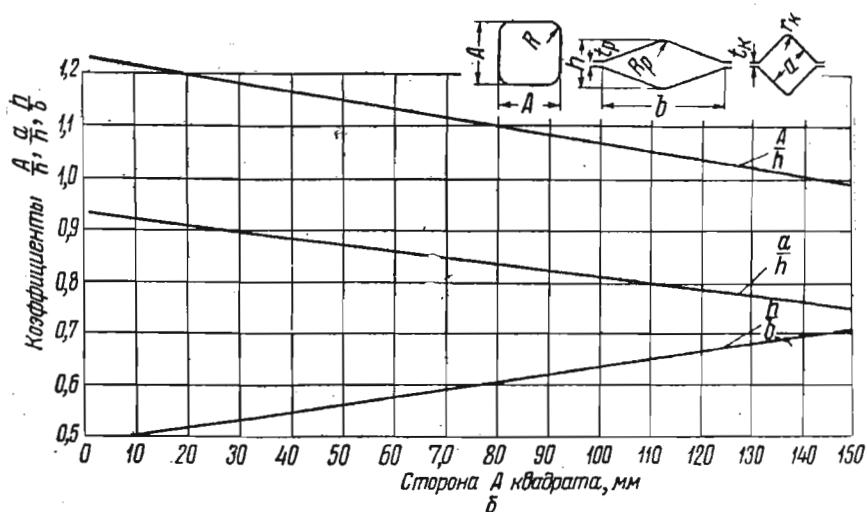
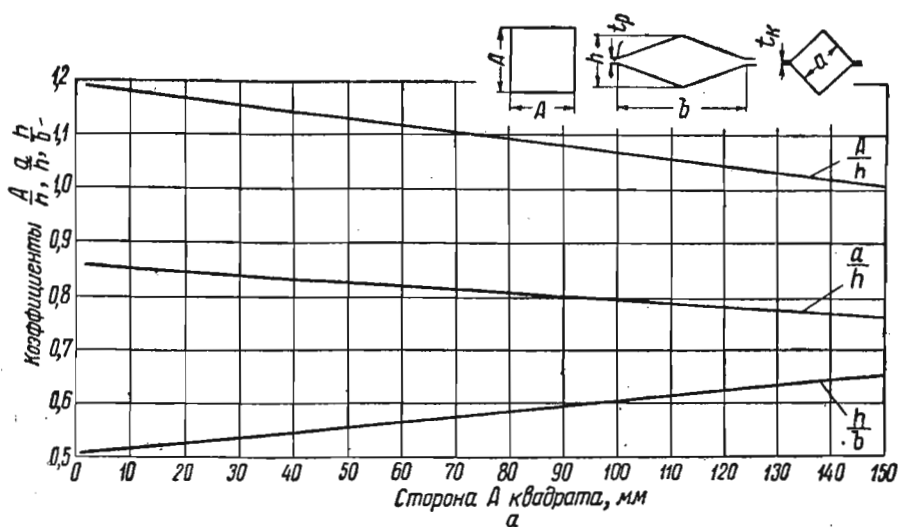


Рис. 97. Изменение средних значений основных соотношений размеров квадрата, задаваемого в ромб, и ромба, задаваемого в последующий квадрат, при острых (а) и закругленных (б) углах

При построении графиков размер ромба по ширине принят не по крайним конструктивным точкам, а по точкам разъема валков. Это объясняется тем, что в каждом из обоих случаев зазор в ромбическом калибре принимается различным: для квадратной стали с острыми кромками зазор значительно меньше, чем для квадратной стали с плавными очертаниями. Эти зазоры, а также радиус закругления в вершине ромба могут быть определены по соответствующим графикам (рис. 98 и 99).

Радиус закругления в вершине ромба, зависящий от радиуса закругления угла в вершине последующего квадрата, может быть определен также по равенству

$$R_p = (1,2 \div 1,3) r_k.$$

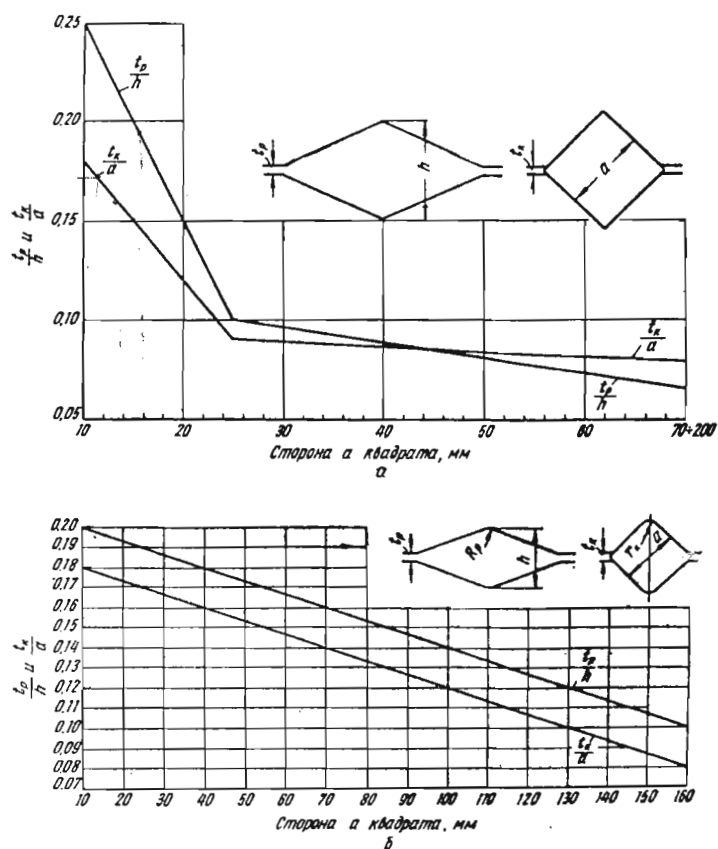


Рис. 98. Зависимость зазора калибра в ромбе ( $t_p$ ) и квадрате ( $t_k$ ) с острыми (а) и закругленными (б) углами от высоты ромба и стороны квадрата

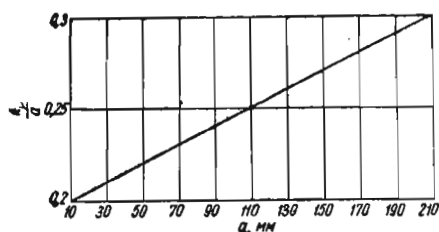


Рис. 99. Зависимость радиуса закругления  $R_p$  в вершине ромба (см. рис. 98, б) по вертикальной диагонали от стороны  $a$  последующего квадрата

### Последовательность расчета калибров и режимов обжатий системы ромб — квадрат

Преимуществом графического метода расчета калибров, а по ним и режимов обжатий является его простота, а также и то, что по одному из заданных размеров квадрата можно определить размеры ромбического и искомого квадратного калибров.

Например, задан исходный размер квадратного сечения со стороной  $A$ . Необходимо определить размеры ромбического и последующего квадратного калибров. Последовательность расчета одинакова как для квадратов и ромбов с закруглением вершин углов, так и без закругления.

По графикам (см. рис. 97) на оси абсцисс находим сторону заданного исходного квадрата  $A$ .

По вертикали от этого размера находим на соответствующих прямых отношения  $\frac{A}{h}$ ,  $\frac{a}{h}$ ,  $\frac{h}{b}$ , где  $h$  и  $b$  — высота и ширина ромба,  $a$  — сторона искомого квадрата.

По отношению  $\frac{A}{h}$  определяем высоту ромбического калибра, по отношению  $\frac{a}{h}$  — сторону последующего квадрата, по  $\frac{h}{b}$  — ширину ромбического калибра.

Если же задан размер конечного квадрата, то размеры ромбического и исходного квадратного калибров находят в обратном порядке.

По заданной величине  $a$  находят соответствующее значение на оси абсцисс, полагая условно, что  $A$  является стороной конечного квадрата. Тогда по вертикали от точки, отвечающей заданному размеру  $a$ , находят отношения  $\frac{a}{h}$ ,  $\frac{A}{h}$ ,  $\frac{h}{b}$ .

Вначале по отношению  $\frac{a}{h}$  определяют высоту ромбического калибра, затем по отношению  $\frac{h}{b}$  — ширину ромбического калибра и, наконец, размер исходного квадрата  $A$ .

После этих расчетов по графикам (см. рис. 98 и 99) определяют зазоры в калибрах и радиусы закругления вершин углов, затем производят окончательное построение калибров.

Обжатия в калибрах могут быть определены двумя способами:

- 1) как разность диагоналей при подаче квадрата в ромб и ромба в квадрат;
- 2) по приведенным высотам.

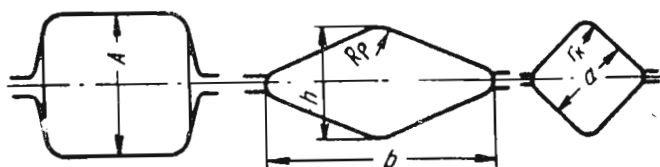
## 2. Особенности прокатки квадратной стали с острыми кромками

Схемы прокатки квадратной стали с острыми кромками (углами) и с закругленными углами имеют много общего. Однако они отличаются друг от друга как изменением формы калибров в последних четырех проходах, так и принимаемыми в них обжатиями.

При прокатке квадратной стали с закругленными углами важно, чтобы в последних трех проходах соблюдалось условие получения правильных по форме предчистовых квадрата и ромба с закругленными углами по малой оси. Это нужно для того, чтобы было обеспечено необходимое закругление углов в чистовом квадрате (рис. 100). Например, для наиболее ходовых размеров квадратной стали со стороной  $a = 50 \div 90$  мм этому отвечает соотношение размеров диагоналей предчистового ромба  $\frac{h}{b} = 0,62 \div 0,74$ , а также радиус закругления в вершине ромба  $R_p = (0,2 \div 0,30) a$ . Форма и размеры предчистового ромба определяются графиками (см. рис. 97, б и 99).

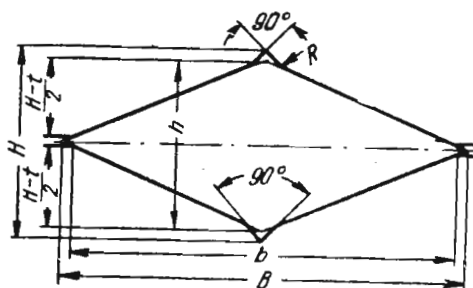
В случае предчистового ромба и чистового квадрата, имеющих закругления углов, при отношениях  $\frac{h}{b} = 0,74$ ;  $\frac{a}{b} = 0,59$  и  $\frac{a}{h} = 0,835$  процесс прокатки квадратной стали со стороной  $a = 50 \div 100$  мм вполне устойчив, и профиль формируется удовлетворительно.

Прокатка квадратного профиля с острыми кромками имеет свои особенности и может быть успешно проведена только в том случае, если последние четыре прохода будут осуществлены в калибрах системы



Р и с. 100. Схема калибровки квадратной стали с закругленными углами для последних трех проходов

ромб — квадрат с незакругленными углами. Прокатка квадратной стали с острыми кромками со стороной  $a = 10 \div 50$  мм успешно производится при соотношениях размеров предчистового ромба и чистового квадрата  $\frac{h}{b} = 0,76$ ,  $\frac{a}{h} = 0,77$  и  $\frac{a}{b} = 0,58$ . При этом предчистовой ромб должен



Р и с. 101. Предчистовой ромб для квадратной стали с острыми кромками

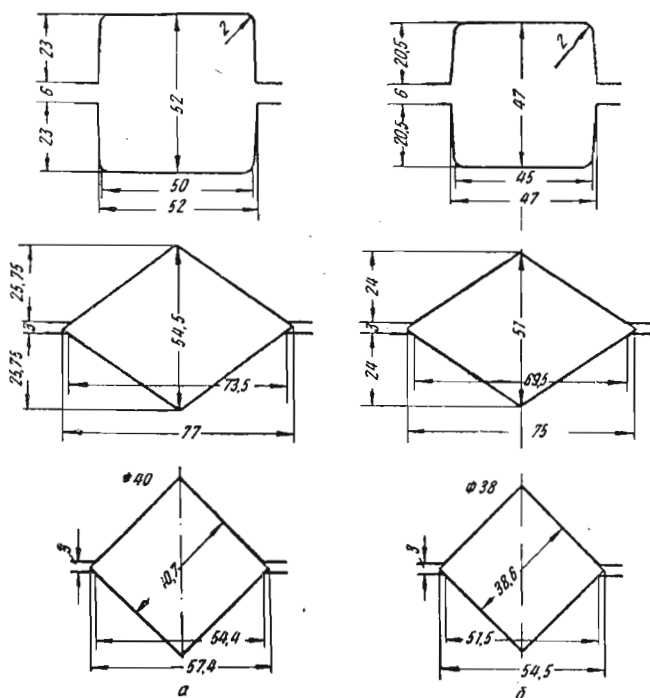
иметь предложенное Б. В. Мерекиным очертание вершины, которое в чистовом калибре обеспечит точное получение острых кромок (рис. 101).

Предчистовой ромб для квадратной стали с острыми кромками строят следующим образом. Высоту ромба  $h$  увеличивают до размера  $H$  на величину  $H - h = 2 \div 8$  мм соответственно стороне квадрата от 10 до 150 мм. Таким образом, выступ на одну сторону ромба равен

$$\frac{H - h}{2} = 1 \div 4 \text{ мм.}$$

Полученное очертание вершин ромба способствует хорошему оформлению ребер чистового квадрата, расположенных по горизонтальной оси калибра. Чтобы углы у чистового квадрата были строго прямыми, вершины предчистового ромба также врезают под углом  $90^\circ$ . Конструктивные точки соединяют радиусом, равным  $R = (1 \div 2)h$ . Все остальные размеры определяют по ранее приведенным графикам для ромба с острыми кромками.

Большое значение для получения острых кромок чистового профиля имеет форма исходного квадрата, задаваемого в первый ромб. Углы этого квадрата желательно иметь с минимальным закруглением.



Р и с. 102. Размеры калибров и схема прокатки квадратной стали сечением 40×40 (а) и 38×38 (б) мм с острыми кромками (три последних прохода)

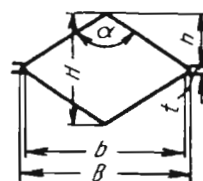
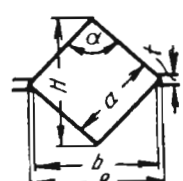
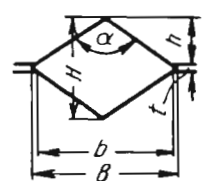
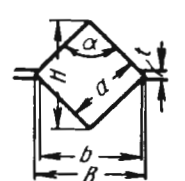
Существенную роль играет и режим обжатий. Если для получения профиля с закругленными углами рекомендуется назначать одно и то же обжатие при средней вытяжке  $\mu = 1,3 \div 1,35$  от предчистового квадрата к чистовому, то при прокатке квадрата с острыми кромками должны применяться более интенсивные обжатия.

Исследования показывают, что точное получение острых кромок на квадратной стали возможно только при интенсивных обжатиях в последних проходах и применении ромба специальной формы.

Для прокатки стали с острыми кромками возможны и другие способы. Если предчистовой квадрат выходит из ящичного калибра с весьма малым радиусом закругления углов, то можно рекомендовать для квадрата средних размеров схему предчистовой ящичный квадрат — ромб — чистовой квадрат. На рис. 102 такая схема показана для квадратной стали с острыми кромками, имеющей размеры 40×40 и 38×38 мм. Как видно из рисунка, предчистовые ящичные квадраты имеют здесь очень малые радиусы закруглений в углах и малые выпуски. Малые радиусы закруглений углов не вызывают сомнений в практической возможности применения таких калибров, если не считать возможности концентрации напряжений в углах. Однако малые выпуски в этих калибрах нежелательны из-за трудности восстановления первоначальных размеров ручья при переточках.

Наиболее полно представлена опробованная на практике схема прокатки квадратной стали с острыми кромками (рис. 103) на десятиклетевом среднесортном стане 300. Неуказанные на схеме размеры промежуточных раскатов, получающихся в валках с гладкой бочкой, могут быть найдены расчетным путем. Для построения предчистовых и чистовых калибров по указанной схеме все необходимые данные приведены в табл. 11.

Данные для построения калибров в последних клетях стана 300

Форма и размеры калибров по клетям																								
Размеры сторон квадрата, мм																								
	B, мм	b, мм	H, мм	h, мм	t, мм	$\alpha$ , град	B=H мм	b, мм	a, мм	t, мм	$\alpha$ , град	B, мм	b, мм	H, мм	h, мм	t, мм	$\alpha$ , град	B=H мм	b, мм	a, мм	t, мм	$\alpha$ , град		
20	45,3	40,8	30,0	13,5	3,0	113	35,3	33,3	25,0	2,0	90	37,1	34,3	26,0	12,0	2,0	110	28,7	26,7	20,3	2,0	90		
22	51,4	46,9	34,0	15,5	3,0	113	36,8	34,8	26,0	2,0	90	40,8	38,0	28,6	13,3	2,0	110	31,6	29,6	22,3	2,0	90		
25	57,5	52,9	38,0	17,5	3,0	113	39,6	37,6	28,0	2,0	90	46,4	43,5	32,5	15,25	2,0	110	35,8	33,8	25,3	2,0	90		
28							45,3	43,3	32,0	2,0	90	51,4	48,5	36,0	17,0	2,0	110	40,2	38,2	28,4	2,0	90		
30	66,5	62,0	44,0	20,5	3,0	113	50,9	48,9	36,0	2,0	90	54,8	52,0	38,4	18,2	2,0	110	42,4	40,4	30,0	2,0	90		
32	69,5	65,0	46,0	21,5	3,0	113	53,8	51,8	38,0	2,0	90	58,4	55,5	40,9	19,45	2,0	110	45,3	43,3	32,0	2,0	90		
35	75,6	71,0	50,0	23,5	3,0	113	56,6	54,6	40,0	2,0	90	63,5	60,6	44,5	21,25	2,0	110	49,5	47,5	35,0	2,0	90		

Номер  
клетки  
I

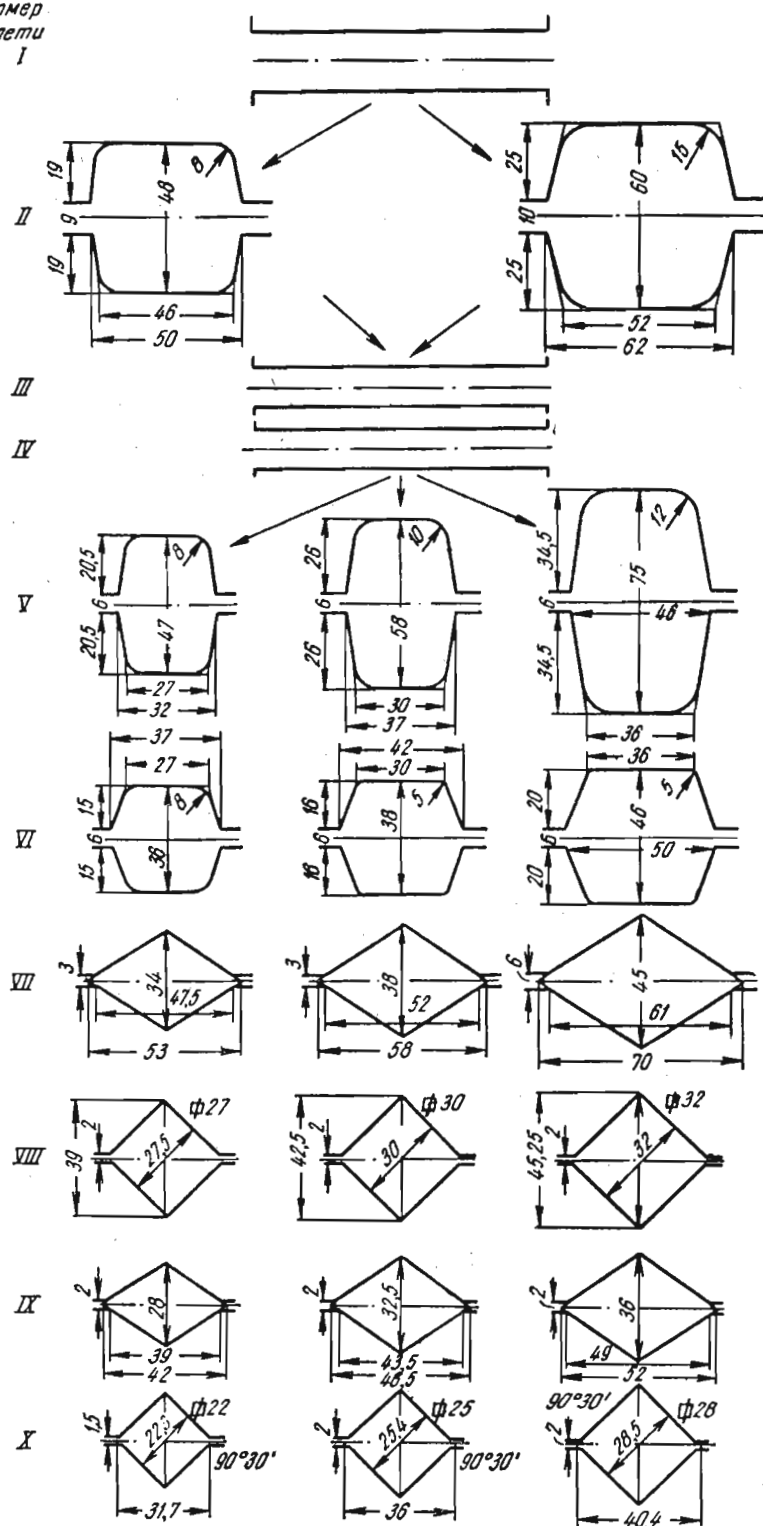


Рис. 103. Общая схема прокатки квадратной стали со стороной 22—32 мм на десятиклетевом стане 300

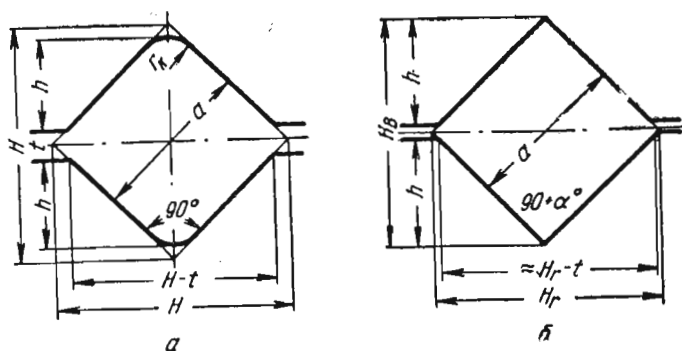
Практика прокатки квадратной стали особенно с острыми кромками вызвала необходимость в установке за чистовой клетью дополнительного устройства, устраняющего скручивание раската по выходе из калибра. Такое скручивание происходит относительно продольной оси раската под влиянием его массы.

Устройством, предотвращающим скручивание, являются холостые ролики с квадратным калибром. При использовании их раскат удерживается в двух местах, выходит из валков прямо, без искажений острых кромок.

### 3. Построение чистовых калибров для квадратной стали

Чистовой калибр для квадратной стали с закруглением углов (рис. 104, а) строят следующим образом. По заданной стороне квадрата определяют его диагональ  $H$ .

Затем находят или принимают по одному из графиков (см. рис. 98) зазор  $t$  в калибре. По величинам  $H$  и  $t$  под углом  $90^\circ$  вычерчивают стороны квадратного калибра с радиусом закругления вершин  $r_k$ , преду-



Р и с. 104. Элементы чистового калибра для квадратной стали:  
а — с закруглением углов; б — с острыми кромками

смотренным ГОСТом. При врезе ручьев в валки требуется знать диаметр валков по дну калибра с учетом радиуса закругления  $r_k$ . Для этого следует определить глубину ручьев, которую находят по выражению

$$h = \frac{H-t}{2} - 0,41r_k.$$

Горизонтальная проекция очертания ручья или шаблона будет равна разности  $H-t$ .

Чистовой калибр для квадратной стали с острыми кромками и углом у вершин в  $90^\circ$  строят в той же последовательности. Так как в этом случае  $r_k=0$ , глубина вреза ручья

$$h = \frac{H-t}{2}.$$

Однако при прокатке квадратной стали с острыми кромками должна быть небольшая разность диагоналей в чистовом калибре: вертикальная диагональ  $H_v$  всегда должна быть меньше горизонтальной  $H_r$ . Это объясняется характером деформации металла в калибре, связанным с тем, что острые углы задаваемого в чистовой квадрат ромба имеют температуру ниже, чем остальная часть профиля. В результате менее охлажденная горизонтальная диагональ даст большую усадку при ох-

лаждении и правильные размеры готового квадрата нарушатся. Разность диагоналей вызывается также и быстрым износом чистового калибра в вертикальном направлении, как и при деформации в чистовом калибре для круглой стали (см. гл. VII). Поэтому на практике угол при вершинах квадратного калибра берут больше  $90^\circ$  на величину  $\alpha = 30' \div \div 3^\circ$  (рис. 104, б). Обычно угол при вершинах калибра для квадратной стали равен  $92^\circ - 92^\circ 30'$ . При этом

$$H_r > H_b.$$

Калибр строят в следующем порядке. Вертикальную диагональ принимают равной  $H_b = 1,41 a$ . Горизонтальную диагональ  $H_r$  находят построением угла при вершине. Эту величину можно найти и расчетным путем:

$$\frac{H_r}{2} = \frac{H_b}{2} \operatorname{tg} \frac{90^\circ + \alpha}{2}$$

или

$$H_r = H_b \operatorname{tg} \frac{90^\circ + \alpha}{2}.$$

Горизонтальная проекция очертания ручья такого калибра может быть принята равной  $H_r - t$ .

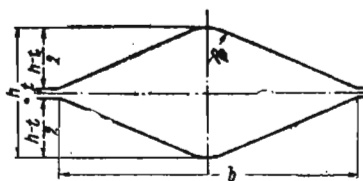
При определении диагоналей в квадратном калибре необходимо умножать сторону квадрата на величину 1,41 без округления, так как в противном случае это приведет к ошибкам при изготовлении шаблонов и, в конечном счете, к ошибкам при прокатке: не получится профиль с точными размерами сторон.

В равной мере необходимо точно определять и остальные размеры элементов квадратного калибра.

#### *Построение калибра предчистового ромба для квадратной стали с закруглением углов*

Для расчета и построения предчистового ромбического калибра определяют по графику (см. рис. 97) общую высоту  $h$ . Затем найденным или принятым радиусом  $R_p$  проводят дуги. Далее по величине  $t$  для ромба (см. рис. 98) и величине  $b$  строят калибр (рис. 105).

Р и с. 105. Элементы предчистового ромба, применяемого при прокатке квадратной стали с закруглением углов



#### *Площади поперечного сечения*

Площадь поперечного сечения квадрата с закруглениями углов определяют по формуле

$$F_k = a^2 \left( 1 - 0,86 \frac{r^2}{a^2} \right).$$

Для определения диагонали квадрата с учетом закругления углов применяют формулу

$$2h + t = a \left( 1,414 - 0,83 \frac{r}{a} \right),$$

где  $a$  — сторона квадратного сечения,  
 $r$  — радиус закругления.

Практически  $\frac{r}{a} = 0,1 \div 0,2$ . Этому соответствует коэффициент уменьшения площади поперечного сечения

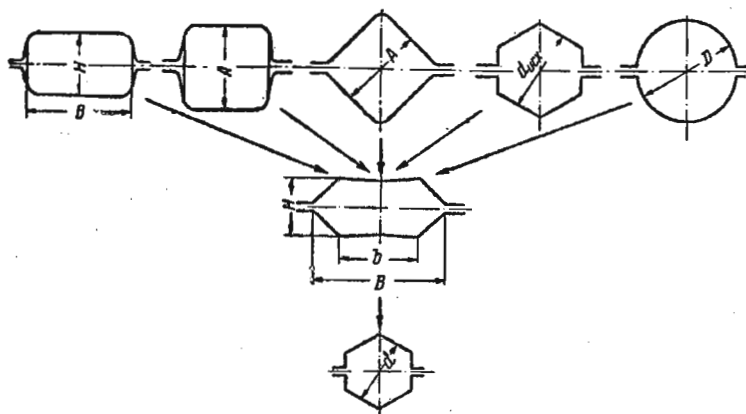
$$c_k = \frac{F_k}{a^2} = 1 - 0,86 \frac{r^2}{a^2} \approx 0,965 \div 0,99.$$

При расчете ромбических сечений можно принять этот же коэффициент. Определение площадей ромбического и квадратного калибров при отсутствии радиусов закругления не представляет затруднений. Калибры на валках располагают по рекомендациям, изложенным в гл. IV.

## КАЛИБРОВКА ШЕСТИГРАННОЙ СТАЛИ

Горячекатаную шестигранную сталь характеризуют диаметром вписанного в ее сечение круга по ГОСТ 2879—57 размером от 8 до 100 мм. Таким образом диаметр вписанного круга является размером профиля.

Прокатка шестигранной стали может осуществляться по различным схемам (рис. 106). Однако во всех случаях предчистовый должен быть точно выполненный шестиугольный калибр специальной формы, без применения которого получить качественный профиль почти не удастся.



Р и с. 106. Схемы калибровки для последних трех клеток при прокатке шестигранной стали

Как видно из схем, раскат, задаваемый в предчистовой калибр, может быть получен из прямоугольного, квадратного, шестиугольного и круглого калибров. Все эти схемы находят практическое применение.

### 1. Характеристика схем калибровки, применяемых при прокатке шестигранной стали

*Схема калибровки прямоугольник — предчистовой шестиугольник — шестиугольник* является наиболее распространенной. Преимуществом ее является хорошее формирование предчистового шестигранника при небольших коэффициентах высотной деформации как за счет исходной ширины прямоугольного раската, так и за счет неравномерной деформации по краям раската. Недостатком схемы является неравномерная деформация металла по ширине, что приводит к преждевременной местной выработке боковых сторон предчистового шестиугольника.

*Схема калибровки квадрат — предчистовой шестиугольник — шестиугольник* характеризуется более равномерной деформацией металла по ширине, а заполнение предчистового шестиугольника осуществляется главным образом за счет уширения. Недостатком этой схемы являются значительные коэффициенты высотной деформации, так как исходные

квадраты принимают больших размеров. Схема характеризуется известной универсальностью.

Схема калибровки шестиугольник — предчистовой шестиугольник — шестиугольник также характеризуется большей равномерностью деформации металла по ширине в каждом калибре. Однако этой схеме свойственны высокие коэффициенты деформации в предчистовом шестиугольнике. Применяют ее на практике сравнительно редко.

Схема калибровки круг — предчистовой шестиугольник — шестиугольник во многом имеет сходство с предыдущей схемой. Можно лишь отметить, что в предчистовом шестиугольнике круглый профиль прокатывается в условиях неравномерной деформации металла по ширине. Заполнение предчистового шестиугольного калибра при исходном круге происходит вполне удовлетворительно.

Большинство указанных выше схем нашло практическое применение на мелкосортных станах.

## 2. Методика расчета калибров и режимов обжатий при прокатке шестигранной стали

Расчет калибровки рекомендуется вести против хода прокатки. Предварительно необходимо иметь характеристики прокатного стана и валков. Методика расчета размеров калибров и режимов обжатий сводится к следующему.

По заданному размеру чистового профиля определяют элементы чистового калибра. В соответствии с размерами чистового профиля определяют ширину предчистового шестиугольника (рис. 107).

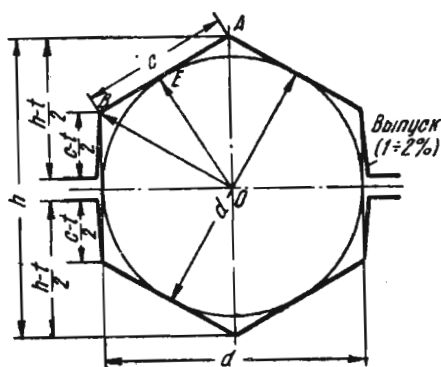
$$\eta = \frac{B}{h} = \frac{B}{2c},$$

откуда ширина предчистового шестиугольника (см. рис. 106).

$$B = \eta 2c.$$

Высоту предчистового шестиугольника определяют как разность между размером готового профиля и уширением раската в чистовом калибре.

Размеры и форму сечения, задаваемого в предчистовой шестиугольник, определяют либо по коэффициентам деформации, либо по зависимостям, приведенным ниже при рассмотрении конкретных методов расчета. После нахождения размеров калибров определяют площади поперечного сечения и вытяжки по проходкам.



Р и с. 107. Основные элементы чистового калибра шестигранной стали

Порядок построения калибров аналогичен построению ранее рассмотренных подобных калибров.

### Расчет чистового калибра

Для построения чистового калибра шестиугольного профиля проводят окружность, диаметр которой соответствует размеру раската и описывают эту окружность шестиугольником (см. рис. 107).

Сторона шестиугольника может быть выражена через диаметр вписанной окружности. Из треугольника  $AOE$  имеем:

$$AE^2 + OE^2 = AO^2; \quad AE = \frac{c}{2} = \frac{OA}{2}; \quad OE = \frac{d}{2};$$

$$\left(\frac{c}{2}\right)^2 + \left(\frac{d}{2}\right)^2 = c^2;$$

$$c = \frac{\sqrt{3}d}{3} = 0,577d.$$

Площадь калибра (профиля)

$$F = 6 \cdot \frac{1}{2} AB \cdot OE = 3 \cdot 0,577 \frac{d^2}{2} = 0,866d^2.$$

По месту разъема валков делают небольшой выпуск в пределах 1—2%. При большом выпуске калибра профиль не будет отвечать требованиям ГОСТа. Зазор  $t$  между валками принимают таким же, как и при прокатке круглой и квадратной стали. Общая высота калибра

$$h = c + 2c \sin 30^\circ = 2c,$$

откуда

$$\frac{h-t}{2} = c - \frac{t}{2}.$$

### Расчет предчистового шестиугольного калибра

В связи с тем что для чистового калибра принимают значительные абсолютные обжатия и, как следствие, в нем происходит большое уширение, в предчистовом шестиугольном калибре (рис. 108) приходится предусматривать выпуклость по дну ручьев.

Выпуклость  $s$  на каждой большой стороне калибра принимают в зависимости от размера конечного профиля, и она составляет 0,25—1,5 мм.

Задавшись соответствующим коэффициентом высотной деформации, можно определить ширину предчистового шестиугольного калибра

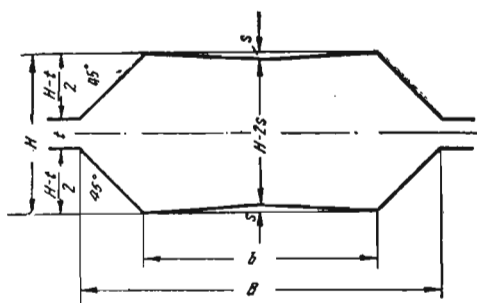
$$B = \eta \cdot 2c = 2 \cdot 0,577d\eta = 1,154d\eta.$$

Абсолютное обжатие в чистовом калибре

$$\Delta h_r = B - 2c = 1,154d\eta - 1,154d = 1,154d(\eta - 1).$$

Уширение можно найти по одной из известных формул.

По найденным величинам определяют общую высоту калибра и все его остальные размеры. Уклон боковых сторон калибра принимают под углом  $45^\circ$ . Зазор  $t$  в предчистовом шестиугольном калибре принимают таким же как и в предчистовых овальных калибрах. Коэффициент высотной деформации  $\eta$  в чистовом шестиугольном калибре исходя из условий точного формирования углов профиля принимают в пределах  $\eta = 1,25 \div 1,45$ .



Р и с. 108. Предчистовой калибр для прокатки шестигранной стали

*Пример.* Определить размеры предчистового калибра для шестигранной стали размером  $d=20$  мм. Катающий диаметр валков  $D_k = 300$  мм.

Зададимся коэффициентом высотной деформации в чистовом калибре  $\eta = 1,35$ .

Размер чистового калибра

$$2c = 2 \cdot 0,577d \approx 23,1 \text{ мм};$$

ширина предчистового шестиугольного калибра

$$B = 1,154 \cdot 20 \cdot 1,35 = 31,1 \text{ мм};$$

обжатие в чистовом калибре

$$\Delta h = 31,1 - 23,1 = 8,0 \text{ мм}.$$

Уширение в чистовом калибре (приближенно)

$$\Delta b = 0,35 \frac{8,0}{31,1} \sqrt{150 \cdot 8,0} \approx 3,2 \text{ мм}.$$

Общая высота предчистового шестиугольного калибра

$$H = d - \Delta b = 20 - 3,2 = 16,8 \text{ мм}.$$

Задаемся выпуклостью дна ручья  $s=0,4$  мм.

Тогда

$$H - 2s = 16,8 - 2 \cdot 0,4 = 16 \text{ мм}.$$

Принимаем зазор в калибре  $t=3$  мм. Глубина ручья

$$\frac{H-t}{2} = \frac{16,8-3}{2} = 6,9 \text{ мм}.$$

При уклоне боковых сторон под углом  $45^\circ$  ширина калибров по дну ручья

$$b = B - (H - t) = 31,1 - 13,8 = 17,3 \text{ мм}.$$

Размер  $b$  должен быть всегда больше размера  $c$  (в нашем случае  $17,3 > 0,577d$  или  $17,3 > 11,54$ ).

Площадь предчистового шестиугольного калибра

$$F = BH - \left[ 2 \left( \frac{H-t}{2} \right)^2 + bs \right]. \quad (84)$$

Для нашего случая

$$F = 31,1 \cdot 16,8 - (2 \cdot 6,9^2 + 17,3 \cdot 0,4) \approx 421 \text{ мм}^2.$$

Площадь чистового калибра (поперечное сечение готового профиля)

$$F_q = 0,866 \cdot 20^2 \approx 346 \text{ мм}^2.$$

Коэффициент вытяжки в чистовом калибре

$$\mu_{\text{ч}} = \frac{421}{346} = 1,22.$$

*Расчет калибровки по схеме прямоугольник — предчистовой шестиугольник — шестиугольник*

Рассчитаем для примера калибровку для шестигранной стали размером  $d=26$  мм.

Размер чистового калибра (см. рис. 107)

$$c = 0,577 d = 0,577 \cdot 26 = 15 \text{ мм.}$$

Общая высота по диагонали

$$h = 2c = 2 \cdot 15 = 30 \text{ мм.}$$

Принимаем уклон боковых стенок 1,5%. Зазор в калибре

$$t = 0,1 h = 0,1 \cdot 30 = 3 \text{ мм.}$$

Площадь калибра

$$F = 0,866 d^2 = 0,866 \cdot 26^2 \approx 585 \text{ мм}^2.$$

Зададимся коэффициентом высотной деформации в чистовом калибре  $\eta=1,4$ . Тогда общая ширина предчистового шестиугольника

$$B = \eta h = 1,4 \cdot 30 = 42 \text{ мм.}$$

Вычертив калибр с уклоном боковых стенок в  $45^\circ$  при зазоре  $t=3$  мм, получим ширину предчистового калибра  $b$  по дну ручья (см. рис. 108). Принимая обжатие  $\Delta h$  как абсолютную разность

$$\Delta h = B - h = 42 - 30 = 12 \text{ мм,}$$

при катающем диаметре  $D_{\text{к}}=300$  мм (принимаем условно, а для конкретного случая нужно определить), получаем уширение в чистовом калибре (приближенно)

$$\Delta b = 0,35 \frac{12}{42} \sqrt{150 \cdot 12} = 4,25 \text{ мм.}$$

Следовательно, общая высота предчистового шестиугольного калибра

$$H = d + \Delta b = 26 + 4,25 \approx 22 \text{ мм.}$$

Принимаем одностороннюю выпуклость  $s=0,5$  мм. Тогда

$$H - 2s = 22 - 2 \cdot 0,5 = 21 \text{ мм.}$$

Глубина ручья

$$\frac{H - t}{2} = \frac{22 - 3}{2} = 9,5 \text{ мм.}$$

Ширина калибра по дну

$$b = 42 - 19 = 23 \text{ мм.}$$

Как следует из расчета, все размеры предчистового калибра в значительной степени зависят от расчетного уширения.

Площадь предчистового шестиугольника по формуле (84) составит

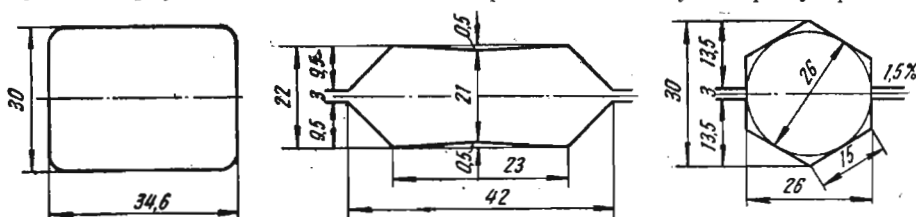
$$F = 42 \cdot 22 - (2 \cdot 9,5^2 + 23 \cdot 0,5) = 732 \text{ мм}^2.$$

В шестиугольный предчистовой калибр задают прямоугольный раскат. Толщина его может быть определена также по коэффициенту высотной деформации в предчистовом калибре. Примем этот коэффициент  $\eta_{\text{ш}}=1,35$ .

Тогда толщина задаваемого раската

$$H_n = 1,35 \cdot 22 \approx 30 \text{ мм.}$$

Ширина прямоугольного раската должна быть в соответствии с размером  $b$  предчистового шестиугольного калибра и с величиной уширения в нем с тем, чтобы обеспечить нормальное заполнение калибра металлом. Однако определить уширение в шестиугольном предчистовом калибре трудно, так как процесс прокатки происходит в условиях неравномерной деформации металла по ширине. Поэтому ширину раската,



Р и с. 109. Калибровка трех последних проходов при прокатке шестигранной стали по системе прямоугольник—предчистовой шестиугольник—шестиугольник

задаваемого в этот калибр, приходится принимать приближенно. Практически она составляет

$$B_{np} = (0,80 \div 0,85) B.$$

После предварительного определения ширины задаваемого раската необходимо проверить полученный размер на уширение по условию, что металл обжимается на валках с гладкой бочкой. Несомненно, уширение при этом получится таким, что предчистовой калибр, если бы он был ящичным, не был бы заполнен по ширине. Однако наклонные боковые стенки предчистового шестиугольного калибра при неравномерной деформации в нем прямоугольного раската способствуют развитию вынужденного уширения, и калибр поэтому будет заполнен полностью.

Примем для нашего случая

$$B_{np} = 0,825 \cdot 42 = 34,6 \text{ мм.}$$

Тогда по общим высотам  $H_n$  раската и  $H_{кал}$  калибра обжатие

$$\Delta h_{ш} = H_n - H_{кал} = 30 - 22 = 8 \text{ мм.}$$

Уширение в предчистовом шестиугольнике при данном обжатии и катящем радиусе  $R_k = 180 \text{ мм}$  приближенно составит

$$\Delta b_{ш} = 0,35 \frac{8}{30} \sqrt{180 \cdot 8} \approx 3,5 \text{ мм.}$$

Следовательно, ширина раската, если бы прокатка проходила в валках с гладкой бочкой, будет

$$B_n = B_{np} + \Delta b_{ш} = 34,6 + 3,5 \approx 38 \text{ мм.}$$

Разность ширин калибра и раската

$$B_{кал} - B_n = 42 - 38,0 = 4,0 \text{ мм.}$$

Соответствующее этой разности пространство заполнится металлом, так как деформация прямоугольного раската в предчистовом шестиугольном калибре неравномерна по ширине. Данные расчетов приведены на рис. 109.

Если предчистовой шестиугольный калибр будет переполняться, то следует уменьшить ширину задаваемого в него прямоугольного раската.

*Расчет калибровки по схеме квадрат — предчистовой шестиугольник — шестиугольник*

Рассмотрим калибровку для того же профиля шестигранной стали размером  $d=26$  мм. Так как размеры чистового и предчистового калибров уже найдены, определим сразу размеры квадрата.

Из практических данных сторона квадрата  $A=(1,2 \div 1,3)d$ . Этому соотношению удовлетворяет средняя вытяжка между квадратным и чистовым калибрами

$$\mu_{\text{ср}} = \sqrt{\frac{A^2}{0,866d^2}} = \frac{A}{0,93 d} = \frac{(1,2 \div 1,3) d}{0,93 d} \approx 1,30 \div 1,40.$$

Задаваясь в нашем случае  $\mu_{\text{ср}} = 1,35$ , получаем

$$A = \mu_{\text{ср}} d = 1,35 \cdot 26 \approx 35 \text{ мм.}$$

Далее определяем уширение и проверяем заполнение калибра по методике, приведенной выше.

*Расчет калибровки по схеме шестиугольник — предчистовой шестиугольник — шестиугольник*

Дополнительно к ранее проведенным расчетам чистового и предчистового калибров для шестигранной стали с размером  $d=26$  мм рассчитаем размеры исходного шестигранника.

Как показали исследования, между размерами исходного ( $d_{\text{исх}}$ ) и чистового ( $d$ ) шестигранников имеется зависимость

$$d_{\text{исх}} = (1,2 \div 1,25) d.$$

При среднем значении коэффициента в этой формуле имеем

$$d_{\text{исх}} = 1,225 d = 1,225 \cdot 26 \approx 32 \text{ мм.}$$

Сторона исходного шестигранника

$$c = 0,577 d_{\text{исх}} = 0,577 \cdot 32 = 18,5 \text{ мм.}$$

Общая высота исходного шестигранника

$$H_{\text{исх}} = 2c = 2 \cdot 18,5 = 37 \text{ мм.}$$

Проверим уширение в предчистовом шестиугольнике при линейном обжатии:

$$\Delta h_{\text{ш}} = d_{\text{исх}} - H = 32 - 22 = 10 \text{ мм;}$$

$$\Delta b_{\text{ш}} = 0,35 \frac{10}{32} \sqrt{180 \cdot 10} = 4,6 \text{ мм.}$$

Ширина предчистового раската

$$B = H_{\text{исх}} + \Delta b_{\text{ш}} = 37 + 4,6 = 41,6 \approx 42 \text{ мм.}$$

Следовательно, предчистовой калибр заполняется полностью.

*Расчет калибровки по схеме круг — предчистовой шестиугольник — шестиугольник*

Применительно к тому же профилю шестигранной стали размером  $d=26$  мм произведем расчет исходного круга, задаваемого в предчистовой шестиугольник. Между диаметром исходного круга  $D$  и размером чистового шестигранного профиля  $d$  практически имеется соотношение

$$D = (1,25 \div 1,40) d.$$

Принимая коэффициент перед  $d$  равным 1,38, получаем

$$D = 1,38d = 1,38 \cdot 26 = 35,9 \text{ мм.}$$

В данном случае нет возможности определить точно степень заполнения предчистового калибра, так как происходит неравномерная деформация металла по ширине (обжатие круга в шестиугольнике). С некоторым приближением уширение в калибре можно определить по приведенной высоте круга

$$h_{\text{пр}} = \frac{F_{\text{кр}}}{D} = 0,785 D,$$

где  $F_{\text{кр}}$  — площадь исходного круга.

Тогда абсолютное обжатие металла в предчистовом шестиугольном калибре

$$\Delta h_{\text{шпр}} = h_{\text{пр}} - H_{\text{пр}} = \frac{F_{\text{кр}}}{D} - \frac{F}{B} = 0,785 D - \frac{F}{B},$$

где  $H_{\text{пр}}$  — приведенная высота предчистового шестиугольника.

Для нашего примера:

$$h_{\text{пр}} = 0,785 \cdot 35,9 = 28,2 \text{ мм}; \quad H_{\text{пр}} = \frac{F}{B} = \frac{732}{42} \approx 17,4 \text{ мм.}$$

Обжатие

$$\Delta h_{\text{шпр}} = 28,2 - 17,4 = 10,8 \text{ мм.}$$

Уширение по приведенному обжатию

$$\Delta b_{\text{пр}} = 0,35 \frac{10,8}{28,2} \sqrt{180 \cdot 10,8} = 5,9 \text{ мм.}$$

Заполнение предчистового шестиугольного калибра по ширине определится из равенства

$$B = D + \Delta b_{\text{пр}} = 35,9 + 5,9 = 41,8 \approx 42 \text{ мм.}$$

Следовательно, калибр заполнится полностью.

В случае, если предчистовой шестиугольный калибр переполняется, можно несколько уменьшить диаметр задаваемого круга. При незаполнении калибра надо поступить наоборот.

Зазор в калибрах принимают по графику (см. рис. 87, б).

#### *Расположение калибров на предчистовых и чистовых валках*

Врез ручья предчистового шестиугольника на бочке вала ничем не отличается от вреза овального или ящичного ручьев; глубина вреза при этом также незначительна. Прочность буртов между калибрами получается вполне достаточной, так как боковые стенки ручьев имеют уклон  $45^\circ$ . В чистовых валках в связи со специфичной формой калибра ширину буртов между калибрами следует принимать большей, чем у предчистовых валков.

Рекомендуется ширину буртов между калибрами принимать в пределах

$$b_{\text{бш}} = (0,8 \div 1,0) \frac{c-t}{2},$$

где  $c$  — сторона шестигранника;  
 $t$  — зазор между валками.

Ширину крайних буртов определяют в зависимости от конструкции валковой арматуры.

## КАЛИБРОВКА УЗКИХ ПОЛОС

К горячекатаным узким полосам относят профили прямоугольного сечения со слегка притупленными краями. Размеры этих полос по ГОСТ 103—57: ширина  $b=12\div 200$  мм, толщина  $h=4\div 60$  мм. Наибольшее применение находят узкие полосы толщиной до 18 мм.

Кроме этого сортамента, имеются и некоторые разновидности узкополосной стали: рессора (гладкая, двояковогнутая и желобчатая), полоса штрипсовая и гаечная, лента, лемешная сталь, автообод, обручка.

### 1. Способы прокатки узкополосной стали

Современные станы для прокатки узкополосной стали можно разделить на три группы:

а) с последовательным расположением клетей, когда прокатываемый металл одновременно находится только в одной из них;

б) с последовательным расположением клетей и с наличием непрерывных групп (в том числе полунепрерывные с линейным расположением части клетей);

в) станы непрерывной прокатки.

Для всех способов прокатки на современных станах характерны несколько ребровых проходов (калибров) после каждого трех-четырех проходов в валках с гладкой бочкой.

Общей же закономерностью является осуществление последнего ребрового прохода по ходу прокатки в валках предчистовой клетки. Для полос тонких и широких, когда необходимо иметь хорошо обработанные кромки при больших суммарных обжатиях, производят два ребровых обжатия перед проходом в чистовой клетки.

#### *Методика расчета режимов обжатий при прокатке узкополосной стали*

При прокатке полос в основном осуществляется высотная деформация. Поэтому методика расчета режимов обжатий следующая. Если заданы размеры исходной заготовки и конечного профиля, то последовательность расчета может быть как по ходу, так и против хода прокатки.

Если известны размеры исходной заготовки и конечного профиля, то общий коэффициент высотной деформации  $\eta_{\text{общ}} = \frac{H}{h}$  распределяют по проходам (клетям). Вначале определяют среднее значение коэффициента высотной деформации

$$\eta_{\text{ср}} = \sqrt[n]{\eta_{\text{общ}}} = \sqrt[n]{\frac{H}{h}}.$$

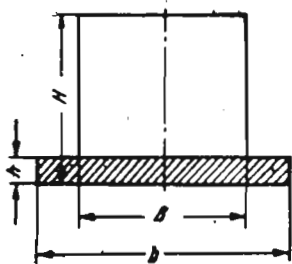
Затем производят корректировку: коэффициенты высотной деформации уменьшают в предчистовых и чистовых клетях и увеличивают в черновых клетях по сравнению со значением  $\eta_{\text{ср}}$ .

Если известен только размер конечного профиля, то режимы обжатий рассчитывают против хода прокатки. Коэффициенты высотной деформации принимают согласно табл. 12. Ширину полосы в каждом проходе определяют по уширению, которое находят по одной из ранее рекомендованных формул. Обжатия в клетях с горизонтальными валками рассчитывают как разность высот полосы до и после прокатки. Обжатия в ребровых проходах определяются по приведенным ниже зависимостям.

При расчетах режимов обжатий непрерывных станов определяют константу стана.

## 2. Общий принцип расчета размеров исходной заготовки

При аналитическом определении размеров исходной заготовки принимают, что деформация полосы по ширине во всех случаях равномерна. Упругим прогибом валков также пренебрегают. Принятое допущение вполне обоснованно, так как даже при максимальной ширине полосы больших отклонений по толщине раската не наблюдается.



Р и с. 110. Схема для расчета размеров исходной заготовки

*Первый случай.* Исходная заготовка (рис. 110) имеет квадратное сечение ( $H=B$ ). Если предположить, что происходит только высотная деформация, то конечная ширина  $b$  полосы определится как сумма стороны  $H$  исходной заготовки и суммарного уширения:

$$b = H + \Sigma \Delta b, \quad (85)$$

где  $\Sigma \Delta b = k(H - h)$  — суммарное уширение;  
 $k$  — показатель уширения.

После преобразования уравнения имеем

$$H = \frac{b + kh}{1 + k}.$$

Такой подход к аналитическому определению стороны заготовки имеет большие недостатки: во-первых, не учитываются ребровые проходы, где могут быть значительные обжатия; во-вторых, затруднительно принимать конкретное значение коэффициента  $k$ , так как он зависит от частного обжатия, а следовательно, и от числа проходов. Необходимо учитывать общее число проходов, включая ребровые.

Размеры заготовки зависят от размеров готового профиля, числа проходов и допустимого обжатия за один проход. Исходя из этого, имеем следующие уравнения:

высота заготовки

$$H = h + \sum_1^n \Delta h_{\text{ср}} = h + n \Delta h_{\text{ср}} = \eta_{\text{общ}} h = \eta_{\text{ср}}^n h, \quad (86)$$

где  $n$  — число проходов с обжатиями заготовки по высоте; ширина заготовки

$$B = b - \sum_1^n \Delta b + \sum_1^{n_1} \Delta h_p, \quad (87)$$

где  $\Delta b$  — частное уширение при высотной деформации;  
 $\Delta h_p$  — частное обжатие металла по ширине (в ребровом калибре);  
 $n_1$  — число проходов с обжатием раската по ширине (в ребровых калибрах).

Так как в ребровых калибрах уширение сильно стеснено, а обжатие небольшое, то уширением здесь можно пренебречь.

Выразив в уравнении (87) уширение через обжатие и показатель  $k = \frac{\Delta b}{\Delta h}$ , получим

$$b = B + \sum_1^n \Delta b - \sum_1^{n_1} \Delta h_p = B + nk \Delta h_{cp} - n_1 \Delta h_p, \quad (88)$$

где

$$n \Delta h_{cp} = H - h,$$

или

$$\Delta h_{cp} = \frac{H - h}{n}.$$

(здесь  $\Delta h_{cp}$  — среднее обжатие металла по высоте за один проход).

Анализ практических режимов прокатки показывает, что частное обжатие в ребровых калибрах

$$\Delta h_p = (0,2 \div 0,3) \Delta h_{cp} \approx 0,25 \Delta h_{cp}. \quad (89)$$

Подставив значение (89) в формулу (88), для заготовки квадратного сечения ( $B=H$ ) имеем

$$b = B + k(H - h) - 0,25 \frac{n_1}{n} (H - h) = H \left( 1 + k - 0,25 \frac{n_1}{n} \right) - h \left( k - 0,25 \frac{n_1}{n} \right). \quad (90)$$

Отсюда сторона заготовки

$$H = \frac{b + h \left( k - 0,25 \frac{n_1}{n} \right)}{1 + k - 0,25 \frac{n_1}{n}}. \quad (91)$$

Уравнения для определения показателя уширения имеют вид:  
 по Э. Зибелю

$$k = \frac{0,05 D_K}{h + 0,04 n D_K}; \quad (92)$$

по Б. П. Бахтинову:  
 для стальных валков

$$k_{ст} = \frac{0,0593 D_K}{h + 0,04 n D_K} \approx \frac{0,06 D_K}{h + 0,04 n D_K}; \quad (93)$$

для чугунных валков

$$k_{чуг} = \frac{0,0525 D_K}{h + 0,04 n D_K}. \quad (94)$$

*Второй случай.* Исходная заготовка имеет прямоугольное сечение ( $H \neq B$ ). В простейшем виде, когда происходит только высотная деформация и отсутствует обжатие в ребровых калибрах, можно записать (см. рис. 110):

$$B + k(H - h) = b;$$

$$H = \frac{b - B + kh}{k}.$$

Если полосу прокатывают с применением обжатий в ребровых калибрах, то будут справедливы выводы, выраженные уравнениями (86) — (90).

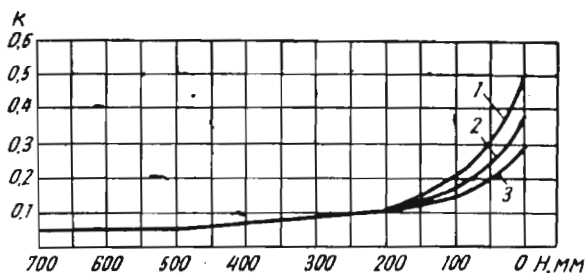


Рис. 111. Зависимость показателя уширения стали  $k$  от катающего диаметра  $D_K$  валков и начальной высоты  $H$  заготовки:

1 — при  $D_K = 700 \div 1200$  мм; 2 — при  $D_K = 400 \div 600$  мм; 3 — при  $D_K = 200 \div 300$  мм

После преобразований уравнения (90) получим

$$b - B = H \left( k - 0,25 \frac{n_1}{n} \right) - h \left( k - 0,25 \frac{n_1}{n} \right),$$

или

$$H = \frac{(b - B) + h \left( k - 0,25 \frac{n_1}{n} \right)}{k - 0,25 \frac{n_1}{n}}. \quad (95)$$

Из анализа практических данных А. П. Виноградов определил зависимость коэффициента  $k$  от катающего диаметра валков и начальной высоты заготовки (рис. 111). Согласно А. П. Виноградову, величина  $k$  находится в пределах 0,2—0,38.

Для приближенных расчетов можно принимать  $k = 0,25 \div 0,3$ . Чем больше диаметр валков и меньше высота исходной заготовки, тем больше коэффициент  $k$  и наоборот.

При наличии ребровых проходов, как правило, получается лишь небольшая разница ширин готового профиля и заготовки. Обычно

$$b \approx (1,015 - 1,01) B$$

или

$$B = (0,99 - 0,985) b. \quad (96)$$

Подставив среднее значение  $B$  из формулы (96) в уравнение (95), получим

$$H = \frac{(b - 0,987 b) + h \left( k - 0,25 \frac{n_1}{n} \right)}{k - 0,25 \frac{n_1}{n}} = \frac{0,013 b + h \left( k - 0,25 \frac{n_1}{n} \right)}{k - 0,25 \frac{n_1}{n}}. \quad (97)$$

В приводимых ниже расчетах будут использованы только уравнения (91) и (97). Однако при известной ширине  $B$  заготовки можно пользоваться и уравнением (95).

*Пример.* Определить размеры исходной заготовки для прокатки полосы толщиной 3 мм, шириной 200 мм на стане, имеющем десять клетей с горизонтальными валками и четыре — с вертикальными. Средний катающий диаметр 350 мм.

Находим по уравнениям (92) — (94) значение  $k$ : по Э. Зибелю

$$k = \frac{0,05 \cdot 350}{3 + 0,04 \cdot 10 \cdot 350} = 0,1225;$$

по Б. П. Бахтинову:

$$k_{ст} = \frac{0,06 \cdot 350}{3 + 0,04 \cdot 10 \cdot 350} = 0,147; \quad k_{чуг} = \frac{0,0525 \cdot 350}{3 + 0,04 \cdot 10 \cdot 350} = 0,1285.$$

При полученных значениях  $k$  сторону заготовки квадратного сечения определим по формуле (91):

по Э. Зибелю

$$H = \frac{200 + 3 \left( 0,1225 - 0,25 \frac{4}{10} \right)}{1 + 0,1225 - 0,25 \frac{4}{10}} \approx 195 \text{ мм};$$

по Б. П. Бахтинову при прокатке на стальных и чугунных валках

$$H_{ст} = \frac{200 + 3 \left( 0,147 - 0,25 \frac{4}{10} \right)}{1 + 0,147 - 0,25 \frac{4}{10}} \approx 192 \text{ мм};$$

$$H_{чуг} = \frac{200 + 3 \left( 0,1285 - 0,25 \frac{4}{10} \right)}{1 + 0,1285 - 0,25 \frac{4}{10}} \approx 194,5 \text{ мм}.$$

Расчеты по уравнению (97) дают:

по Э. Зибелю

$$H = \frac{0,013 \cdot 200 + 3 \left( 0,1225 - 0,25 \frac{4}{10} \right)}{0,1225 - 0,25 \frac{4}{10}} = 118,5 \text{ мм};$$

по Б. П. Бахтинову (для чугунных валков)

$$H_{чуг} = \frac{0,013 \cdot 200 + 3 \left( 0,1285 - 0,25 \frac{4}{10} \right)}{0,1285 - 0,25 \frac{4}{10}} \approx 94,2 \text{ мм}.$$

*Пример.* Из заготовки шириной 120 мм требуется прокатать полосу толщиной 5 мм и шириной 125 мм. Число проходов с обжатием по высоте заготовки  $n=10$ , а число проходов в ребровых калибрах  $n_1=2$ . Какова должна быть высота заготовки при принятых выше условиях? При  $k=0,1225$  по формуле (95) имеем

$$H = \frac{(125 - 120) + 5 \left( 0,1225 - 0,25 \frac{2}{10} \right)}{0,1225 - 0,25 \frac{2}{10}} \approx 74 \text{ мм}.$$

### 3. Общая схема расчета режимов обжатий

Режимы обжатий полосы определяют разными способами: по предельным условиям захвата; из условия полного использования мощности электродвигателей; по коэффициентам высотной деформации, принятым на основе практических данных.

Наличие ребровых калибров в некоторой степени видоизменяет распределение обжатий по проходам. Число этих калибров должно определяться исходя из особенностей стана и схемы прокатки профиля. Однако для всех схем прокатки общим правилом является обязательное расположение ребрового калибра в предчистовой клетке.

#### *Расчет по предельным условиям захвата*

Для расчета необходимо знать диаметры валков и температуру металла по клетям. При этом необходимо учитывать переточку валков, принимая их диаметры минимальными, и обеспечивать надежность захвата металла валками. Коэффициент трения определяют по С. Экелунду. Температуру прокатки устанавливают расчетным путем по специальной методике или непосредственными измерениями.

Рассчитывать режимы обжатий исходя из предельных условий захвата можно в любой последовательности, так как величины частных обжатий можно определять независимо от размеров исходной заготовки. Высоту исходной заготовки находят как сумму частных обжатий, вычисленных расчетным путем, и конечной толщины. Ширина заготовки может быть определена по ширине готового профиля и расчетной величине уширения, получающегося в каждом проходе. Однако обжатия в чистовой и предчистовой клетях не принимают максимальными, так как при большой деформации в этих клетях трудно получить профиль с точными размерами по ширине. Обычно полосу обжимают в чистовой клетке на величину 2—5 мм, а в предчистовой — на величину, равную половине от расчетного максимального обжатия.

*Пример.* В четырнадцатиклетевом стане 300 валки первой, пятой, восьмой и двенадцатой клетей имеют вертикальное расположение (для ребровых обжатий), а валки остальных клетей — горизонтальное. Температура начала прокатки 1200°С, конца 900°С. Диаметры вертикальных валков (по буртам): А, В и С=460 мм, а D=440 мм. Диаметры горизонтальных валков: от первой клетки до пятой 400 мм; шестой и седьмой 370 мм; от восьмой до десятой 330 мм. Скорость вращения валков в последней клетке 400 об/мин. Материал валков — чугун. Характер изменения температуры металла по клетям задан. Требуется рассчитать режим обжатий для прокатки полосы сечением 80×6 мм.

Расчет ведем против хода прокатки, не учитывая для упрощения радиусы закруглений в площадях сечений.

Клеть X.  $D_{10}=330$  мм;  $h_{10}=6$  мм;  $t_{10}=900^\circ\text{C}$ .

Ширина полосы в горячем состоянии

$$b_{10} = 1,013 \cdot 80 = 81 \text{ мм},$$

где 1,013 — коэффициент, учитывающий среднее линейное (тепловое) расширение стали в интервале 800—1200°С.

Примем обжатие в чистовой клетке 2 мм. Тогда толщина полосы перед клетью  $H_{10}=6+2=8$  мм.

Коэффициент трения определяем по формуле С. Экелунда с поправочным коэффициентом  $k_c$ , учитывающим влияние скорости, прокатки (см. рис. 48).

Скорость прокатки в клетях X

$$v_{10} = \frac{3,14 \cdot 330 \cdot 400}{60} = 6,9 \text{ м/сек.}$$

При температуре  $t_{10} = 900^\circ \text{C}$  и  $k_c = 0,6$

$$f_{10} = 0,8(1,05 - 0,0005 \cdot 900) k_c = 0,8(1,05 - 0,0005 \cdot 900) 0,6 \approx 0,29.$$

Находим уширение

$$\Delta b = 1,15 \frac{2}{2 \cdot 8} \left( \sqrt{\frac{330}{2} \cdot 2} - \frac{2}{2 \cdot 0,29} \right) = 2,1 \text{ мм.}$$

Площадь сечения полосы

$$F_{10} = 6 \cdot 81 = 486 \text{ мм}^2.$$

Константа непрерывного стана, обеспечивающая прокатку без натяжения и петлеобразования (размерность ее опускаем), будет

$$C = F D_K n = 486 \cdot 330 \cdot 400 = 640 \cdot 10^5.$$

Клеть IX.  $D_9 = 330 \text{ мм}$ ;  $h_9 = H_{10} = 8 \text{ мм}$ ;  $t_9 = 925^\circ \text{C}$ .

Ширина полосы

$$b_9 = b_{10} - \Delta b_{10} = 81 - 2,1 = 78,9 \text{ мм.}$$

Площадь сечения полосы  $F_9 = 78,9 \cdot 8 = 630 \text{ мм}^2$

Скорость вращения валков

$$n = \frac{C}{F D_K},$$

откуда

$$n_9 = \frac{640 \cdot 10^5}{630 \cdot 330} = 307 \text{ об/мин.}$$

Скорость прокатки

$$v_9 = \frac{3,14 \cdot 330 \cdot 307}{60} = 5,3 \text{ м/сек.}$$

Коэффициент трения

$$f_9 = (1,05 - 0,0005 \cdot 925) \cdot 0,8 \cdot 0,65 = 0,306.$$

Как отмечено выше, обжатие в предчистовой клетке обычно составляет  $0,5 \Delta h_{\text{макс}}$ .

Тогда, используя формулу (16), получаем обжатие

$$\Delta h_9 = 0,5 \Delta h_{\text{макс}} = 0,5 \cdot 0,77 f^2 R_K = 0,385 f^2 R_K,$$

откуда

$$\Delta h_9 = 0,385 \cdot 0,306^2 \cdot 165 = 6 \text{ мм};$$

толщина входящей полосы

$$H_9 = h_9 + \Delta h_9 = 8 + 6 = 14 \text{ мм.}$$

Уширение

$$\Delta b_9 = 1,15 \frac{6}{2 \cdot 14} \left( \sqrt{165 \cdot 6} - \frac{6}{2 \cdot 0,306} \right) = 5,3 \text{ мм.}$$

Клеть D. В вертикальных валках этой клетки происходит ребровое обжатие полосы. Примем зазор между валками 10 мм.

Тогда при  $D_{\text{Д макс}} = 440$  мм катающий диаметр в ребровом калибре

$$D_{\text{кД}} = 440 + 10 - b_{\text{Д}} = 450 - b_{\text{Д}},$$

где ширина полосы

$$b_{\text{Д}} = b_9 - \Delta b_9 = 78,9 - 5,3 = 73,6 \text{ мм.}$$

Тогда

$$D_{\text{кД}} = 450 - 73,6 \approx 376 \text{ мм.}$$

В клетки осуществляют небольшие обжатыя. Поэтому можно считать, что толщина выходящей полосы не получит уширения, т. е.  $h_{\text{Д}} = H_9 = 14$  мм.

Поперечное сечение полосы  $F_{\text{Д}} = 14 \cdot 73,6 \approx 1030 \text{ мм}^2$ .

Скорость вращения валков

$$n_{\text{Д}} = \frac{640 \cdot 10^5}{1030 \cdot 376} = 165 \text{ об/мин.}$$

Клеть VIII.  $D_8 = 330$  мм;  $h_8 = 14$  мм;  $t_8 = 974^\circ \text{С}$ . Обжатие в ребровом калибре предшествующей клетки (Д) принимаем незначительным (3—5 мм). Принимая  $\Delta h_{\text{Д}} = 5$  мм, получаем ширину полосы, выходящей из клетки VIII:

$$b_8 = b_{\text{Д}} + \Delta h_{\text{Д}} = 73,6 + 5 = 78,6 \text{ мм.}$$

Площадь сечения полосы  $F_8 = 78,6 \cdot 14 = 1100 \text{ мм}^2$ .

Скорость вращения валков

$$n_8 = \frac{640 \cdot 10^5}{1100 \cdot 330} = 176 \text{ об/мин;}$$

скорость прокатки

$$v_8 = \frac{3,14 \cdot 330 \cdot 176}{60} = 3,04 \text{ м/сек;}$$

коэффициент трения

$$f_8 = (1,05 - 0,0005 \cdot 974) 0,8 \cdot 0,9 = 0,405;$$

обжатие

$$\Delta h_8 = 0,77 \cdot 0,405^2 \cdot 165 = 20,8 \text{ мм;}$$

толщина входящей полосы

$$H_8 = h_7 = h_8 + \Delta h_8 = 14 + 20,8 = 34,8 \text{ мм;}$$

уширение

$$\Delta b_8 = 1,15 \frac{20,8}{2 \cdot 34,8} \left( \sqrt{165 \cdot 20,8} - \frac{20,8}{2 \cdot 0,405} \right) = 11,3 \text{ мм.}$$

Расчет обжатий в остальных клетях аналогичен.

Результаты расчетов сводят в таблицу, которая облегчает дальнейшие операции по калибровке.

Если расчетные числа оборотов валков не укладываются в диапазон скоростей электродвигателей, то необходимо произвести перерасчет константы стана в соответствии с уменьшением или увеличением числа оборотов. Размеры промежуточных сечений полос при этом не пересчитывают.

*Расчет из условия полного использования мощности электродвигателей*

Как уже отмечалось ранее (гл. II), мощность для привода валков имеет две основные составляющие: мощность, потребную для работы деформации и преодоления сил трения металла по поверхности валков, и мощность, потребную для преодоления сил трения, возникающих в подшипниках валков при прокатке.

Приведенные в гл. II формулы (25), (26) связывают значения мощности двигателя и обжатий. Таким образом, зная среднее удельное давление  $p$ , ширину полосы  $B$  и скорость прокатки  $v$  для каждого прохода, имеем:

$$\Delta h_1 = \frac{N_1 \eta_n}{k p_1 B_1 v_1}; \quad \Delta h_2 = \frac{N_2 \eta_n}{k p_2 B_2 v_2}; \quad \dots \quad \Delta h_n = \frac{N_n \eta_n}{k p_n B_n v_n},$$

где 1, 2,  $n$  — номера проходов.

Режимы обжатий по максимальной мощности электродвигателей рассчитывают чаще всего на широкополосных (листопрокатных) станах. Как правило, на этих станах условия захвата не лимитируют режим обжатий.

При расчетах важно знать исходные величины — удельное давление, ширину полосы и скорость прокатки. Так как удельное давление в свою очередь зависит от обжатия, для расчетов рекомендуется применять либо практические данные, либо расчетные формулы (В. А. Тягунова, А. Ф. Головина), в которые не входит обжатие.

Ширину полосы обычно задают по размерам профиля. Предварительная подстановка в последние уравнения ширины профиля без учета уширения не внесет большой ошибки. Уточнение результата может быть произведено при повторной подстановке ширины для каждого прохода после расчета уширения по первоначально найденному обжатию.

Скорость прокатки принимают исходя из выбранной технологии, а для непрерывных станов ее рассчитывают по константе  $C$ .

*Пример.* Определить максимально возможное обжатие полосы по мощности двигателя, равной  $N = 450$  квт. Среднее удельное давление при прокатке  $10 \text{ кг/мм}^2$ . Диаметр валков (чугун) 400 мм. Температура прокатываемой полосы  $1000^\circ \text{C}$ . Скорость прокатки  $3,5 \text{ м/сек}$ . Ширина задаваемой полосы 300 мм.

Выразим размерность мощности электродвигателя через  $\text{кгм/сек}$ . Тогда

$$N = 450 \cdot 1,36 \cdot 75 = 45900 \text{ кгм/сек.}$$

Принимаем, что 20% мощности расходуется на все другие составляющие общей мощности прокатки. Следовательно, обжатие при этих условиях

$$\Delta h \approx \frac{45900 \cdot 0,8 \cdot 10^3}{10 \cdot 300 \cdot 3500} = 3,5 \text{ мм.}$$

Аналогично рассчитывают обжатия для всех остальных клетей.

Расчет режимов обжатий из условия полного использования мощности имеет преимущество в том, что при этом электродвигатели могут работать при постоянной нагрузке независимо от профиля.

## Расчет по коэффициентам высотной деформации

Исследованиями и практикой выработаны определенные режимы обжатий, характеризующиеся коэффициентами высотной деформации. Средние значения коэффициентов  $\eta$  высотной деформации для различных режимов обжатий, применяемых на практике, приведены в табл. 12. Для полосовой стали коэффициенты  $\eta$  высотных деформаций близки по значениям к коэффициентам  $\mu$  вытяжек. Приведенные ранее в табл. 2 коэффициенты вытяжки для полосовой стали подходят к среднему режиму обжатий.

Принимая режим обжатий, необходимо вначале проверить расчетом мощность электродвигателей, условия захвата, а также прочность валков и соединительных деталей.

Таблица 12

Средние коэффициенты высотной деформации

Номер прохода (против хода прокатки)	Коэффициенты высотной деформации при обжатиях			
	весьма высоких	высоких	средних	пониженных
1	1,35—1,4	1,28—1,3	1,2—1,25	1,1—1,15
2	1,55—1,6	1,45—1,5	1,35—1,4	1,15—1,2
3	1,75—1,8	1,6—1,7	1,45—1,5	1,2—1,25
4	1,95—2,0	1,75—1,8	1,55—1,6	1,25—1,3
5	1,95—2,0	1,75—1,85	1,55—1,6	1,25—1,3
6	—	1,75—1,9	1,65	1,3
7	—	1,9	1,65	1,3
8	—	1,9	1,65	1,3

При высотной деформации полосы в ребровых проходах обжатия принимают значительно меньшими, чем в валках с гладкой бочкой. Чем ближе ребровой калибр к чистовому и чем тоньше полоса и больше отношение ее ширины к толщине, тем меньше принимают абсолютное обжатие. По условиям высотной деформации обжатие в ребровых калибрах рекомендуется принимать в пределах до  $\Delta h_p = (0,5 \div 1,0) \Delta h_{\text{макс}}$ , что соответствует значению  $\eta = 1,05 \div 1,07$ . Примем обжатия: для предчистового ребрового калибра  $0,5 \Delta h_{\text{макс}}$ , а для остальных ребровых калибров —  $1,0 \Delta h_{\text{макс}}$ .

Число ребровых проходов определяют в зависимости от технологических соображений, а также конструктивных особенностей прокатных станов.

Режимы обжатий по коэффициентам высотной деформации рассчитывают только против хода прокатки, так как размеры заготовки определяются лишь полным расчетом всей калибровки. Однако расчет можно вести и по ходу прокатки, если известны начальные размеры заготовки, которые удовлетворяют суммарному коэффициенту деформации по одному из принятых режимов.

**Пример.** Рассчитать по коэффициентам высотной деформации режим обжатий полосы сечением  $160 \times 18$  мм в клетях крупносортового девяти-клетевого стана 500 (рис. 112). Диаметры валков: клетей I—IV 630 мм, клетей V—IX 540 мм. Материал валков: клетей I—IV — сталь, клетей V—IX — чугун. Режим обжатий примем средний.

Исходя из расположения оборудования на стане, возможностей кантовки раската и технологической целесообразности примем в клетях

VIII и V ребровые калибры, а в остальных — валки с гладкой бочкой. Расчет ведем против хода прокатки. Уширение рассчитываем по формуле (35).

Клеть IX.  $\eta_9 = 1,25$  (см. табл. 12);  $D_9 = 540$  мм. Размеры профиля с учетом температурного расширения:

$$b_9 = 1,013 \cdot 160 \approx 162,0 \text{ мм},$$

$$h_9 = 1,013 \cdot 18 \approx 18,25 \text{ мм}.$$

Толщина входящей полосы

$$H_9 = b_8 = \eta_9 h_9 = 18,25 \cdot 1,25 = 22,8 \text{ мм}.$$

Обжатие

$$\Delta h_9 = b_8 - h_9 = 22,8 - 18,25 = 4,55 \text{ мм};$$

уширение в клетке IX

$$\Delta b_9 = 0,35 \frac{4,55}{22,8} \sqrt{270 \cdot 4,55} \approx 2,5 \text{ мм}.$$

Площадь сечения полосы

$$F_9 = b_9 h_9 = 162 \cdot 18,25 = 2960 \text{ мм}^2;$$

ширина входящей полосы

$$B_9 = h_8 = 162 - 2,5 = 159,5 \text{ мм}.$$

Клеть VIII. Ребровой проход. Диаметр валков по буртам  $D_8 = 540$  мм. Катающий диаметр с учетом зазора между валками 10 мм

$$D_{к8} = 540 + 10 - h_8 = 540 + 10 - 159,5 = 390,5 \text{ мм}.$$

Принимаем

$$D_{к8} = 390 \text{ мм и } \eta_8 = 1,05;$$

имеем  $b_8 = 22,8$  мм,  $h_8 = 159,5$  мм.

Толщина полосы, входящей в ребровой калибр,

$$H_8 = \eta_8 h_8 = 1,05 \cdot 159,5 = 167,5 \text{ мм};$$

обжатие в ребровом калибре

$$\Delta h_8 = H_8 - h_8 = 167,5 - 159,5 = 8,0 \text{ мм}.$$

Так как обжатие очень мало, а толщина полосы большая, уширением пренебрегаем.

Окончательные размеры входящей полосы:

$$H_8 = b_7 = 167,5 \text{ мм}, B_8 = h_7 = 22,8 \text{ мм}.$$

Площадь сечения выходящей полосы

$$F_8 = 159,5 \cdot 22,8 = 3640 \text{ мм}^2.$$

Обжатие в ребровом калибре можно найти по рекомендованному максимальному обжатию. Если температура прокатки  $t_8 = 935^\circ\text{C}$ , то коэффициент трения

$$f_8 = (1,05 - 0,0005 \cdot 935) 0,8 = 0,465.$$

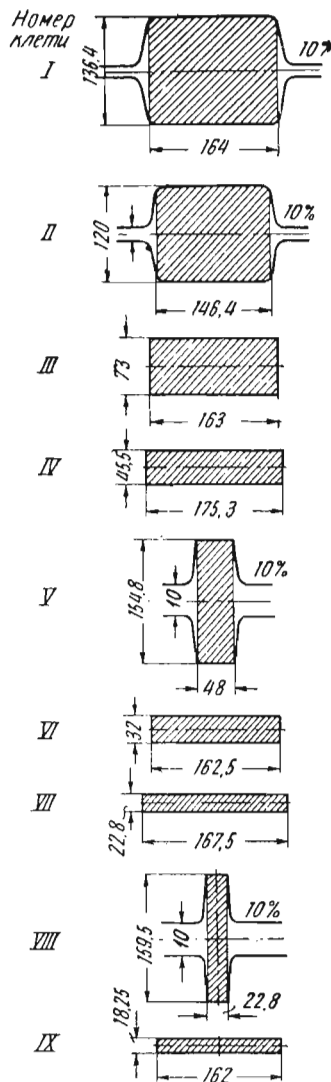


Рис. 112. Схема прокатки полосы сечением 160×18 мм на стане 500

Номер  
клетей

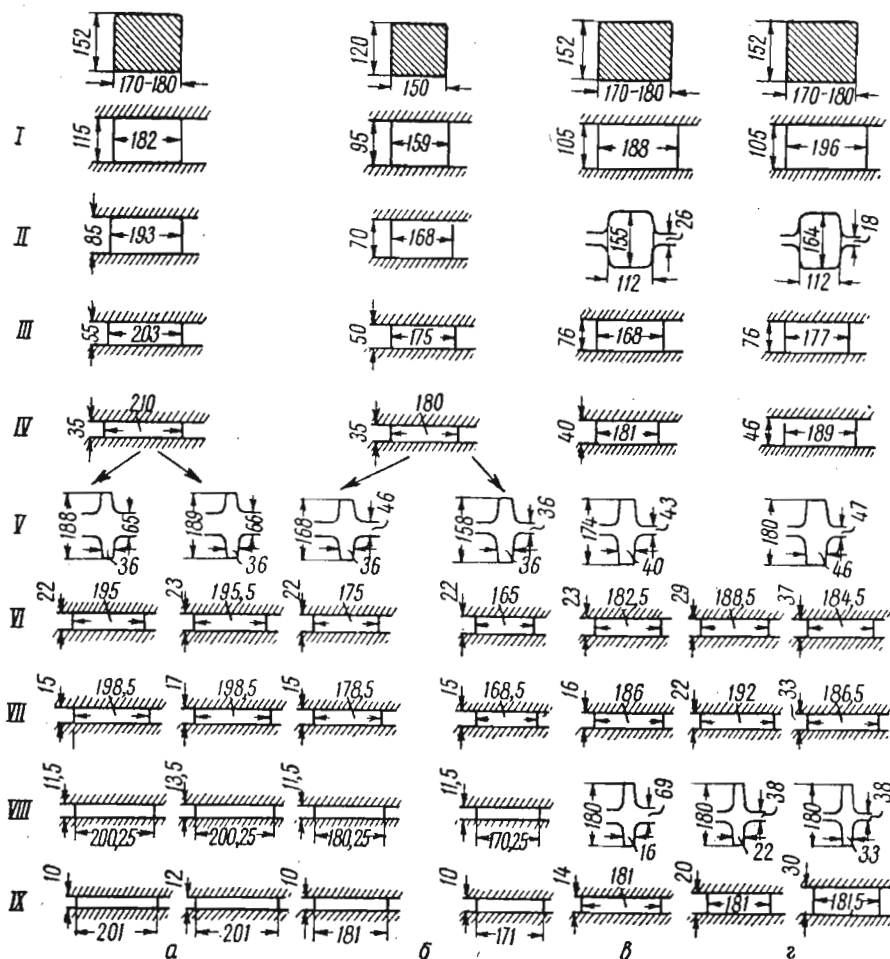


Рис. 113. Схема прокатки полос различных сечений на крупносортовом стане 500:

а — 200×10 и 200×12 мм; б — 180×10 и 170×10 мм; в — 180×14 мм; г — 180×20 и 180×30 мм

Тогда, учитывая, что

$$\Delta h_p = (0,5 \div 1,0) \Delta h_{\max}$$

и

$$\Delta h_{\max} = 0,77 f^2 R_k$$

[см. формулу (16)], имеем

$$\Delta h_8 = 0,5 \cdot 0,77 f_8^2 R_{k8} = 0,385 \cdot 0,465^2 \cdot 195 = 16,2 \text{ мм.}$$

Следовательно, принятый коэффициент высотной деформации удовлетворяет расчетной величине обжатия.

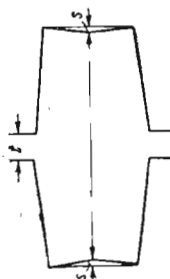
Расчет обжатий в остальных клетях производят аналогично. Необходимо лишь проверять расчетами условия захвата металла валками. Расчетные данные приведены на рис. 112.

На рис. 113 дана схема прокатки полосовой стали большого сечения на крупносортовом девятиклетевом стане 500. В зависимости от толщины

полосы в общей схеме прокатки применяют один или два прохода с обжатием металла в ребровых калибрах. В том случае, если предусмотрены два прохода с обжатием в ребровых калибрах, то один из них обязательно предчистовой.

#### 4. Схема прокатки тонких полос с острыми кромками

Острые кромки с прямым углом — одно из требований ГОСТа к тонкому полосовому профилю. Получить их возможно лишь при использовании предчистовых калибров специальной формы, предназначенных



Р и с. 114. Ребровой калибр с выпуклостью  $s$  дна ручья

для ребровых проходов с обжатием полосы по ширине. На дне каждого ручья таких калибров (рис. 114) предусматривают небольшую выпуклость  $s=0,3 \div 0,5$  мм. В последнем проходе происходит выравнивание боковых кромок, и профиль получает требуемую конфигурацию. Как правило, при прокатке полосового профиля высокого качества применяют два-три калибра для ребровых проходов, которые расположены ближе к чистовому. Один из ребровых калибров предшествует чистовому, а другой расположен от него в четвертом или пятом проходах. Кроме того, ребровой проход предусматривают еще в черновой группе клетей. Вообще место калибров для ребровых проходов определяется типом стана и расположением на нем основного и вспомогательного оборудования.

При прокатке сравнительно широких [шириной  $b=(4 \div 8)h$ ] и тонких полос, если в последних проходах необходимо большое суммарное обжатие по ширине раската, в общую схему калибровки вносят изменение, заключающееся в том, что в предчистовом ребровом калибре производят лишь небольшое обжатие, так как в противном случае полоса изгибается и при этом трудно получить прямоугольное очертание боковых кромок.

Из условия получения устойчивых размеров и формы полосового профиля, имеющего отношение ширины к толщине  $\frac{b}{h}=4 \div 8$ , рекомендуется в двух предчистовых проходах предусматривать ребровые калибры с тем, чтобы распределить суммарное обжатие по ширине равномерно на оба калибра. В этом случае предотвращается изгиб полосы, а наличие выпуклости по дну ручья обеспечивает хорошее центрирование и правильную конфигурацию кромок готового профиля.

В табл. 13 приведена схема калибровки валков и режимов обжатий полос ряда профиларазмеров в клетях стана 250.

Схема прокатки полос из заготовки сечением 58×58 мм на мелкосортном стане 250

Формы и размеры калибров по клетям	Сечение полосы, мм												Диаметр валков по буртам, мм
	25×6		30×6		30×5		30×4		35×5		35×4		
	H	B	H	B	H	B	H	B	H	B	H	B	
I													

### 5. Калибровка двояковогнутой рессоры

Двояковогнутая автомобильная рессора (рис. 115) имеет конфигурацию, весьма близкую к полосе. Однако прокатка ее представляет значительные трудности. В связи с тем, что рессору изготовляют из пружинной кремнистой стали марки 55С2, лучше всего ее прокатывать на непрерывных или специальных станах при достаточно высокой темпе-

ратуре конца прокатки. Это позволяет легче и лучше получить конфигурацию профиля и требуемую вогнутость, которая, как правило, создается в последнем проходе.

Калибровку этого профиля рассчитывают против хода прокатки. Последовательность расчета:

- 1) определение толщины готового профиля по его ширине (вогнутость);
- 2) определение размеров предчистового раската;
- 3) расчет обжатий в ребровых калибрах;

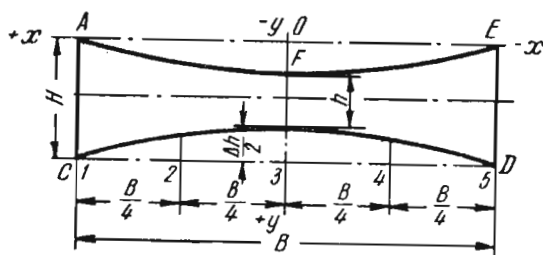


Рис. 115. Профиль двояковогнутой рессоры

- 4) вычисление размеров промежуточных сечений и исходной заготовки по коэффициентам высотной деформации по проходам.

Однако при заранее принятых размерах заготовки режимы обжатий можно рассчитать также по ходу прокатки.

#### Расчет обжатий и калибровки профиля против хода прокатки

*Чистовой калибр.* Весьма важно для готового профиля иметь закономерное уменьшение толщины полосы по ширине от краев к середине и вогнутость, глубина которой не должна превосходить пределы установленных допусков.

Очертание верхней и нижней поверхностей (кривые  $AE$  и  $CD$ , рис. 115) принимаем параболическим:

$$y = ax^2 + b. \quad (98)$$

Так как профиль симметричен относительно вертикальной оси, для простоты расчета рассмотрим в системе координат  $xy$  лишь половину дуги  $AE$  с вершиной в точке  $F$ .

Тогда постоянные коэффициенты уравнения (98) будут: при  $x=0$

$$y = b = OF = \frac{\Delta h}{2},$$

где  $\Delta h$  — суммарная вогнутость посередине профиля; при  $x=AO$

$$y = 0 \text{ и } aAO^2 + \frac{\Delta h}{2} = 0,$$

откуда

$$a = -\frac{\Delta h}{2AO^2}.$$

Обозначим  $AO = l_x$ , тогда формула (98) примет окончательный вид

$$y = -\frac{\Delta h}{2l_x^2}x^2 + \frac{\Delta h}{2} = \frac{\Delta h}{2} \left( 1 - \frac{x^2}{l_x^2} \right). \quad (99)$$

Решение данного уравнения для любых точек, взятых по ширине, позволит найти одностороннюю вогнутость, по которой и вычерчивают калибр. В практике нет необходимости делить ширину профиля на большое количество отрезков. Достаточно на кривой  $CD$  взять пять симметрично расположенных точек и по ним построить калибр чистового профиля.

### *Построение чистового калибра*

Ширину полосы принимают с учетом теплового расширения стали. Однако по этому размеру калибр строить нельзя, так как даже при самом незначительном смещении полосы в горизонтальной плоскости будет происходить деформация («закусывание») кромок профиля буртами. Во избежание этого необходимо ширину калибра несколько увеличить (на 3—4 мм с каждой стороны) за счет горизонтальных участков по краям.

*Размеры предчистовой полосы.* Для обеспечения требуемой ширины и вогнутости профиля необходима достаточная высотная деформация в чистовом проходе. Наиболее приемлемые коэффициенты высотной деформации в чистовом калибре могут быть приняты в пределах 1,15—1,25, причем меньший из них принимают для готового профиля большей толщины.

Ширину  $b_{пч}$  предчистовой полосы определяют расчетным путем без учета вынужденного уширения в чистовом калибре. Возможные отклонения ширины предчистовой полосы в сторону увеличения размера могут быть скорректированы обжатием металла в ребровом калибре:

$$b_{п.ч} = B_ч - \Delta b,$$

$$\frac{h_{пч}}{h} = 1,15 \div 1,25 \text{ или } h_{пч} = (1,15 \div 1,25) h,$$

где  $B_ч$  — ширина чистового профиля;

$h_{пч}$  — толщина предчистовой полосы;

$h$  — толщина готового профиля.

*Распределение коэффициентов высотной деформации по проходам.*

Исходя из данных исследования непрерывного полосового стана 300, можно рекомендовать следующие коэффициенты высотной деформации:

для черновой группы клетей 1,4—1,6;

для чистовой и предчистовой групп клетей 1,15—1,4.

Коэффициенты высотной деформации следует принимать в зависимости от номера клетки в сторону уменьшения их к чистовому проходу, считаясь с условиями захвата и с сопротивлением металла деформации (см. табл. 12). Коэффициенты деформации в клетях с вертикальными валками принимают в пределах 1,1—1,25.

В большинстве случаев на непрерывных полосовых станах ширину  $B$  исходной заготовки находят по ширине  $B_ч$  готового профиля. Как правило,

$$B = B_ч + (2 \div 5) \text{ мм.}$$

Учитывая, что получающееся уширение металла необходимо «снимать» в ребровых проходах при сравнительно небольшой толщине полосы, практически рекомендуемая ширина заготовки является наиболее приемлемой.

Площадь сечения готового профиля (см. рис. 115):

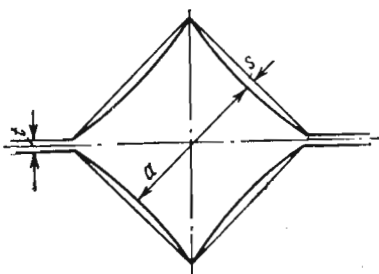
$$F = BH - \frac{2}{3} B(H - h) = \frac{1}{3} B(H + 2h).$$

## 6. Калибровка гаечной полосы

Гаечные полосы характеризуются сравнительно небольшим отношением большей ( $b$ ) к меньшей ( $h$ ) стороне поперечного сечения. Обычно  $\frac{b}{h} = 1,2 \div 2,0$ . В связи с повышенным требованием к получению перпендикулярности сторон поперечного сечения гаечные полосы можно прокатывать двумя способами:

- 1) с двумя предчистовыми ребровыми калибрами;
- 2) с двумя предчистовыми калибрами ромб — квадрат.

Рис. 116. Форма предчистового квадратного калибра для гаечных полос



В обоих способах последний проход осуществляют на гладкой бочке. Первый способ рассмотрен при калибровке обычных полос и поэтому остановимся только на втором из них.

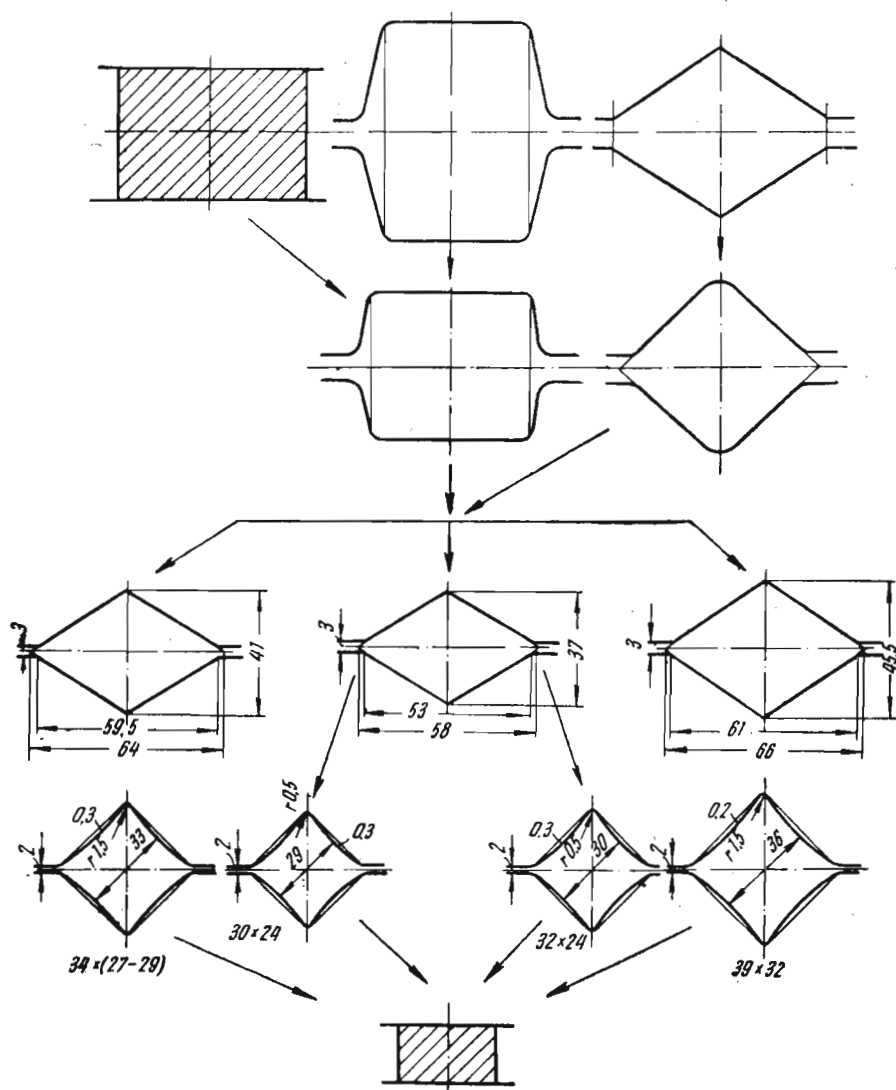
Характер течения металла при деформации полосы по высоте всегда вызывает образование выпуклых граней. Поэтому поперечное сечение предчистовой полосы должно иметь несколько вогнутые грани.

Малое отношение сторон у гаечных полос послужило основанием к разработке калибровки, где предчистовым калибром является квадрат с острыми углами, стороны которого имеют некоторую выпуклость (рис. 116). Полосы после прокатки в таком калибре будут с вогнутыми гранями. Окончательная форма сечения гаечной полосы, отвечающая всем требованиям стандартов, получается в последнем проходе на валках с гладкой бочкой.

Стрелу вогнутости  $s$  на каждой стороне  $a$  квадрата принимают в пределах  $0,2—0,7$  мм в зависимости от обжатия в последнем проходе. Наличие предчистового калибра квадратной формы с острыми углами определяет форму предшествующего калибра, который должен быть в виде ромба с незакругленными углами.

Таким образом, прокатка гаечных полос, как показали исследования и практика, может успешно осуществляться по системе калибровки, где предшествующие чистовому проходу на валках с гладкой бочкой два калибра сконструированы по системе ромб — квадрат с выпуклыми сторонами, что дает на раскате квадратного сечения вогнутые грани (рис. 117). Форма остальных калибров в средних и черновых клетях зависит от типа стана и принимаемых режимов обжатий. По-видимому, в ромбический калибр также должен задаваться раскат квадратного сечения.

Размеры квадратного калибра рассчитывают по обжатию в чистовом проходе и получающемуся при этом уширению, которые должны обеспечить получение необходимых размеров готового профиля. В соответствии с размером квадратного калибра принимают и ромбический калибр с определенным соотношением осей.



Р и с. 117. Схема прокатки гаечных полос

*Предчистовой квадрат.* Сторону предчистового квадрата определяют расчетом уширения, получающегося в чистовом проходе:

$$a = b_{\text{ч}} - \Delta b_1,$$

где  $b_{\text{ч}}$  — ширина чистового профиля;

$\Delta b_1$  — уширение полосы в чистовом калибре.

*Предчистовой ромб.* Размеры предчистового ромба определяются по соотношению диагоналей и сторон ромба и получающегося квадрата. Если высота ромба  $h$ , ширина ромба  $b$  и сторона квадрата  $a$ , то на основании анализа практических данных имеем:

$$\frac{h}{b} = 0,625 \div 0,7; \quad \frac{h}{a} = 1,25 \div 1,275;$$

$$\frac{b}{a} = 1,85 \div 2,1$$

Чем меньше размеры гаечной полосы, тем меньше принимают любое из приведенных соотношений. При расчете предчистового ромба необходимо предусматривать возможность прокатки в нем другой гаечной полосы, близкой по размерам к рассматриваемой.

*Калибр перед ромбом.* По общепринятым схемам прокатки в ромбический калибр может задаваться раскат квадратного сечения. Поэтому ромбическому калибру предшествует квадратный. Принимая коэффициент вытяжки  $\mu_p$  в ромбическом калибре, получаем сторону задаваемого в ромб квадрата.

Площадь ромба

$$F_p = \frac{1}{2}bh;$$

площадь квадрата

$$F_k = \mu_p F_p$$

сторона квадрата

$$a = \sqrt{F_k}.$$

Далее расчет производим применительно к принятой схеме калибровки и типу стана.

## 7. Калибровка желобчатой рессорной стали

Желобчатая рессорная сталь представляет собой симметричный полосовой профиль с полукруглыми выступом и впадиной, центры которых располагаются на верхней и нижней сторонах сечения (рис. 118, а).

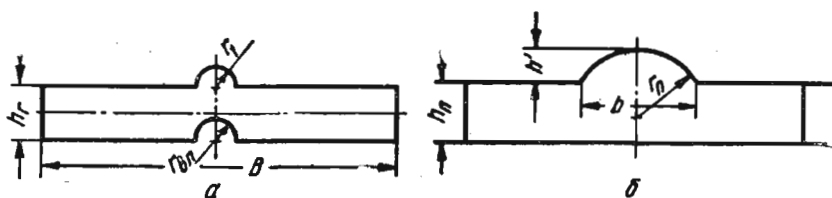


Рис. 118. Профиль желобчатой рессоры (а) и ее предчистовой калибр (б)

При такой форме профиля предотвращается смещение отдельных полос относительно друг друга при работе собранной рессоры.

Режим обжатий для желобчатой рессоры и его расчет ничем не отличаются от приведенных выше режимов и расчетов для обычной полосы. По техническим условиям допускается лишь незначительное смещение впадины относительно оси симметрии выступа. Поэтому при прокатке такого профиля требуются дополнительные приспособления для правильной установки валков. Калибровка желобчатой рессоры может быть рассчитана по системе открытых или закрытых калибров. Первые проходы могут осуществляться в валках с гладкой бочкой.

Возможные схемы калибровки и прокатки показаны на рис. 119. Прокатка в закрытых калибрах (старый способ) имеет то преимущество, что профиль получается точно симметричным относительно вертикальной оси. Однако расточка валков и последующий их ремонт при этом сильно затруднены, так как необходима большая точность врезки ручьев. Если к тому же учесть дополнительный расход энергии в связи со стесненным уширением и дефекты поверхности полосы, связанные

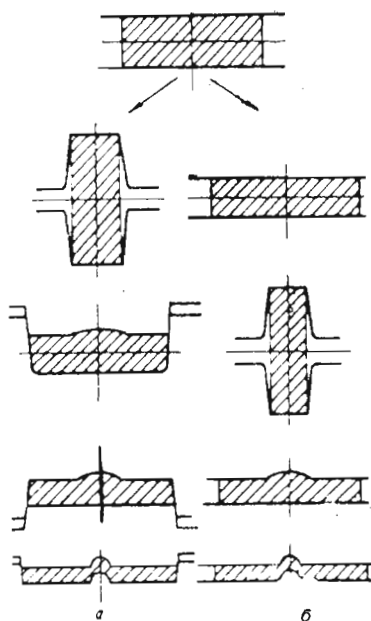


Рис. 119. Возможные схемы калибровки и прокатки желобчатой рессоры:

а — в закрытых калибрах; б — в открытых калибрах

с выработкой боковых стенок ручьев, целесообразность применения системы закрытых калибров становится сомнительной.

Кроме того, при системе закрытых калибров в одном и том же ручье можно прокатывать только профиль одного размера, в то же время при системе открытых калибров допустима прокатка в одном калибре нескольких профилеразмеров.

Методика расчета калибровки профиля сводится к следующему.

Расчет ведут против хода прокатки по среднему режиму обжатий.

*Чистовой калибр* (см. рис. 118, а) имеет конфигурацию и размеры готового профиля. Для этого калибра принимают коэффициент высотной деформации  $\eta_{\text{ч}}$ .

*Предчистовой фасонный калибр* (см. рис. 118, б) должен обеспечить точное получение всех элементов чистового профиля. В этом случае допустима и неравномерность деформации по ширине полосы. Поэтому калибр может быть по ширине с прямолинейным очертанием и утолщением. Утолщение представляет собой полуовал с радиусом закругления

$$r_{\text{п}} = (2,5 \div 3) r_1,$$

или

$$r_{\text{п}} = (2 \div 2,5) r_{\text{вп}},$$

где  $r_1$  и  $r_{\text{вп}}$  — соответственно радиусы выступа и впадины на чистовом профиле.

По коэффициенту высотной деформации в чистовой клети толщина предчистовой полосы

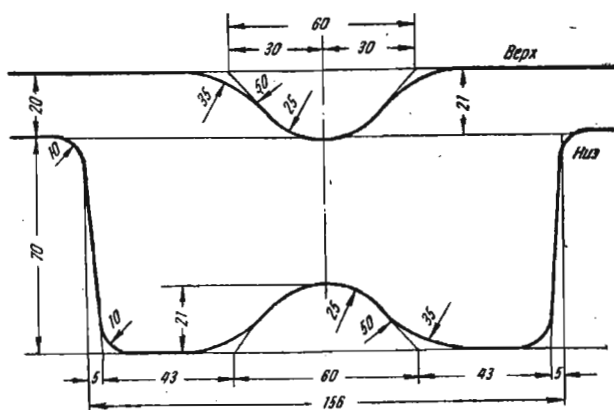
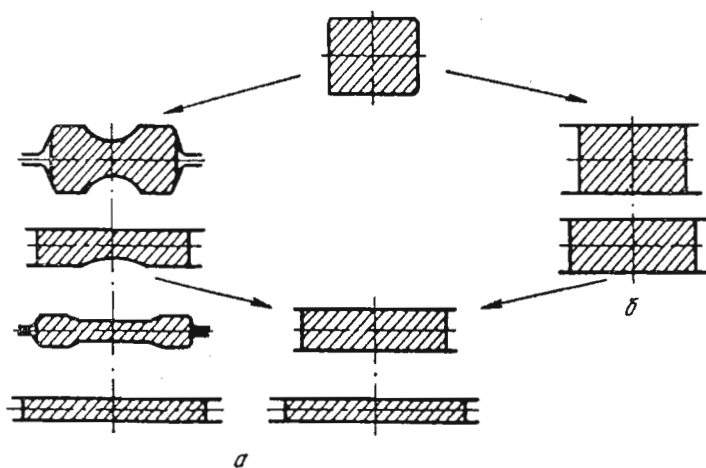
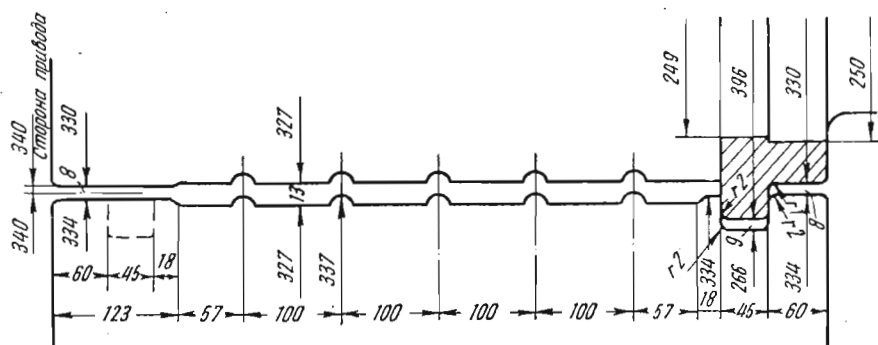
$$h_{\text{п}} = \eta_{\text{ч}} h_{\text{ч}}.$$

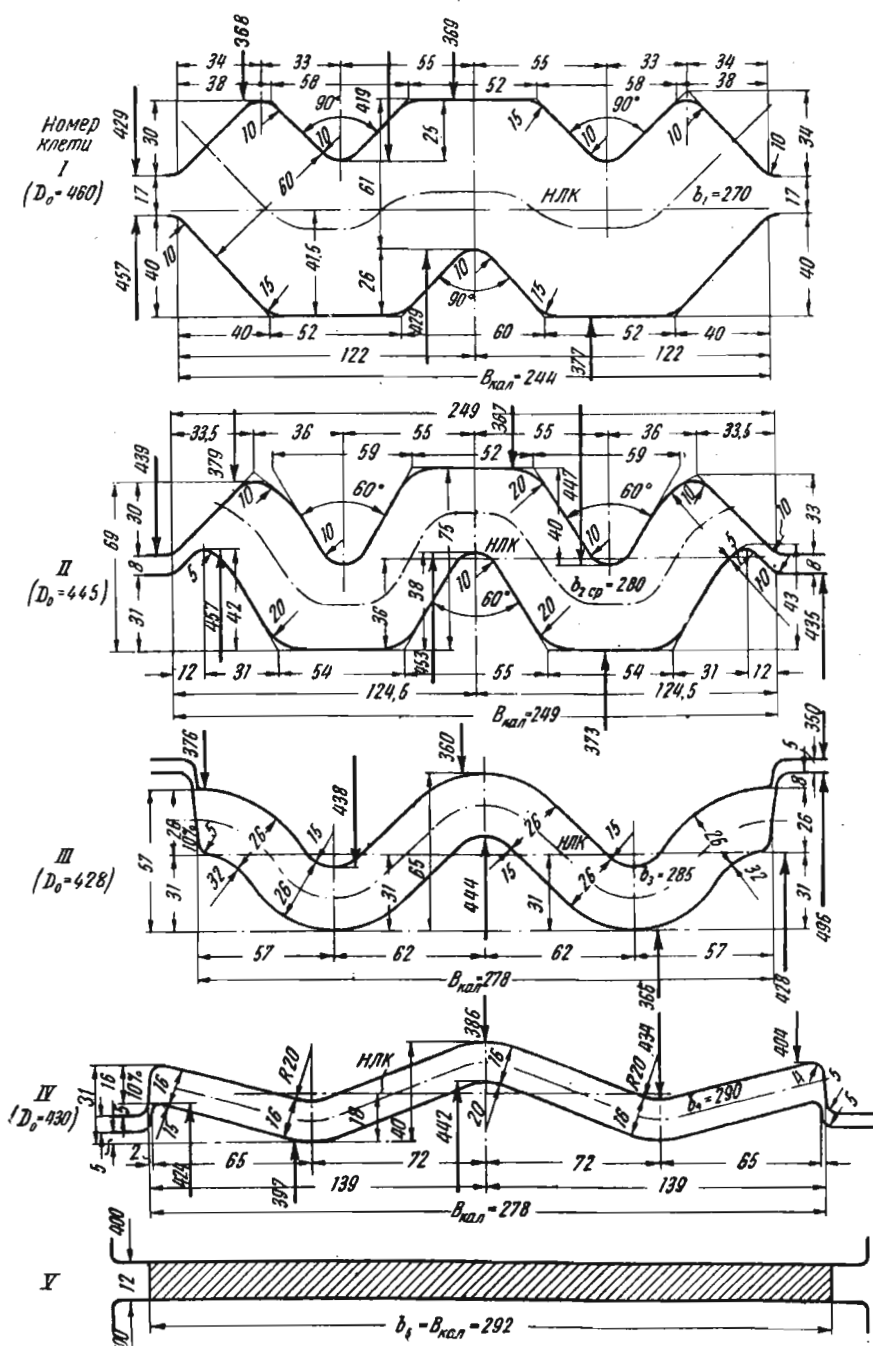
Высоту утолщения в средней части (см. рис. 118, б) конструктивно принимают  $h' = 2,5 \div 3$  мм. Такое утолщение вполне обеспечит надежное формирование сферического выступа в чистовом калибре. Ширина выступа в предчистовом калибре

$$b = 2 \sqrt{h' (2r_{\text{п}} - h')}.$$

Размеры последующих сечений определяют расчетным путем по ранее приведенным методам для подобных систем калибров.

Валки при открытых калибрах должны находиться в строго определенном положении и в этих целях применим способ их расточки, который обеспечивает хорошее соответствие положения ручьев относительно вертикальной оси (рис. 120). На бочку одного из валков насаживают горячей посадкой стальное кольцо с выступом, а на другом валке протачивают канавку для входа в нее выступа первого валка. Боковые поверхности кольца одного валка и канавки на другом валке перпендикулярны горизонтальным осям. Зазор между выступом и боковыми стенками канавки должен быть не более 0,08 мм.





Р и с. 123. Калибровка полосы, прокатываемой на стане 300 с применением разгонных калибров (штрих-пунктиром указана средняя линия)

Такое приспособление исключает регулировку валков в осевом направлении при переходах с одного калибра на другой. Единственное неудобство заключается в том, что при этом требуется перевалка одновременно обоих валков.

## 8. Калибровка полос, получаемых вынужденным уширением

В некоторых случаях на практике приходится получать сравнительно широкую полосу из заготовки, при использовании которой по условиям естественного уширения невозможно добиться требуемой ширины конечного профиля. В этом случае рекомендуется прибегать к созданию вынужденного уширения полосы в процессе ее деформации в различных калибрах специальной формы.

Как видно из рис. 121 и 122, получение сравнительно широких полос вынужденным уширением связано с неравномерностью деформации металла по ширине. При этом необходимо рассчитывать калибровку профиля по такой схеме, чтобы число проходов с неравномерной деформацией по ширине полосы было минимальным. Принцип построения калибра и расчетов ширины полосы основан на числовом определении длины средней линии по ширине калибра или по ширине получающейся в нем полосы.

Уширение рассчитывают в каждом последующем калибре, начиная от первого, так же как и при прокатке на валках с гладкой бочкой. В первом калибре разрезающие конусы искривляют прямоугольную заготовку при ее обжатии. Одновременно здесь же происходит своеобразное растягивание металла в ширину и увеличение длины средней линии калибра.

Продолжая деформацию полосы в других аналогичных калибрах, достигают повышенного вынужденного уширения. Однако главное при такой схеме заключается в стремлении получить наибольшую длину средней линии в первом или в двух первых калибрах. Далее деформация происходит только благодаря естественному уширению.

Режимы обжатий рассчитывают по коэффициентам высотной деформации с последующей проверкой условий захвата и потребной мощности. Число фасонных калибров рекомендуется определять построением их по ходу прокатки. В целом же калибровку рекомендуется рассчитывать против хода прокатки. На рис. 123 показана калибровка сравнительно широкой полосы с применением фасонных калибров.

## Часть четвертая

### КАЛИБРОВКА УГЛОВОЙ И ЗЕТОВОЙ СТАЛИ

#### Глава XI

#### КАЛИБРОВКА УГЛОВОЙ СТАЛИ

По действующим ГОСТам равнобокую угловую сталь прокатывают с полками шириной от  $20 \times 20$  до  $250 \times 250$  мм; неравнобокую угловую сталь от  $25 \times 16$  до  $250 \times 160$  мм.

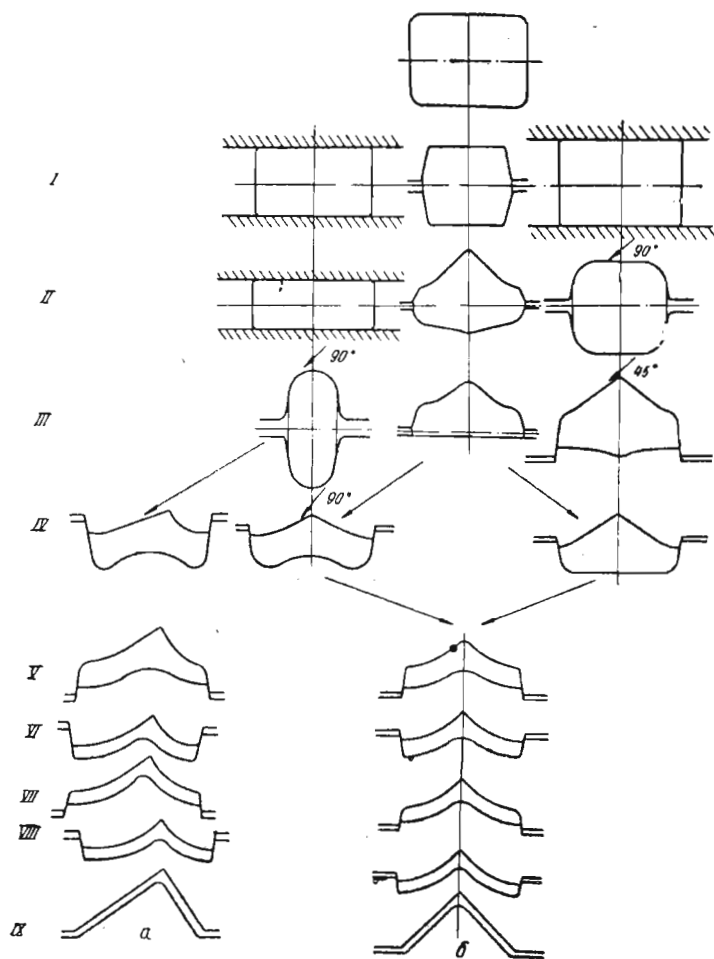


Рис. 124. Принципиальные схемы калибровки неравнобокой (а) и равнобокой (б) угловой стали

Номер  
клетей  
V

VII

IX

X

XI

XII

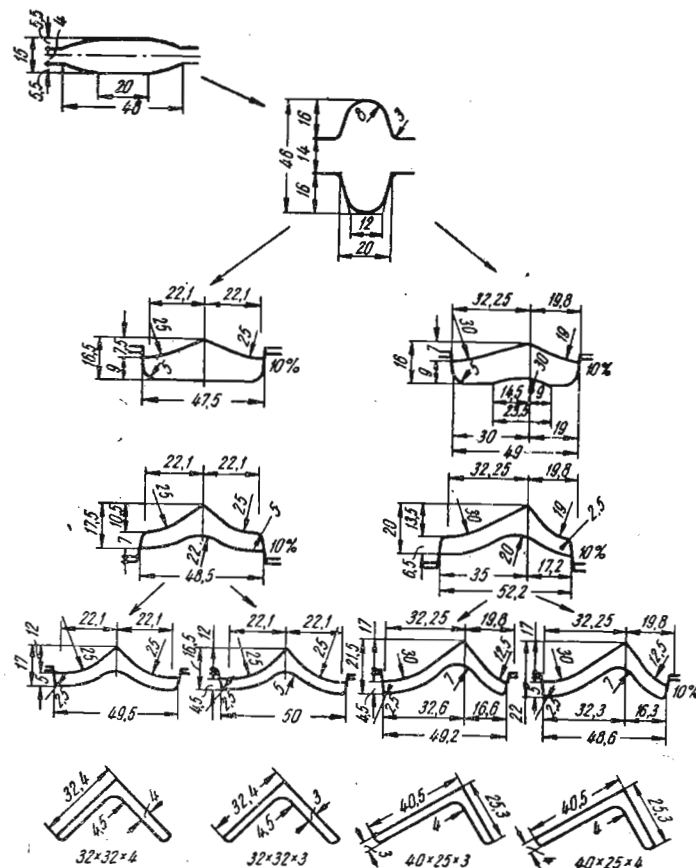
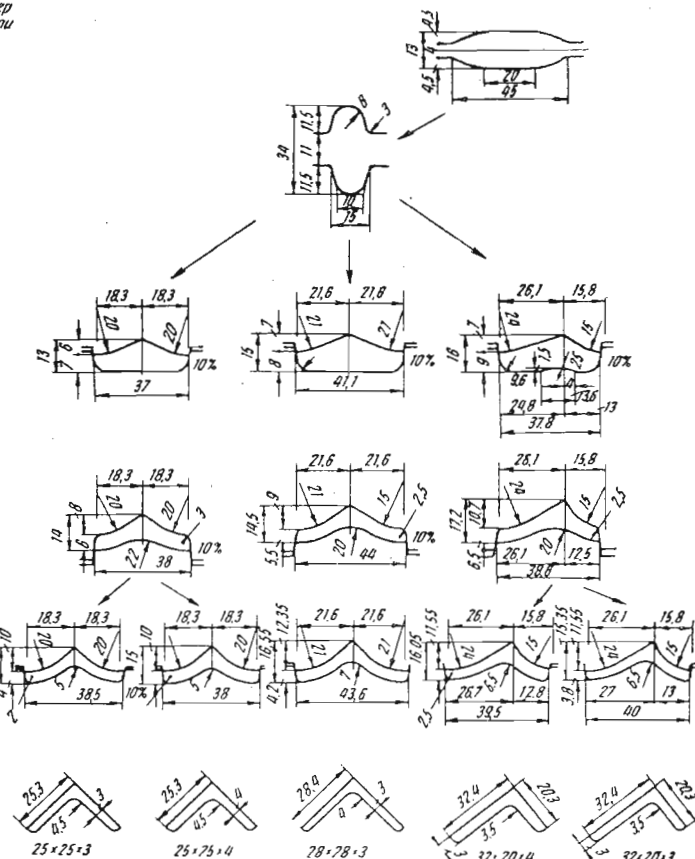


Рис. 125. Калибровка угловой стали, прокатываемой на мелкосортном стане 250

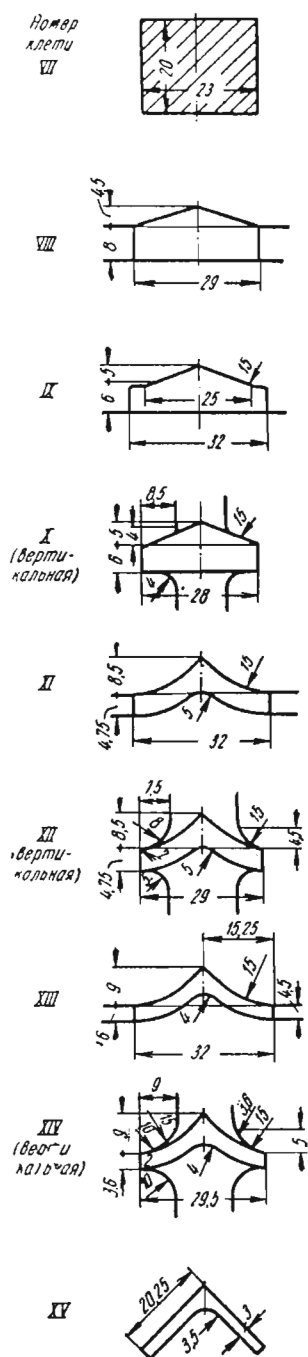


Рис. 126. Схема прокатки и калибровки угловой стали с применением открытых калибров (последние девять клетей или проходов мелкосортного стана 250)

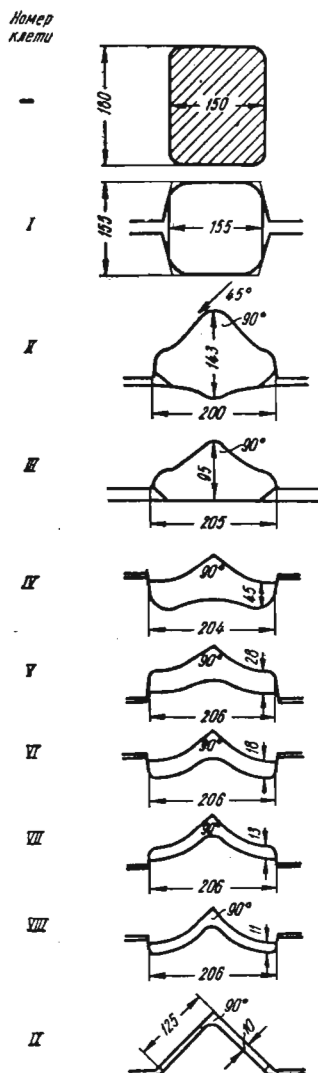


Рис. 127. Общая схема диагональной калибровки для равнобокой угловой стали 125×125×10 мм

Схема калибровки угловой стали зависит от типа стана, размеров исходной заготовки, а также от общего принципа построения калибров валков черновой, средней и чистовой групп клетей (рис. 124).

В настоящее время широкое распространение получают схемы с минимальным числом профилированных калибров. Так, на рис. 125 приведена схема калибровки равнобокой и неравнобокой угловой стали,

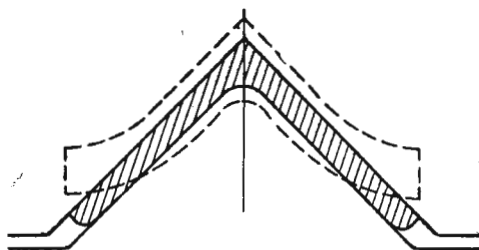
в которой только последние четыре прохода производят через профилированные калибры; черновые и средние группы клетей имеют универсальную калибровку.

Известен способ прокатки угловой стали в открытых калибрах (рис. 126). Оригинальные методы расчета калибровки угловой стали были предложены А. П. Чекмаревым, Д. И. Старченко, Б. П. Бахтиновым, М. М. Штерновым, Н. В. Литовченко, Б. В. Мерекиным, И. И. Кучко. За последнее время большое распространение получил метод диагональной калибровки равнобокой угловой стали (рис. 127). Принцип этого метода сводится к тому, что в первый фасонный калибр заготовку квадратного сечения задают по диагонали. В последующих калибрах угол при вершине остается равным  $90^\circ$ . Ширина первого калибра равна диагонали заготовки квадратного сечения. Преимуществом данной калибровки является обжатие металла по всему периметру калибра и точное формирование элементов профиля, особенно полок.

### Форма чистового калибра

В чистовом калибре происходит выпрямление полок углового профиля до образования прямого угла у вершины и обжатие по толщине полок (рис. 128). Ширина чистового калибра (горизонтальная проек-

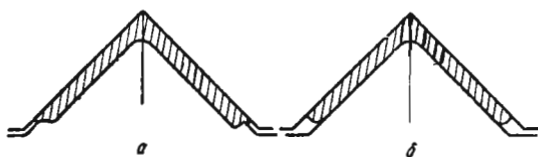
Р и с. 128. Схема деформации предчистового раската в чистовом калибре при прокатке угловой стали



ция) должна быть несколько больше ширины задаваемого раската, чтобы не было защемления полок.

Различают построение чистового калибра с ограничением (стеснением) уширения и со свободным уширением (рис. 129). В первом слу-

Р и с. 129. Схема построения чистового калибра со стесненным (а) и свободным (б) уширением. В калибре со стесненным уширением произошло переполнение и образовались заусенцы



чае имеются условия для обжатия профиля по всему периметру. При этом хорошо оформляются грани на концах полок. Однако такая (закрытая) форма калибра имеет существенный недостаток в том, что требуется весьма точный расчет уширения и постоянство факторов прокатки (температуры металла, состояния поверхности валков, коэффициента трения и др.). Изменение их приводит к искажению профиля; например, снижение температуры металла и увеличение коэффициента трения способствуют образованию заусенцев.

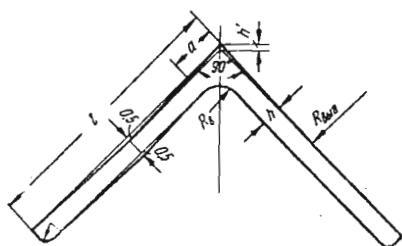
В настоящее время широкое распространение получила форма чистового калибра открытого типа (рис. 129, б). Такой калибр может при-

меняться для нескольких профилеразмеров. Изменение температуры прокатываемого металла или состояния рабочей поверхности калибра скажется здесь лишь на изменении ширины полок. Однако никакого дефекта, связанного с увеличением их ширины, возникать не будет.

Недостатком чистового калибра открытой формы является не всегда правильное закругление внутренней грани полки.

При построении чистового калибра следует учитывать также усадку горячего металла в вершине угла и возможность качественной правки готового профиля (рис. 130).

Для достижения устойчивости захвата металла роликами правильной машины рекомендуется предусматривать на полках угловой стали



Р и с. 130. Построение полок и вершины профиля угловой стали с учетом усадки металла в вершине и возможности улучшения условий правки готового профиля

небольшой выгиб, равный 0,5 мм. Это создает условия для соприкосновения полки с поверхностями первых роликов правильной машины в трех точках. Одновременно с этим при калибровке по методу диагональной подачи квадратной заготовки в первый фасонный калибр вершину профиля предусматривают несколько заостренной как в чистовом, так и в промежуточных калибрах. Это необходимо для того, чтобы после охлаждения раската угол при вершине на готовом профиле стал равным 90°. В промежуточных же калибрах такое построение может создать благоприятные условия для формирования острой вершины в каждом последующем калибре.

Рекомендуется принимать (см. рис. 130):

$$a = (0,10 \div 0,15) l;$$

$$h' = 0,25 \div 0,3 \text{ мм} \text{ — для чистового калибра};$$

$$h' = 2 \div 5 \text{ мм} \text{ — для промежуточных калибров.}$$

Радиус закругления выгиба полки можно определить по формуле

$$R_{\text{выг}} = \frac{(l-a)^2 + 1}{4}.$$

#### *Положение чистового калибра в валках*

Чистовой калибр для равнобокой угловой стали врезают относительно вертикальной оси так, чтобы каждая полка образовала с вертикальной осью угол 45°. При этом не возникают горизонтальные силы, способствующие смещению валков относительно друг друга. Что же касается неравнобокой угловой стали, то здесь положение калибра в валках может быть двоякое. Если врез калибра осуществить аналогично врезу калибра для равнобокой угловой стали (рис. 131, а), то в этом случае будут возникать различные по величине осевые усилия  $P_1$  и  $P_2$ ,

что вызовет осевое смещение валков относительно друг друга. Прокатка неравнобокой угловой стали при таком положении калибра потребует тщательного осевого крепления валков и постоянного внимания к их положению. Чтобы не возникало осевого смещения валков, необ-

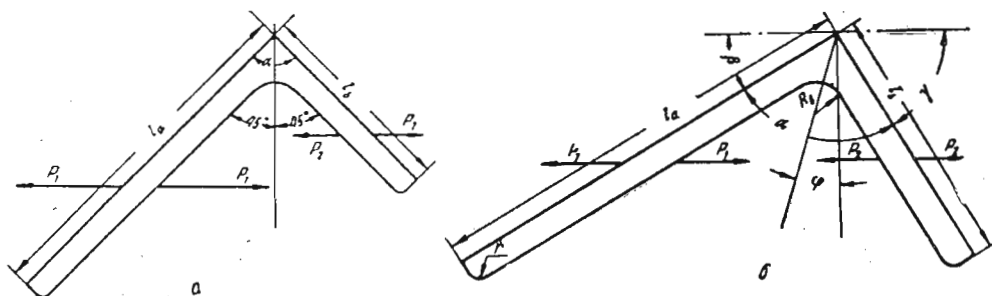


Рис. 131. Профиль неравнобокой угловой стали и расположение его в чистовом калибре:  
а — при  $P_1 > P_2$ ; б — при  $P_1 = P_2$

ходимо, чтобы силы  $P_1$  и  $P_2$  были равны. Данному условию удовлетворяет такое положение чистового калибра (рис. 131, б), когда вертикальные проекции обеих полок равны между собой. Это расположение и применяют в большинстве случаев.

#### Уширение в фасонных калибрах для угловой стали

Уширение в любом промежуточном калибре (от второго фасонного до предчистового) определяют так же, как и в случае прокатки полосовой стали. Для равнобокой угловой стали найденное уширение следует разделить пополам и прибавить полученную величину к первоначальной ширине каждой полки или к ее средней линии. Для неравнобокой угловой стали (см. рис. 131) часто на практике общее уширение делят пропорционально ширине полок. При этом используют следующие выражения для определения уширения, приходящегося на каждую полку в промежуточных калибрах:

для большей полки

$$\frac{\Delta b_a}{l_a} = \frac{\Delta b}{l_a + l_b}$$

или

$$\Delta b_a = \Delta b \frac{l_a}{l_a + l_b};$$

для меньшей полки

$$\frac{\Delta b_b}{l_b} = \frac{\Delta b}{l_a + l_b}$$

или

$$\Delta b_b = \Delta b \frac{l_b}{l_a + l_b},$$

где  $\Delta b$  — общее уширение, приходящееся на обе полки;

$\Delta b_a$  — уширение, приходящееся на большую полку;

$\Delta b_b$  — уширение, приходящееся на меньшую полку;  
 $l_a$  — ширина большей полки;  
 $l_b$  — ширина меньшей полки.

Уширение в первом по ходу прокатки фасонном и в последнем (чистовом) калибрах получается больше, чем расчетное, определяемое в зависимости от обжатия. Это объясняется тем, что в фасонных калибрах происходит значительная внеконтактная деформация. В частности, в первом из них совершается изгиб раската, а в последнем — выпрямление полок, приводящее к дополнительному растяжению их кромок. Внеконтактная деформация возможна в тех калибрах, где обжатие металла сочетается со значительным поперечным изгибом раската относительно какой-нибудь точки. Поскольку в промежуточных калибрах (между первым и последним) изгиб невелик, то это мало сказывается на дополнительном уширении и им можно пренебречь. Однако для первого фасонного и чистового калибров доля уширения из-за изгиба полок значительна и ее нельзя не учитывать. Исследования показывают, что если построить первый фасонный калибр только с учетом уширения, получающегося от обжатия, то деформация в таком калибре возможна в лучшем случае со стесненным уширением, а вообще же металл будет переполнять ручьи и выходить в раздел калибра.

При некоторых калибровках в предчистовом калибре также происходит значительный изгиб полок, сочетающийся с обжатием. В этих случаях сказанное относится и к этому калибру. Количественных закономерностей для определения дополнительного уширения от внеконтактной деформации полок при их изгибе или выпрямлении в литературе не имеется. Для первого профилированного, предчистового или чистового калибров Б. В. Мерекин рекомендует учитывать такое уширение по формуле

$$\Delta b_{\text{доп}} = 0,01 (l_a + l_b).$$

Тогда общее уширение каждой полки составит:

для равнобокой угловой стали, у которой  $l_a = l_b = l$  (см. рис. 130)

$$\Delta b_a = \Delta b_b = \frac{\Delta b}{2} + 0,01l;$$

для неравнобокой угловой стали

$$\Delta b_a = \Delta b \frac{l_a}{l_a + l_b} + 0,01l_a;$$

$$\Delta b_b = \Delta b \frac{l_b}{l_a + l_b} + 0,01l_b.$$

Уширение по каждой полке следует рассчитывать отдельно относительно общей линии раздела, за которую принимают вертикальную ось, проведенную через точку соединения средних линий полок.

#### *Выпуск (уклон) полок*

От выпуска по краям полок зависит степень защемления раската в калибре и характер обработки кромок. В зависимости от толщины полок выпуски применяют в пределах 5—10%. Чем больше толщина полки, тем больше должен быть выпуск. Обычно большая толщина полки характерна для угловой стали большого размера. Малый выпуск приводит к преждевременному износу калибра и повышенному расходу энергии, а также к образованию некачественной кромки профиля (царапины, отрыв металла из-за защемления и др.).

## Чередование разъема валков

Чтобы равномернее обработать все сечение раската и получить закругление полок по определенному радиусу, необходимо чередование расположения разъема валков. Обычно принято иметь предчистовой калибр с разделом сверху. В этом случае хорошо оформляется очертание полок в чистовом калибре, и кроме того, верхний край полок получается под прямым углом. Радиусы закругления полок принимают равными до половины толщины полок. Однако чтобы угол на концах полок чистового калибра получился прямым, в третьем против хода прокатки калибре, который имеет раздел снизу, радиус очертания верхней части концов полок следует принять несколько меньшим половины толщины полки:  $r = (0,35 \div 0,4) h$ .

### Коэффициенты высотной деформации по проходам

Коэффициенты высотной деформации угловой стали по толщинам полок до и после прохода принимают по практическим данным и данным исследований. При этом можно пользоваться кривыми, приведенными на рис. 132. При прокатке угловой стали малых размеров можно

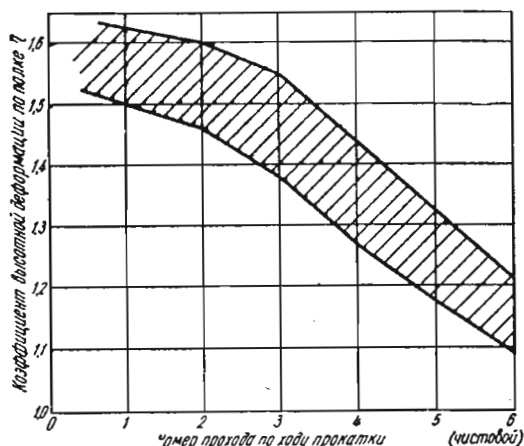


Рис. 132. Изменение коэффициентов высотной деформации по полкам (для расчета калибровки угловой стали)

принимать более высокие коэффициенты, так как с увеличением обжатия повышается устойчивость раската в калибре. К тому же увеличение обжатия при таких размерах не лимитируется мощностью электродвигателей. Последнюю, однако, все же следует учитывать. При расчетах можно также пользоваться коэффициентами высотной деформации для полосовой стали (см. табл. 12).

### 1. Расчеты калибровок угловой стали

Один из методов расчета калибровки угловой стали основан на определении длины средней линии полок при их последовательном развертывании.

#### Равнобокая угловая сталь

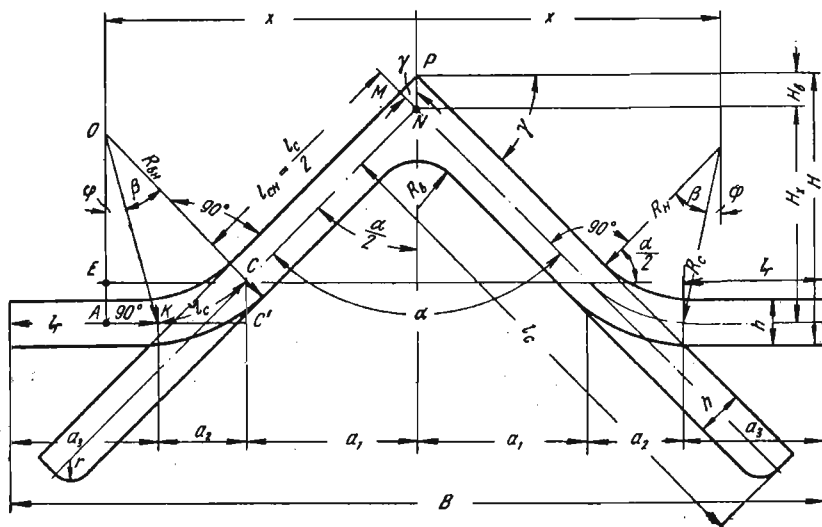
Анализ заводских схем калибровок показывает, что угол при вершине профиля в каждом последующем калибре против хода прокатки изменяется на величину  $\alpha_x = 8 \div 10^\circ$ . При большом числе фасонных ка-

либров принимают  $\alpha_x = 5^\circ$ . Следовательно, изменение угла у вершины калибра можно представить в виде арифметической прогрессии

$$\alpha_n = 90 + \alpha_x(n - 1) \text{ град}, \quad (100)$$

где  $n$  — порядковый номер расчетного калибра против хода прокатки.

Угловую сталь с большими размерами полок прокатывают в 7 — 8 проходов. Угол  $\alpha$  при вершине у первого по ходу прокатки фасонного



Р и с. 133. Построение и основные элементы калибра равнобокой угловой стали

калибра, куда задают прямоугольный раскат, равен  $145\text{—}150^\circ$ . Если принять, что изменение угла в каждом калибре  $\alpha_x = 10^\circ$ , то при  $\alpha_n = 150^\circ$  число  $n$  фасонных калибров можно найти из уравнения

$$150 = 90 + 10(n - 1), \text{ откуда } n = 7.$$

Значения величины  $\alpha_x$  можно принимать и более  $10^\circ$ , если размеры профиля малы, а характеристика стана допускает применение интенсивных обжатий. Однако, как правило, при малых размерах угловой стали (до № 5), прокатываемой в четырех — пяти фасонных калибрах, вполне достаточно применять  $\alpha_x = 10^\circ$ .

При этом в первый по ходу прокатки калибр задают прямоугольный раскат, который подвергается там значительному изгибу и интенсивной высотной деформации, обеспечивая этим требуемое формирование всех элементов профиля. Начиная от предчистового калибра и до исходной прямоугольной полосы, полки всех промежуточных калибров имеют три элемента: прямую наклонную часть, дугу и горизонтальную часть (рис. 133).

Коэффициенты высотной деформации полок принимают по рис. 132 или по табл. 12. Толщина полки в каждом последующем калибре

$$h_n = \eta_{n-1} h_{n-1}.$$

Уширение полок рассчитывают по формулам Э. Зибеля или Б. П. Бахтинова с учетом влияния изгиба полок в чистовом и в первом фасонном калибрах. В промежуточных калибрах предусматривают стесненное уширение  $\Delta b$  с коэффициентом стеснения полок  $0,5\text{—}0,8$ , т. е.

$$\Delta b = (0,5 \div 0,8) \Delta b', \quad (101)$$

где  $\Delta b'$  — свободное уширение.

Длину средней линии каждой полки в чистовом калибре (см. рис. 133) с учетом коэффициента линейного расширения определяют из уравнения

$$l_{c_1} = l_1 - \frac{h_1}{2},$$

где  $l_1$  — ширина полки угловой стали в горячем состоянии;  
 $h_1$  — толщина полки.

Длину прямой наклонной части по средней линии в предчистовом калибре принимают  $l_{c_{n_2}} = \frac{l_{c1}}{2}$ .

Длину средней линии полки данного калибра вычисляют как разность длины средней линии предшествующего калибра и уширения в нем

$$l_{c_n} = l_{c_{n-1}} - \Delta b_{n-1}.$$

Длина средней линии прямой наклонной части полки любого калибра

$$l_{c_{n_n}} = 0,5 l_{c_n};$$

длину дуги закругления каждой полки по средней линии принимают

$$\sphericalangle l_c = (0,25 \div 0,4) l_c, \quad (102)$$

где  $l_c$  — длина средней линии полки в калибре;  
 тогда длина горизонтального участка полки

$$l_r = l_c - (l_{c_n} + \sphericalangle l_c).$$

Радиус закругления  $R_c$  полки калибра по средней линии может быть определен в зависимости от угла  $\beta$ :

$$R_c \beta_{\text{рад}} = \sphericalangle l_c = (0,25 \div 0,4) l_c;$$

$$R_c = (0,25 \div 0,4) \frac{l_c}{\beta_{\text{рад}}}. \quad (103)$$

Рекомендуется принимать  $\beta = 30 \div 45^\circ = \text{const}$ . Чем больше размер профиля, тем большим можно принимать угол  $\beta$ . Если же радиус закругления  $R_c$  взять постоянным, то угол  $\beta$  определяется по уравнению (103). Наиболее целесообразно задаваться  $\beta = \text{const}$  и находить радиус закругления. Тогда  
 при  $\beta = 30^\circ$

$$R_c = (1,5 \div 2,4) \frac{l_c}{\pi}$$

и при  $\beta = 45^\circ$

$$R_c = (1,0 \div 1,6) \frac{l_c}{\pi}.$$

Радиусы внешних очертаний полок принимают с учетом толщины полок:  
 для наружной линии

$$R_n = R_c - \frac{h}{2};$$

для внутренней линии

$$R_{\text{вн}} = R_c + \frac{h}{2}.$$

Расстояние  $x$  по горизонтали от вершины  $P$  калибра до центров радиусов очертания полок определяют построением (см. рис. 133). При этом в точку  $C$ , находящуюся на конце средней линии прямого наклонного участка, проводят перпендикуляр и откладывают на нем отрезок  $OC = R_c$ . Откладывая далее угол  $\beta$  у точки  $O$ , получают второе граничное положение радиуса  $OK = OC = R_c$ . Из точки  $O$  опускают перпендикуляр на горизонтальную часть полки (точка  $A$ ).

Тогда

$$x = a_1 + a_2 + AK = a_1 + CE, \quad \varphi + \beta = 90 - \frac{\alpha}{2},$$

откуда окончательно

$$x = l_{\text{сн}} \sin \frac{\alpha}{2} + R_c \cos \frac{\alpha}{2}.$$

Горизонтальная проекция всего калибра

$$B = 2(a_1 + a_2 + a_3).$$

После подстановки всех значений в это уравнение (см. рис. 133)

$$B = 2 \left[ l_{\text{сн}} \sin \frac{\alpha}{2} + R_c \left( \cos \frac{\alpha}{2} - \sin \varphi \right) + l_r \right]. \quad (104)$$

Вертикальная проекция всего калибра

$$H = H_b + H_x + 0,5h. \quad (105)$$

Вертикальная проекция  $H_b$  от точки пересечения средних линий полок до вершины  $P$  калибра определится из геометрических соотношений:

$$H_b = PN = \frac{h}{2 \sin \frac{\alpha}{2}}.$$

Второе слагаемое в уравнении (105)

$$H_x = l_{\text{сн}} \cos \frac{\alpha}{2} + R_c \left( \cos \varphi - \sin \frac{\alpha}{2} \right).$$

После подстановки значений  $H_b$  и  $H_x$  в уравнение (105)

$$H = 0,5h \frac{1 + \sin \frac{\alpha}{2}}{\sin \frac{\alpha}{2}} + l_{\text{сн}} \cos \frac{\alpha}{2} + R_c \left( \cos \varphi - \sin \frac{\alpha}{2} \right).$$

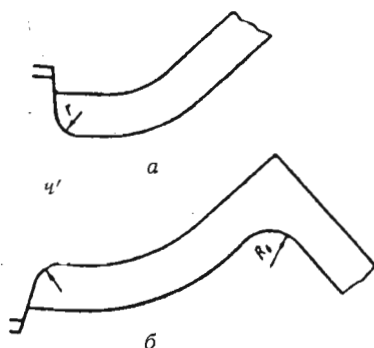
При расчете калибровки против хода прокатки в средних и черновых калибрах рекомендуется уменьшать длину средней линии  $l_{\text{сн}}$  прямого наклонного участка последовательно на 5—10 мм в зависимости от размера профиля.

Расчет калибров для равнобокой угловой стали по данному методу следует вести до тех пор, пока не наступит  $\varphi < 0^*$ . Если же угол  $\varphi$  будет иметь отрицательное значение, т. е. перейдет в область угла  $\beta$ , то это значит, что горизонтальная часть будет лежать выше нижней точки дуги полки.

Такое положение допускать нельзя по технологическим соображениям. Следовательно, расчет можно вести только при условии положительного значения угла  $\varphi$ .

\* Угол  $\varphi$  предусматривается в целях достижения большей устойчивости раската. Это особенно важно при прокатке угловой стали в открытых калибрах.

Рис. 134. Нижние края полок при чередовании раздела калибра



Если значение угла  $\varphi$  приближается к нулю, то

$$B = 2 \left( l_{\text{сн}} \sin \frac{\alpha}{2} + R_c \cos \frac{\alpha}{2} + l_r \right) = 2x + 2l_r;$$

$$H = 0,5h \frac{1 + \sin \frac{\alpha}{2}}{\sin \frac{\alpha}{2}} + l_{\text{сн}} \cos \frac{\alpha}{2} + R_c \left( 1 - \sin \frac{\alpha}{2} \right).$$

При  $\varphi = 0$  имеем  $\beta = 90 - \frac{\alpha}{2}$ .

В этом случае

$$R_c = \frac{l_c}{\beta_{\text{рад}}} = \frac{0,4l_c}{\beta_{\text{рад}}}.$$

Радиусы  $R_b$  внутреннего закругления угла при вершине рекомендуется определять по формуле

$$R_b = R_{b_{n-1}} \eta_{n-1}$$

В калибре, имеющем раздел сверху (рис. 134, а), радиус очертания нижнего края полки

$$r_n = r_{n-2} + \Delta h_{n-1}.$$

В калибре, имеющем раздел снизу (рис. 134, б), радиус очертания верхнего края полки

$$r'_n = \Delta h_{n-1};$$

площадь калибра

$$F_n = 2l_{\text{сн}} h_n.$$

Приведенный метод расчета является обобщенным, при котором угол  $\beta$  принимают независимо от угла  $\alpha$  развертывания полок. Если же принять  $\beta = 90 - \frac{\alpha}{2}$  и, следовательно,  $\varphi = 0$ , то получится частное решение задачи; тогда расчетные формулы, расчет и построение калибров заметно упрощаются.

Для определения длины дуги  $l_c$  рекомендуется использовать формулу (102) с коэффициентами 0,25—0,4. При меньшем коэффициенте горизонтальные части полок получаются большими. Это обеспечивает лучшую устойчивость раската при его передвижении по рольгангу. Однако в некоторых случаях с поверхности краев полок несколько хуже удаляется окалина, что необходимо учитывать.

При определении длины дуги  $\gamma l_c$  по средней линии полки равнобокой угловой стали целесообразно принимать следующие коэффициенты в формуле (102):

№ профиля	Коэффициент
4	0,25—0,3
5—10	0,3—0,35
>10	0,35—0,4

При этом соответственно изменяется радиус закругления, а также глубина вреза ручья в валок.

*Пример расчета.* Рассчитаем калибровку для равнобокой угловой стали  $125 \times 125 \times 10$  мм. Пусть прокатка профиля осуществляется на стане 500 при катающих диаметрах  $D_k = 500$  мм.

Чистовой калибр.  $R_{B_1} = 14$  мм;  $r_1 = 4,6$  мм;  $h_1 = 10$  мм. Площадь поперечного сечения  $F_1 = 2430$  мм<sup>2</sup> (все размеры по ГОСТ 8509—57).

Ширина каждой полки в горячем состоянии

$$l_1 = 1,013 \cdot 125 = 126,8 \text{ мм};$$

длина средней линии каждой полки

$$l_{c1} = 126,8 - 5 = 121,8 \text{ мм};$$

угол у вершины профиля  $\alpha_1 = 90^\circ$ ; горизонтальная проекция калибра  $B_1 = 177$  мм; вертикальная проекция калибра  $H_1 = 88,5$  мм.

Предчистовой калибр. Принимаем угол дополнительного развертывания полок  $\alpha_x = 5^\circ$ . Тогда

$$\alpha_2 = \alpha_1 + \alpha_x = 95^\circ.$$

Коэффициент высотной деформации по полке в чистовом калибре  $\eta_1 = 1,15$  (см. рис. 132).

Толщина полки

$$h_2 = \eta_1 h_1 = 10 \cdot 1,15 = 11,5 \text{ мм}.$$

Обжатие полок в чистовом калибре

$$\Delta h_1 = h_2 - h_1 = 11,5 - 10 = 1,5 \text{ мм}.$$

Уширение полок от обжатия в чистовом калибре (приближенно)

$$2\Delta b'_1 = 0,35 \frac{\Delta h_1}{h_2} \sqrt{\frac{D_k}{2} \Delta h_1} = 0,35 \frac{1,5}{11,5} \sqrt{\frac{500}{2} \cdot 1,5} \approx 0,9 \text{ мм}.$$

На каждую полку приходится

$$\Delta b'_1 = \frac{0,9}{2} = 0,45 \text{ мм}.$$

Учитывая влияние изгиба полок на уширение в чистовом калибре, вносим поправку

$$\Delta b''_1 = 0,01 l_1 = 0,01 \cdot 126,8 = 1,26 \text{ мм}.$$

Следовательно, в чистовом калибре каждая полка будет иметь общее уширение

$$\Delta b_1 = \Delta b'_1 + \Delta b''_1 = 0,45 + 1,26 \approx 1,7 \text{ мм}.$$

Длина средней линии каждой полки во втором калибре

$$l_{c2} = l_{c1} - \Delta b_1 = 121,8 - 1,7 = 120,1 \text{ мм};$$

принимаем длину прямой наклонной части полки

$$l_{сн2} = 0,5 l_{c2} = 0,5 \cdot 120,1 \approx 60 \text{ мм};$$

длина дуги по средней линии полки

$$l_{c2} = 0,4l_{c2} = 0,4 \cdot 120,1 = 48 \text{ мм};$$

длина горизонтального участка полки

$$l_{r2} = l_{c2} - (l_{cn2} + l_{c2}) = 120,1 - (60 + 48) = 12,1 \text{ мм}.$$

Принимаем  $\beta = 30^\circ = \text{const}$  для всех последующих калибров. Радиус закругления по средней линии полки

$$R_{c2} = 2,4 \frac{l_{c2}}{\pi} = 2,4 \frac{120,1}{3,14} = 92 \text{ мм}.$$

Радиусы закругления по внутреннему и наружному очертанию:

$$R_{вн2} = 92 + 5,75 = 97,75 \text{ мм}; \quad R_{н2} = 92 - 5,75 = 86,25 \text{ мм}.$$

Угол

$$\varphi_2 = 90 - \left( \frac{\alpha_2}{2} + \beta \right) = 60 - \frac{\alpha_2}{2} = 60^\circ - 47^\circ 30' = 12^\circ 30'.$$

Расстояние по горизонтали от вершины до линии центров радиусов закруглений

$$x_2 = l_{cn2} \sin \frac{\alpha_2}{2} + R_{c2} \cos \frac{\alpha_2}{2} = 60 \sin 47^\circ 30' + 92 \cos 47^\circ 30' = 106,3 \text{ мм}.$$

Горизонтальная проекция всего калибра

$$\begin{aligned} B_2 &= 2 \left[ l_{cn2} \sin \frac{\alpha_2}{2} + R_{c2} \left( \cos \frac{\alpha_2}{2} - \sin \varphi_2 \right) + l_{r2} \right] = \\ &= 2 [60 \sin 47^\circ 30' + 92 (\cos 47^\circ 30' - \sin 12^\circ 30') + 12,1] = 197 \text{ мм}. \end{aligned}$$

Вертикальная проекция всего калибра

$$\begin{aligned} H_2 &= 0,5h_2 \frac{1 + \sin \frac{\alpha_2}{2}}{\sin \frac{\alpha_2}{2}} + l_{cn2} \cos \frac{\alpha_2}{2} + R_{c2} \left( \cos \varphi_2 - \sin \frac{\alpha_2}{2} \right) = \\ &= 0,5 \cdot 11,5 \frac{1 + \sin 47^\circ 30'}{\sin 47^\circ 30'} + 60 \cos 47^\circ 30' + \\ &+ 92 (\cos 12^\circ 30' - \sin 47^\circ 30') = 76,05 \text{ мм}. \end{aligned}$$

Радиус внутреннего закругления угла

$$R_{в2} = R_{в1} \eta_1 = 14 \cdot 1,15 = 16 \text{ мм}.$$

Раздел калибра сверху. Радиус закругления нижнего края полки

$$r_2 = r_1 + \Delta h_1 = 4,6 + 1,5 \approx 6 \text{ мм}.$$

Площадь поперечного сечения

$$F_2 = 2l_{c2} h_2 = 2 \cdot 120,1 \cdot 11,5 = 2765 \text{ мм}^2.$$

Третий калибр. Принимаем дополнительный угол развертывания полок в третьем калибре  $\alpha_x = 10^\circ$ . Тогда

$$\alpha_3 = \alpha_2 + \alpha_x = 95 + 10 = 105^\circ.$$

Коэффициент высотной деформации во втором калибре  $\eta_2 = 1,26$ . Дальнейший расчет аналогичен. Результаты расчета приведены на рис. 135.

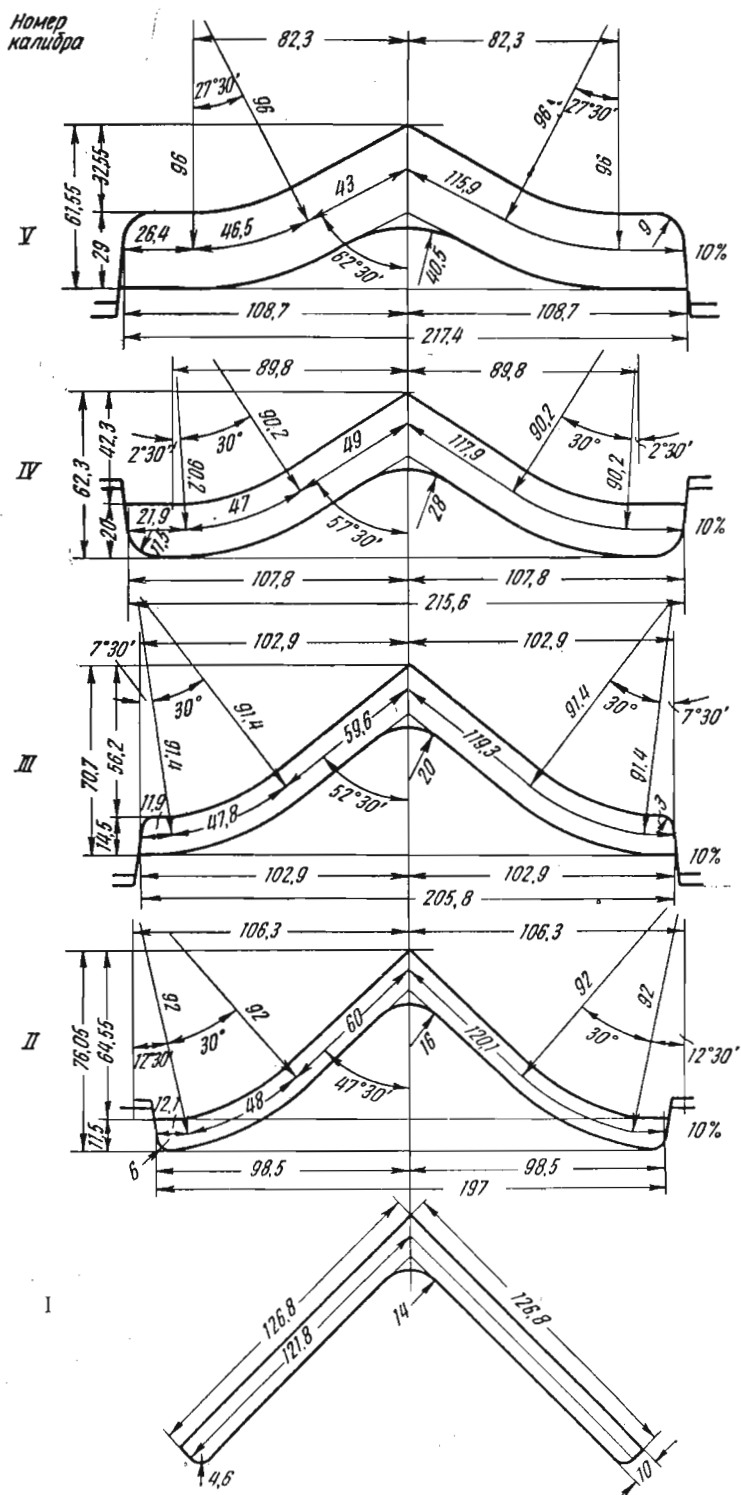


Рис. 135. Калибры для равнобокой угловой стали 125x125x10 мм

Калибры для неравнобокой угловой стали наиболее целесообразно располагать так, как это показано на рис. 131, б.

Рассмотрим калибровку только для этого случая. Методика расчета сводится к следующему. Элементы калибра определяют по средним линиям. Коэффициенты высотной деформации и толщины полок рассчитывают так же, как для равнобокой угловой стали (см. рис. 132). Вначале по готовому чистовому профилю находят исходные размеры средних линий и другие элементы. Угол разворачивания полок в последующих калибрах рассчитывают по формуле (100). Первоначальные углы  $\alpha_a$  и  $\alpha_b$  (рис. 136) относительно вертикальной оси определяют из размеров полки чистового профиля:

$$\operatorname{tg} \alpha_a = \frac{l_a}{l_b}, \quad \operatorname{tg} \alpha_b = \frac{l_b}{l_a}, \quad \alpha_a + \alpha_b = 90^\circ, \quad \gamma = \frac{\alpha_a - \alpha_b}{2} = \text{const.}$$

Дальнейшее увеличение углов  $\alpha_a$  и  $\alpha_b$  по калибрам производят одинаково:

$$\alpha_{a_n} = \alpha_{a_{n-1}} + \frac{\alpha_x}{2}; \quad \alpha_{b_n} = \alpha_{b_{n-1}} + \frac{\alpha_x}{2},$$

где  $n$  -- порядковый номер расчетного калибра против хода прокатки.

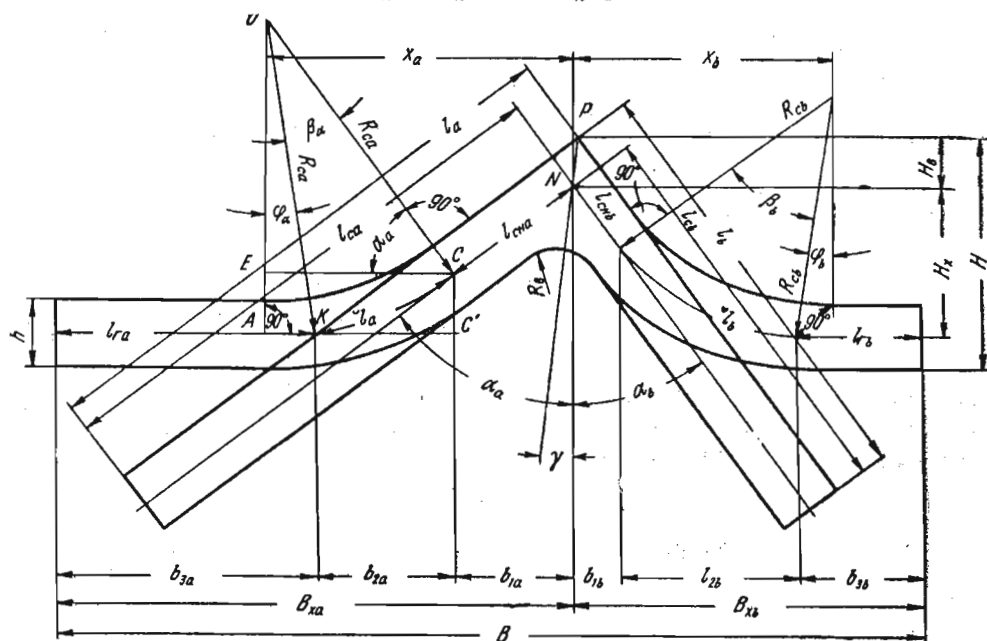
Длину средней линии каждой полки рассчитывают после нахождения обжатий в предшествующем калибре по принятым коэффициентам высотной деформации полок и по их толщинам, а также по уширению.

Уширение определяют отдельно для каждой полки с учетом их изгиба в чистовом и первом фасонном калибрах.

Стесненное ушивание полков в промежуточных калибрах можно определять по формуле (101). Ширину каждой полки в промежуточных калибрах рассчитывают по выражениям:

для бóльшей полки

$$l_{ca_n} = l_{ca_{n-1}} - \Delta b_{a_{n-1}},$$



Р и с. 136. Построение и основные элементы профиля неравнобокой угловой стали

для меньшей полки

$$l_{cb_n} = l_{cb_{n-1}} - \Delta b_{b_{n-1}}.$$

Принимаем для чистового калибра длину прямой наклонной части большей полки по средней линии

$$l_{c.n.a} = l_a - \frac{h}{2}.$$

Для остальных калибров

$$l_{c.n.a} = 0,5 l_{ca},$$

тогда

$$l_{c.n.a} \cos \alpha_a = l_{c.n.b} \cos \alpha_b,$$

откуда для меньшей полки

$$l_{c.n.b} = l_{c.n.a} \frac{\cos \alpha_a}{\cos \alpha_b}.$$

Так как угол наклона большей полки достаточно велик по сравнению с углом наклона меньшей полки, для расчетов длины дуги по средней линии принимаем дугу  $\sphericalangle l_a$  большей полки:

$$\sphericalangle l_a = (0,25 \div 0,4) l_{ca},$$

Тогда по этой дуге найдутся и все остальные элементы полок.

Горизонтальная часть большей полки

$$l_{га} = l_{ca} - (l_{c.n.a} + \sphericalangle l_a).$$

Радиус очертания дуги по средней линии полки определим из следующих соображений. Примем  $\beta_a = 30^\circ$ . Тогда этот радиус для большей полки найдется из выражений:

$$R_{ca} \beta_a = \sphericalangle l_a = (0,25 \div 0,4) l_{ca};$$

$$R_{ca} = \frac{\sphericalangle l_a}{\beta_a} = (1,5 \div 2,4) \frac{l_{ca}}{\pi}. \quad (106)$$

Угол  $\beta_a$  можно принять большим, чем  $\beta_b$ , так как длина дуги большей полки больше длины дуги меньшей полки; например, можно принять  $\beta_a = 45^\circ$ , но можно оставить и  $\beta = \beta_b$ .

При  $\beta_a = 45^\circ = \frac{\pi}{4}$  имеем

$$R_{ca} \beta_a = \sphericalangle l_a; \quad (107)$$

$$R_{ca} = 4 \frac{\sphericalangle l_a}{\pi}. \quad (108)$$

Для определения такого же радиуса для меньшей полки необходимо исходить из того, что вертикальная проекция дуги большей полки должна быть равна вертикальной проекции дуги меньшей полки:

$$\begin{aligned} AE = AO - EO &= R_{ca} \cos \varphi_a - R_{ca} \cos(\varphi_a + \beta_a) = \\ &= R_{ca} [\cos \varphi_a - \cos(\varphi_a + \beta_a)] = R_{ca} (\cos \varphi_a - \sin \alpha_a). \end{aligned}$$

Это значение должно быть равно вертикальной проекции дуги меньшей полки

$$AE = R_{cb} [\cos \varphi_b - \cos(\varphi_b + \beta_b)],$$

откуда

$$R_{cb} = \frac{AE}{\cos \varphi_b - \cos (\varphi_b + \beta_b)} = \frac{AE}{\cos \varphi_b - \sin \alpha_b}. \quad (109)$$

Тогда длина дуги средней линии меньшей полки

$$l_b = R_{cb} \beta_b.$$

Горизонтальная часть меньшей полки определится как разность  $l_{rb} = l_{cb} - (l_b + l_{c.nb})$ . Если положение биссектрисы такое, что угол  $\gamma$  имеет большую величину, то возможно быстрое уменьшение угла  $\varphi_a$  и значительный рост радиуса  $R_{ca}$ . В этом случае рекомендуется несколько уменьшить угол  $\gamma$  с самого начала расчета. Уменьшение угла  $\gamma$  означает, что калибр будет повернут относительно оси так, что его полки не будут находиться на одной горизонтали. Для расчета промежуточных калибров такой поворот не будет иметь значения. Однако чистовой калибр следует располагать так, чтобы вертикальные проекции полок были одинаковы.

При расчете калибровки по первоначальному углу  $\gamma$  возможно, что в промежуточных калибрах радиус очертания  $R_{ca}$  будет быстро увеличиваться. В этом случае следует уменьшать длину дуги  $l_a$  к черновым калибрам, увеличивая длину горизонтальной части полки. С уменьшением длины дуги радиус  $R_{ca}$  будет уменьшаться или сохраняться в допустимых пределах.

Расстояния линий центров радиусов очертания полок от вершины, найденной пересечением средних линий полок, будут:  
для большей полки

$$x_a = l_{c.na} \sin \alpha_a + R_{ca} \sin (\varphi_a + \beta_a);$$

для меньшей полки

$$x_b = l_{c.nb} \sin \alpha_b + R_{cb} \sin (\varphi_b + \beta_b).$$

По чертежу калибра:

$$\varphi_a + \beta_a = 90 - \alpha_a; \quad \varphi_b + \beta_b = 90 - \alpha_b.$$

Горизонтальная проекция всего калибра

$$B = B_{xa} + B_{xb} = (b_{1a} + b_{2a} + b_{3a}) + (b_{1b} + b_{2b} + b_{3b}).$$

После подстановки всех значений

$$B_{xa} = l_{c.na} \sin \alpha_a + R_{ca} [\sin (\beta_a + \varphi_a) - \sin \varphi_a] + l_{ra},$$

$$B_{xb} = l_{c.nb} \sin \alpha_b + R_{cb} [\sin (\beta_b + \varphi_b) - \sin \varphi_b] + l_{rb}.$$

Вертикальная проекция всего калибра

$$H = H_b + H_x + 0,5h.$$

Величина  $H_b$  может быть определена по дополнительному построению вершины профиля (рис. 137)

$$H_b = \frac{h \cos \gamma}{2 \sin (\gamma + \alpha_b)}.$$

Величина  $H_x$  определится по уравнению

$$H_x = l_{c.nb} \cos \alpha_b + R_{cb} (\cos \varphi_b - \sin \alpha_b).$$

Вертикальная проекция всего калибра

$$H = l_{c.nb} \cos \alpha_b + R_{cb} (\cos \varphi_b - \sin \alpha_b) + 0,5h \frac{[\cos \gamma + \sin (\gamma + \alpha_b)]}{\sin (\gamma + \alpha_b)}.$$

Расчет калибровки для неравнобокой угловой стали по данному методу следует вести до тех пор, пока угол  $\varphi > 0$ . Если этот угол будет меньше нуля, то это значит, что горизонтальная часть полки лежит выше нижней точки дуги полки. Такое положение с точки зрения технологии про-

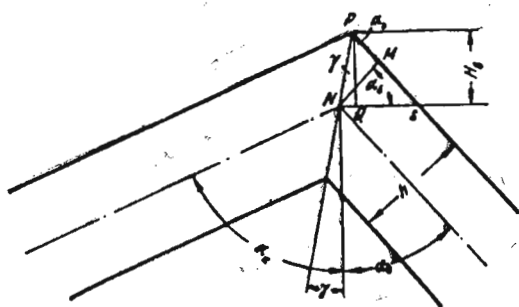


Рис. 137. Элементы вершины калибра неравнобокой угловой стали (к определению величины  $H_B$ )

катки нежелательно, так как при этом на полках будут скапливаться вода и окалина.

При предельных значениях углов  $\varphi_a = 0$ ;  $\varphi_b = 0$  расчет следует вести по уравнениям:

$$x_a = l_{c.n.a} \sin \alpha_a + R_{c.a} \sin \beta_a;$$

$$x_b = l_{c.n.b} \sin \alpha_b + R_{c.b} \sin \beta_b.$$

При этом горизонтальные проекции полок будут:

$$B_{xa} = l_{c.n.a} \sin \alpha_a + R_{c.a} \sin \beta_a + l_{\Gamma a}; \quad B_{xb} = l_{c.n.b} \sin \alpha_b + R_{c.b} \sin \beta_b + l_{\Gamma b}.$$

Вертикальная проекция всего калибра

$$H = l_{c.n.b} \cos \alpha_b + R_{c.b} (1 - \sin \alpha_b) + 0,5 h \frac{[\cos \gamma + \sin (\gamma + \alpha_b)]}{\sin (\gamma + \alpha_b)}$$

Радиусы закруглений  $R_{ca}$  и  $R_{cb}$  при  $\varphi = 0$  определяются по значениям углов  $\beta_a$  и  $\beta_b$  из уравнений (106) — (109). Радиусы закруглений элементов профиля принимаются, как и в случае равнобокой угловой стали.

При расчете калибровки против хода прокатки в средних и черновых калибрах можно последовательно уменьшать длины прямых наклонных участков  $l_{c.n.a}$  и  $l_{c.n.b}$  на 5—10 мм в зависимости от размера профиля.

Площадь промежуточного калибра может быть приближенно определена по длине средних линий полок

$$F_n = (l_{c.a_n} + l_{c.b_n}) h_n.$$

При расчете предчистового калибра приращение угла раскрытия полок  $\alpha_x$  можно принять меньшим, чем в последующих калибрах, например,  $5^\circ$ . Такое уменьшение угла раскрытия обеспечит лучшее формирование вершины чистового профиля.

**Пример расчета.** Рассчитаем калибровку для угловой стали  $125 \times 80 \times 8$  мм. Профиль прокатывают на стане 500 при катающих диаметрах  $D_k = 500$  мм.

Чистовой калибр. Радиус внутреннего закругления  $R_{в1} = 11$  мм; радиус закругления полки  $r_1 = 3,7$  мм;  $h_1 = 8$  мм. Размеры по ГОСТ 8510—57.

Размеры полок с учетом температурной усадки:

$$l_{a1} = 125 \cdot 1,013 = 126,5 \text{ мм}; \quad l_{b1} = 80 \cdot 1,013 = 81 \text{ мм}.$$

Углы положения полок относительно вертикальной оси:

$$\operatorname{tg} \alpha_{a1} = \frac{l_{a1}}{l_{b1}} = \frac{125}{80} = 1,564; \alpha_{a1} = 57^\circ 25';$$

$$\alpha_{b1} = 32^\circ 35'; \gamma = \frac{\alpha_a - \alpha_b}{2} = \frac{57^\circ 25' - 32^\circ 35'}{2} = 12^\circ 25'.$$

Горизонтальная проекция калибра

$$B_1 = 126,5 \sin 57^\circ 25' + 81 \sin 32^\circ 35' = 150 \text{ мм.}$$

Вертикальная проекция профиля по верхней линии полки

$$H_1 = 81 \sin 57^\circ 25' = 68,2 \text{ мм.}$$

Длина средних линий полок:

$$l_{ca1} = l_{a1} - \frac{h_1}{2} = 126,5 - 4 = 122,5 \text{ мм.}$$

$$l_{cb1} = l_{b1} - \frac{h_1}{2} = 81 - 4 = 77 \text{ мм.}$$

Площадь поперечного сечения  $F_1 = 1600 \text{ мм}^2$ .

Предчистовой калибр. Примем коэффициент высотной деформации в первом (чистовом) калибре  $\eta_1 = 1,15$  (см. рис. 132). Толщина полки

$$h_2 = \eta_1 h_1 = 1,15 \cdot 8 = 9,2 \text{ мм.}$$

обжатие в первом калибре

$$\Delta h_1 = h_2 - h_1 = 9,2 - 8 = 1,2 \text{ мм.}$$

Уширение на обе полки от обжатия при  $D_k = 500 \text{ мм}$  в первом калибре (приближенно)

$$\Delta b'_1 = 0,35 \frac{1,2}{9,2} \sqrt{250 \cdot 1,2} = 0,8 \text{ мм.}$$

Уширение каждой полки с учетом изгиба:

$$\Delta b_{a1} = \Delta b'_1 \frac{l_{a1}}{l_{a1} + l_{b1}} + 0,01 l_{a1} = 0,8 \frac{126,5}{126,5 + 81} + 0,01 \cdot 126,5 \approx 1,75 \text{ мм.}$$

$$\Delta b_{b1} = \Delta b'_1 \frac{l_{b1}}{l_{a1} + l_{b1}} + 0,01 l_{b1} = 0,8 \frac{81}{126,5 + 81} + 0,01 \cdot 81 = 1,1 \text{ мм.}$$

Углы положения полок при  $\alpha_{x2} = 5^\circ$ :

$$\alpha_{a2} = \alpha_{a1} + \frac{\alpha_{x2}}{2} = 57^\circ 25' + 2^\circ 30' = 59^\circ 55';$$

$$\alpha_{b2} = \alpha_{b1} + \frac{\alpha_{x2}}{2} = 32^\circ 35' + 2^\circ 30' = 35^\circ 5'.$$

Длины средних линий полок:

$$l_{ca2} = l_{ca1} - \Delta b_{a1} = 122,5 - 1,75 = 120,75 \text{ мм.}$$

$$l_{cb2} = l_{cb1} - \Delta b_{b1} = 77 - 1,1 = 75,9 \text{ мм.}$$

Длина прямой наклонной части средней линии большей полки

$$l_{c.n.a2} = 0,5 l_{ca2} = 0,5 \cdot 120,75 = 60,4 \text{ мм.}$$

Длина прямой наклонной части средней линии меньшей полки

$$l_{c.n.b2} = l_{c.n.a2} \frac{\cos \alpha_{a2}}{\cos \alpha_{b2}} = 60,4 \frac{\cos 59^\circ 55'}{\cos 35^\circ 5'} = 36,9 \text{ мм.}$$

Длина дуги по средней линии большей полки

$$l_{a2} = 0,4 l_{ca2} = 0,4 \cdot 120,75 = 48,4 \text{ мм.}$$

Длина горизонтальной части бóльшей полки

$$l_{га2} = l_{с а2} - (l_{с.н а2} + \overset{\smile}{l}_{а2}) = 120,75 - (60,4 + 48,4) = 11,95 \text{ мм.}$$

Определяем значения углов для бóльшей полки:

$$\varphi_{а2} + \beta_{а2} = 90 - \alpha_{а2}; \quad \varphi_{а2} = 90 - \alpha_{а2} - \beta_{а2}.$$

Принимаем угол  $\beta_2 = 30^\circ$ ,  
тогда

$$\varphi_{а2} = 60 - \alpha_{а2} = 60^\circ - 59^\circ 55' = 5'.$$

Радиус очертания бóльшей полки по средней линии

$$R_{с а2} = \frac{\overset{\smile}{l}_{а2}}{\beta_{а2}} = \frac{48,4}{0,523} = 92,5 \text{ мм.}$$

Углы для меньшей полки

$$\varphi_{б2} + \beta_{б2} = 90 - \alpha_{б2}; \quad \varphi_{б2} = 60^\circ - 35^\circ 5' = 24^\circ 55'.$$

Вертикальная проекция дуги бóльшей полки

$$R_{с а2} (\cos \varphi_{а2} - \sin \alpha_{а2}) = 92,5 (\cos 5' - \sin 59^\circ 55') = 12,4 \text{ мм.}$$

Радиус очертания меньшей полки по средней линии

$$R_{с б2} = \frac{12,4}{\cos \varphi_{б2} - \sin \alpha_{б2}} = \frac{12,4}{\cos 24^\circ 55' - \sin 35^\circ 5'} = 37,3 \text{ мм.}$$

При  $\beta_{б2} = 30^\circ$  длина дуги по средней линии меньшей полки

$$\overset{\smile}{l}_{б2} = R_{с б2} \beta_{б2} = 37,3 \cdot 0,523 = 19,5 \text{ мм.}$$

Длина горизонтальной части меньшей полки

$$l_{г б2} = l_{с б2} - (l_{с.н б2} + \overset{\smile}{l}_{б2}) = 75,9 - (36,9 + 19,5) = 19,5 \text{ мм.}$$

Расстояния по горизонтали линий центров радиусов очертания от вершины будут:

для бóльшей полки

$$x_{а2} = l_{с.н а2} \sin \alpha_{а2} + R_{с а2} \sin (\varphi_{а2} + \beta_{а2}) = 60,4 \sin 59^\circ 55' + 92,5 \sin (5' + 30^\circ) = 98,6 \text{ мм,}$$

для меньшей полки

$$x_{б2} = l_{с.н б2} \sin \alpha_{б2} + R_{с б2} \sin (\varphi_{б2} + \beta_{б2}) = 36,9 \sin 35^\circ 5' + 37,3 \sin (24^\circ 55' + 30^\circ) = 51,9 \text{ мм.}$$

Горизонтальная проекция бóльшей полки

$$B_{а2} = l_{с.н а2} \sin \alpha_{а2} + R_{с а2} [\sin (\beta_{а2} + \varphi_{а2}) - \sin \varphi_{а2}] + l_{га2} = 60,4 \sin 59^\circ 55' + 92,5 [\sin (30^\circ + 5') - \sin 5'] + 11,95 = 110,4 \text{ мм.}$$

Горизонтальная проекция меньшей полки

$$B_{б2} = l_{с.н б2} \sin \alpha_{б2} + R_{с б2} [\sin (\beta_{б2} + \varphi_{б2}) - \sin \varphi_{б2}] + l_{г б2} = 36,9 \sin 35^\circ 5' + 37,3 [\sin (30^\circ + 24^\circ 55') - \sin 24^\circ 55'] + 19,5 = 55,7 \text{ мм.}$$

Общая ширина калибра

$$B_2 = B_{а2} + B_{б2} = 110,4 + 55,7 = 166,1 \text{ мм.}$$



Вертикальная проекция всего калибра

$$H_2 = l_{c.a2} \cos \alpha_{a2} + R_{c.a2} (\cos \varphi_{a2} - \sin \alpha_{a2}) + 0,5 h_2 \frac{[\cos \gamma + \sin (\gamma + \alpha_{b2})]}{\sin (\gamma + \alpha_{b2})} =$$

$$= 60,4 \cos 59^\circ 55' + 92,5 (\cos 5' - \sin 59^\circ 55') +$$

$$+ 0,5 \cdot 9,2 \frac{[\cos 12^\circ 25' + \sin (12^\circ 25' + 35^\circ 5')] }{\sin (12^\circ 25' + 35^\circ 5')} = 53,4 \text{ мм.}$$

Радиус внутреннего закругления

$$R_{b2} = \eta_1 R_{b1} = 1,15 \cdot 11 \approx 13 \text{ мм.}$$

Раздел калибра сверху.

Радиус закругления полки

$$r_2 = r_1 + \Delta h_1 = 3,7 + 1,2 \approx 5 \text{ мм.}$$

Площадь поперечного сечения по средним линиям полок

$$F_2 = (l_{c.a2} + l_{c.b2}) h_2 = (120,75 + 75,9) 9,2 = 1810 \text{ мм}^2.$$

В этом калибре угол  $\varphi_{a2}$  оказывается приближающимся к нулю. Если по приведенным уравнениям производить расчет и далее, то получим нежелательное положение конца большей полки. Это обстоятельство необходимо учесть при последующих расчетах.

Третий калибр. Примем коэффициент высотной деформации во втором калибре  $\eta_2 = 1,25$ . Дальнейший расчет аналогичен приведенному выше.

Расчет фасонных калибров ведут до тех пор, пока не будет достигнута незначительная разница между общей высотой профиля и толщиной полки. С точки зрения условий деформации вполне допустимо, что в первый по ходу прокатки фасонный калибр будет задаваться полоса. Поэтому далее рекомендуется рассчитывать размеры исходной полосы.

Исходная полоса. Задаемся коэффициентом высотной деформации  $\eta$  в первом фасонном калибре. Тогда

$$H_{\text{пол}} = \eta h_{\text{ф}},$$

где  $h_{\text{ф}}$  — толщина полки в первом по ходу прокатки фасонном калибре.

Раскат в первом фасонном калибре значительно изгибается. Следовательно, его ширину необходимо определять с условием дополнительного уширения полок из-за их внеконтактной деформации при изгибе.

Ширина исходной полосы, задаваемой в первой фасонный калибр:

$$B_{\text{пол}} = (l_{c.a} + l_{c.b}) - (\Delta b_a + \Delta b_b),$$

где  $l_{c.a}$ ,  $l_{c.b}$ , и  $\Delta b_a$ ,  $\Delta b_b$  — длины средних линий полок и уширения каждой из них в первом по ходу прокатки фасонном калибре.

На рис. 138 показана калибровка неравнобокой угловой стали  $125 \times 80 \times 8$  мм по рассмотренному методу. На рисунке приведены все необходимые размеры.

#### Расположение на валках калибров угловой стали

Положение калибра устанавливают следующим образом. Вначале находят нейтральную линию калибра, которую совмещают со средней линией валков. Если предполагается вести прокатку с верхним давлением, то нейтральную линию располагают ниже средней линии на расстоянии, равном четверти от предусмотренного давления. Калибровка чистовых валков для неравнобокой и равнобокой угловой стали показана на рис. 139.

Уменьшение или увеличение диаметра по буртам между калибрами может составлять примерно 10% от диаметра по краю полки калибра.

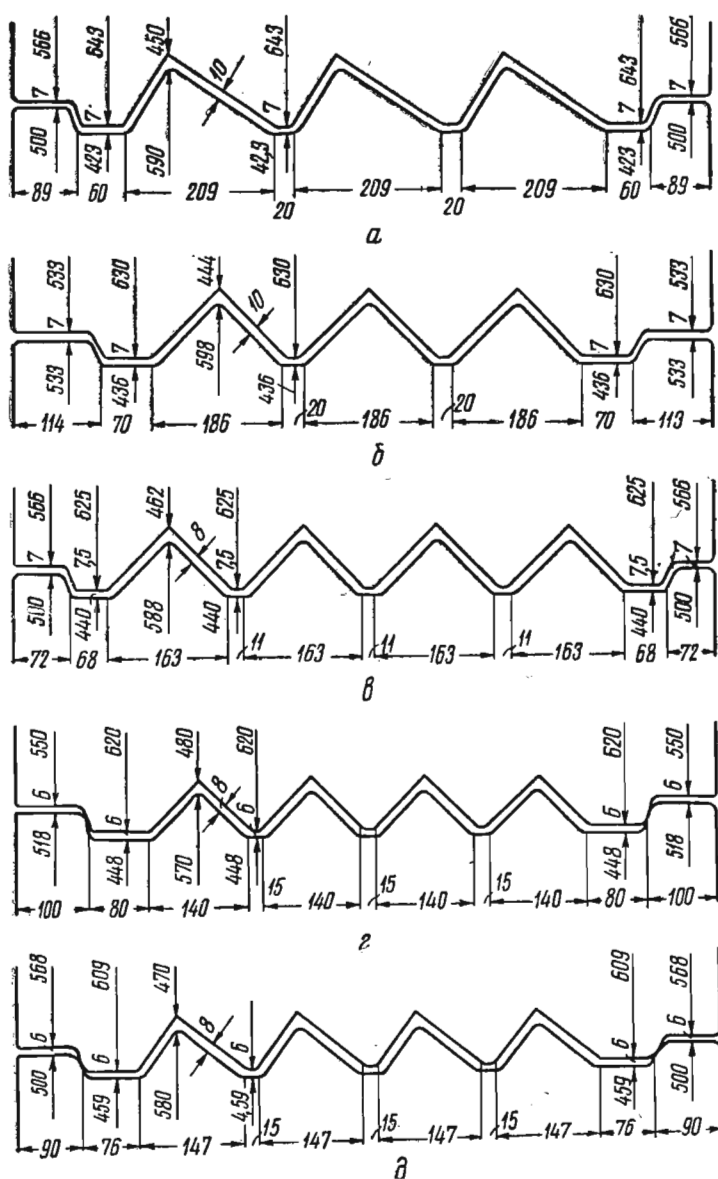


Рис. 139. Калибровка чистовых валков для прокатки равнобокой и неравнобокой угловой стали:

а — 150×100 мм; б — 120×120 мм; в — 90×90 и 100×100 мм; г — 75×75 и 80×80 мм; д — 100×75 мм

Это означает, что высота бурта после перекрытия калибра должна быть не менее 15—20 мм. Для повышения стойкости буртов и увеличения срока службы валков вообще имеет большое значение закругление углов на буртах. Поэтому радиус закругления углов на буртах принимают конструктивно в пределах 5—15 мм. Ширину буртов между калибрами также принимают конструктивно в пределах 15—25 мм. Бурты, расположенные по краям бочки валков, обычно делают с уступами. Ширина каждого уступа примерно равна половине всей ширины крайнего бурта.

## КАЛИБРОВКА ЗЕТОВОЙ СТАЛИ

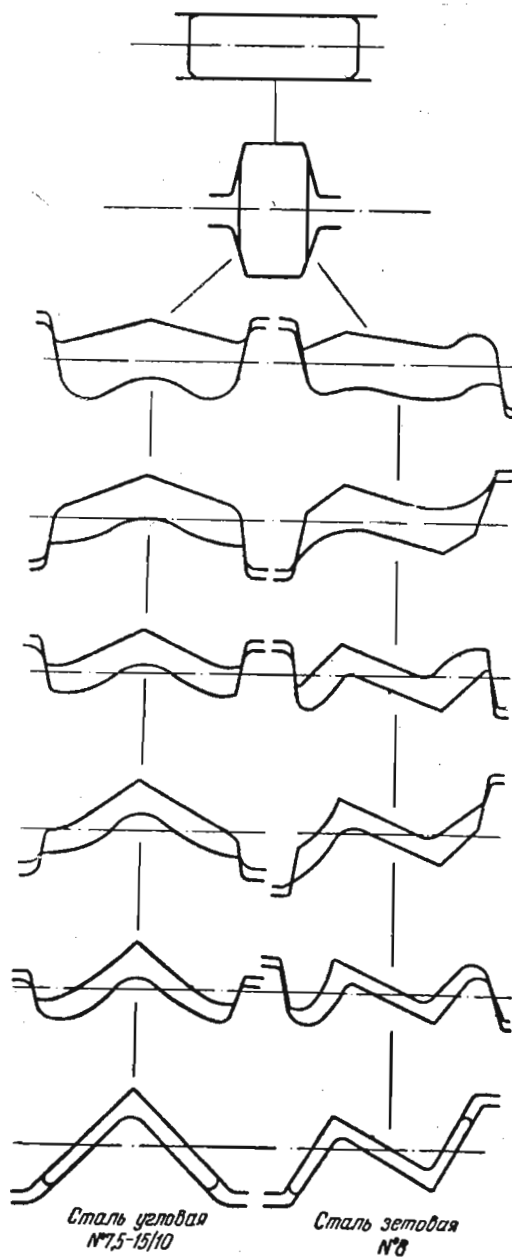
Зетовая сталь характерна большим разнообразием профилируемых (рис. 140). Наибольшее распространение имеет зетовая сталь для вагонов и для их хребтовой балки. У первого профиля ширина и толщина обеих полок одинаковы, а у второго — различны.

Зетовую сталь прокатывают в калибрах, имеющих разделы по краям поочередно сверху и снизу (рис. 141). Расчет калибровки этого профиля во многом аналогичен расчету угловой стали. Калибры для зетовой стали необходимо располагать в валках так, чтобы не было условий для их осевого смещения.

Осевые усилия  $P_1$ ,  $P_2$  и  $P_3$  на валки могут привести к разнотолщинности полок и стенки (рис. 142). Чтобы не допустить этого, в калибрах предусматривают рабочие конусы, которые не могут полностью гарантировать получения точных и постоянных размеров профиля, так как с течением времени срабатываются, и валки все же смещаются в осевом направлении. При этом толщина полок увеличивается, а толщина стенки — уменьшается. Валки растачивают так, чтобы рабочие конусы имели хорошую гладкую поверхность, что достигается притиркой их «на масло». Показанное на рис. 142 расположение калибра между тем удобно, так как при выходе из валков раскат имеет две точки соприкосновения с роликами рольганга. С точки зрения глубины вреза ручьев в валки такое расположение калибра также наиболее приемлемо. Если калибр врезают в валки так, что биссектрисы  $AC$  и  $BD$  углов располагаются вертикально (рис. 143), то раскат по выходе из валков будет соприкасаться с рольгангом сначала в одной точке опоры, а потом — падать на другую точку опоры (полку). Это усложняет подачу раската в каждый последующий калибр, так как к моменту захвата приходится поворачивать этот раскат относительно продольной оси в положение, отвечающее врезу калибра. Но при таком врезе калибра несколько снижаются осевые усилия. Из-за осевых усилий при изготовлении новых валков калибр врезают в них так, чтобы толщина стенки имела размеры вначале по плюсовым допускам, а по мере износа конусов и достижения номинальных размеров — по минусовым допускам. Таким образом, эксплуатационный срок службы валков определяется не только стойкостью собственно калибра, но и общим износом рабочих конусов. Для повышения срока службы валков (с точки зрения срока службы рабочего конуса) иногда стремятся увеличить глубину вреза ручьев за счет значительного увеличения съема материала валка. Но такое решение вряд ли следует считать рациональным. Во-первых, при значительном съеме материала валка калибр будет врезан в металл с переходной структурой или даже в зону серого чугуна. Во-вторых, увеличение поверхности конуса, а следовательно, и размера бурта по высоте уменьшит прочность последнего. Бурты же должны быть такими, чтобы обеспечивались нормальные условия деформации полок даже при самом значительном их уширении. Учитывая это, размер бурта можно увеличить на 10—20 мм по диаметру в зависимости от размера зетовой ста-



Р и с. 140. Группа зетовых профилей



Р и с. 141. Схема прокатки угловой и зетовой стали при общих черновых калибрах

ли. Уклон рабочих конусов принимают 10—15%. Чтобы не происходило «закусывания» полок буртами калибра, углы на буртах закругляют соответствующими радиусами.

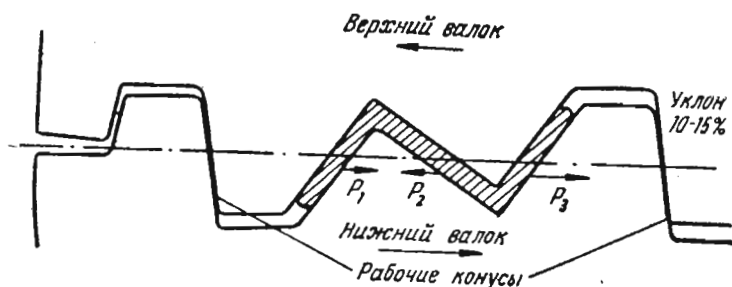


Рис. 142. Схема действия горизонтальных сил при прокатке зетовой стали, вызывающих разнотолщинность полок и стенки

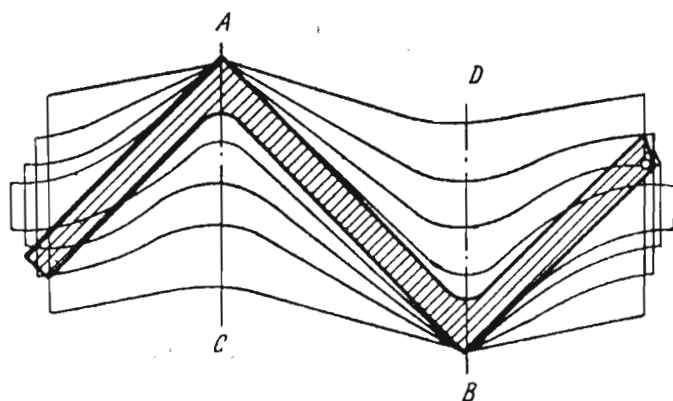


Рис. 143. Общая схема прокатки зетовой стали при наложении калибров (биссектрисы углов раската расположены вертикально)

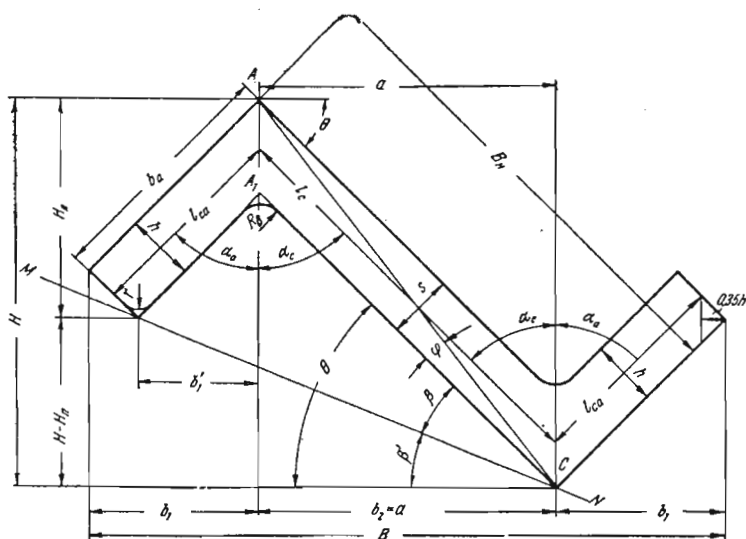
## 1. Методы расчета калибров зетовой стали

### Первый метод

Чтобы обеспечить правильное получение углов профиля, необходимо создать условия точного совпадения вершин раската в каждом проходе. С этой целью при расчетах калибровки выдерживают постоянным расстояние между вершинами профиля как по горизонтали, так и по вертикали. Построение чистового калибра показано на рис. 144: диагональ  $AC$  и высота  $H$  от первого калибра до последнего (чистового) фасонного остаются постоянными.

Если расположить калибр так, что биссектриса каждого угла будет вертикальной, то ход расчета будет более наглядным. Однако можно располагать калибр и так, что профиль при выходе из валков будет опираться на две точки; тогда несколько изменятся основные уравнения, рекомендуемые для расчетов. Остановимся только на первом способе расположения калибра.

Угол при вершине можно принимать с последовательным увеличением его от чистового калибра к черновым (к первым профилировочным). В предлагаемом методе расчета будет использован принцип отгибания полки на определенный (принимаемый) угол относительно вертикальной оси, являющейся одновременно биссектрисой для первого (чистового) калибра.



Р и с. 144. Построение чистового калибра зетовой стали и его основные расчетные элементы

При определении основных размеров калибра расчет будем вести по средним линиям. Обжатия стенки и полок, а также их толщину определяем по коэффициентам высотной деформации, принимаемым одинаковыми для обоих элементов профиля. Уширение элементов профиля определяем исходя из следующих соображений. Стенка профиля формируется при постоянных размерах высоты  $H$  и расстояния по горизонтали между вершинами. Поэтому расчет ее уширения не требуется. Формоизменение стенки сопровождается обжатием по толщине и растяжением между вершинами. Увеличение длины средней линии стенки по ходу прокатки определяется абсолютным обжатием в каждом проходе; принимать за основу естественное уширение стенки нельзя. При расчетах ширины полок в чистовом и первом фасонном (по ходу прокатки) калибрах следует учитывать увеличение уширения полки вследствие внеконтактной деформации из-за значительного изгиба:

$$\Delta b_n = \frac{\Delta b}{2} + 0,01l_c,$$

где  $\Delta b_n$  — уширение полки;

$\Delta b$  — общее уширение;

$l_c$  — средняя линия полки в чистовом и первом фасонном калибрах.

Радиусы закругления элементов профиля рекомендуется принимать, как и для угловой стали, с учетом соблюдения очередности положения раздела калибров. Коэффициенты высотной деформации по полкам и стенке принимают по данным исследований; их величина, однако, находится в пределах значений таких же коэффициентов для угловой стали (см. соответствующие графики и табл. 12).

**Чистовой калибр.** Для определения основных элементов калибра профиль расположим таким образом, чтобы биссектрисы углов были вертикальными (см. рис. 144). В соответствии с принятым сортаментом имеется зетовая сталь с одинаковой или различной толщиной стенки и полок. Так, отдельные профили зетовой стали и, как правило, такой же стали для хребтовой балки имеют полки по толщине больших размеров, чем толщина стенки.

Рассмотрим отдельно оба случая.

1. Толщина полок и стенки одинакова. Ширина полки в горячем состоянии  $b_a = 1,013 b$ ; длина средней линии полки  $l_{ca} = b_a - 0,5s$ ; длина стенки в горячем состоянии  $B_n = 1,013 B$ ; длина средней линии стенки  $l_c = B_n - h = A_1 C$ .

Конструктивными величинами при построении калибра являются:

$$a = l_c \cos \theta; \quad H = l_c \sin \theta + 1,41h.$$

$$\text{или} \quad H = AC \sin(\theta + \varphi); \quad \operatorname{tg} \varphi = \frac{s}{l_c + h}; \quad \varphi = \operatorname{arctg} \frac{s}{l_c + h};$$

$$AC = \sqrt{s^2 + (l_c + h)^2} = \sqrt{(l_c + h)^2 \operatorname{tg}^2 \varphi + (l_c + h)^2} = (l_c + h) \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi}$$

Без учета радиуса  $r$  закругления полки

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{l_{ca} - 0,5s}{B_n - h} = \frac{l_{ca} - 0,5s}{l_c},$$

$$\text{откуда} \quad \beta = \operatorname{arctg} \frac{l_{ca} - 0,5s}{l_c}.$$

Угол  $\theta$  может быть найден из равенства

$$\theta = 90 - \alpha_c,$$

где  $\alpha_c$  — угол между вертикальной осью и стенкой.

Радиусы внутреннего очертания  $R_n$  и очертания на краях полок  $r$  определяются начальными условиями ГОСТа.

Общая ширина калибра

$$B = 2b_1 + b_2; \quad b_1 = l_{ca} \sin \alpha_a + 0,35h; \quad b_2 = a = l_c \cos \theta;$$

тогда

$$B = 2(l_{ca} \sin \alpha_a + 0,35h) + l_c \cos \theta,$$

где  $\alpha_a$  — угол между вертикальной осью и полкой.

Вертикальная проекция полки

$$H_n = 0,707h + l_{ca} \cos \alpha_a + 0,35h.$$

При  $\alpha_a = 45^\circ$

$$H_n = 0,707h + 0,707l_{ca} + 0,35h = 1,057h + 0,707l_{ca}.$$

Горизонтальная проекция по внутреннему очертанию полки

$$b'_1 = (l_{ca} - 0,5s) \sin \alpha_a = 0,707(l_{ca} - 0,5s).$$

Угол наклона

$$\operatorname{tg} \beta'_1 = \frac{H - H_n}{b'_1 + b_2} = \frac{(l_c \sin \theta + 1,41h) - (1,057h + 0,707l_{ca})}{0,707(l_{ca} - 0,5s) + l_c \cos \theta},$$

откуда после упрощения

$$\beta'_1 = \operatorname{arctg} \frac{l_c + 0,5h - l_{ca}}{l_c + l_{ca} - 0,5s}.$$

2. Толщина полок и стенки различна. В этом случае (обычно толщина полок больше толщины стенки) размер  $a$  не будет определять положения вершин профиля (рис. 145). Размером, определяющим положение вершин по средней линии профиля, является размер  $a'$ , который также должен сохраняться постоянным в расчетах всех последующих калибров. При таком условии концы средней линии стенки как бы будут скользить по прямым  $NN$  и  $N_1N_1$ . Размер  $\frac{a - a'}{2}$  также



Из  $\triangle AKD$  по построению  $KG = GD = AG$ .

Следовательно:

$$KG = GD = AG = AD \sin 45^\circ = \frac{h-s}{2} 0,707 = \frac{h-s}{2,85}$$

и

$$\frac{a-a'}{2} = AG = \frac{h-s}{2,85}.$$

Угол  $\gamma_c$  между биссектрисой и линией, проведенной через вершины, может быть определен также аналитически:

$$\gamma_c = \angle E_1OA_1 - 45^\circ = \angle EOA - 45^\circ;$$

$$\angle E_1OA_1 = \angle EOA = \arctg \frac{h}{s}.$$

Угол  $\gamma_c$  во всех калибрах сохраняется постоянным.

Конструктивными размерами для настоящего варианта будут:

$$a = a' + 2AG = a' + \frac{h-s}{1,41}; \quad a' = l_c \cos \theta; \quad a = l_c \cos \theta + \frac{h-s}{1,41}.$$

Горизонтальная проекция стенки  $b_2 = a' = l_c \cos \theta$ .

Вертикальная проекция чистового калибра при  $h > s$

$$H = l_c \sin \theta + \frac{h+s}{2 \sin \theta} = 0,707 (l_c + h + s).$$

Вертикальная проекция полки чистового калибра

$$H_n = \frac{h+s}{4 \sin \alpha_c} + l_{ca} \cos \alpha_a + 0,35h = 0,707 (l_{ca} + h) + 0,35s.$$

Все остальные уравнения первого варианта справедливы и для настоящего случая.

*Предчистовой и последующие калибры.* Для всех последующих калибров против хода прокатки принимаем постоянными размеры  $a$ ,  $H$  и  $AC$  (см. рис. 144). Переменными величинами из ранее приведенных будут длина средней линии стенки, а также углы  $\varphi$ ,  $\beta$  и  $\theta$  (см. рис. 144 и 147). Соответственно изменится конфигурация полки. Поэтому закономерности изменения элементов будем рассматривать отдельно.

Угол  $\varphi_n$  будет увеличиваться примерно пропорционально приращению толщины стенки и может быть определен по выражению

$$\sin \varphi_n = \frac{s_n}{AC}, \quad \varphi_n = \arcsin \frac{s_n}{AC}.$$

При известном значении угла  $\varphi$  в чистовом калибре в каждом последующем калибре приращение угла  $\Delta\varphi_n$  составит

$$\Delta\varphi_n = \varphi_n - \varphi_{n-1},$$

где  $n$  — порядковый номер прохода.

С увеличением угла  $\varphi$  углы  $\theta$  и  $\beta$  будут соответственно уменьшаться:

$$\theta_n = \theta_{n-1} - \Delta\varphi_n; \quad \beta_n = \beta_{n-1} - \Delta\varphi_n.$$

Однако  $\beta_n$  изменяется и в зависимости от разворачивания полки. Окончательное значение этого угла будет приведено ниже. С увеличением угла  $\varphi$  будет изменяться положение средней линии стенки: длина  $l_c$  будет сокращаться. При постоянном размере  $a$

$$l_c = \frac{a}{\cos \theta_n}.$$

При разных толщинах полки и стенки ( $h > s$ ) это уравнение будет иметь вид

$$l_c = \frac{a'}{\cos \theta_n}.$$

Угол со стороны стенки будет увеличиваться и определяться формулой

$$\alpha_{cn} = \alpha_{cn-1} + \Delta\varphi_n;$$

длина средней линии полки

$$l_{can} = l_{can-1} - \Delta b_a,$$

где  $\Delta b_a$  — уширение, приходящееся на одну полку; длину прямой наклонной части полки принимаем

$$l_{nn} = 0,5 l_{ca};$$

а длину дуги по средней линии полки

$$l_a = (0,35 \div 0,4) l_{ca};$$

горизонтальный участок полки

$$l_r = (0,1 \div 0,15) l_{ca}.$$

Радиусы очертания по средней линии полки  $R_a$  определяются из условия, что они по краям дуги перпендикулярны наклонному и горизонтальному участкам полки. Угол между крайними положениями этих радиусов

$$\gamma_n = 90 - \alpha_{an}.$$

В этом случае

$$R_a \gamma_n = l_a; \quad R_a = \frac{l_a}{\gamma_n}.$$

Угол  $\alpha_{an}$  может изменяться по проходам на величину  $\Delta\varphi_n$ , как и угол  $\alpha_{cn}$ :

$$\alpha_{an} = \alpha_{an-1} + \Delta\varphi_n.$$

Расстояние от вертикальной оси вершины до линии центров радиусов очертания дуги по средней линии полки (см. рис. 147 и 148)

$$x_a = l_{nn} \sin \alpha_{an} + R_a \sin \gamma_n.$$

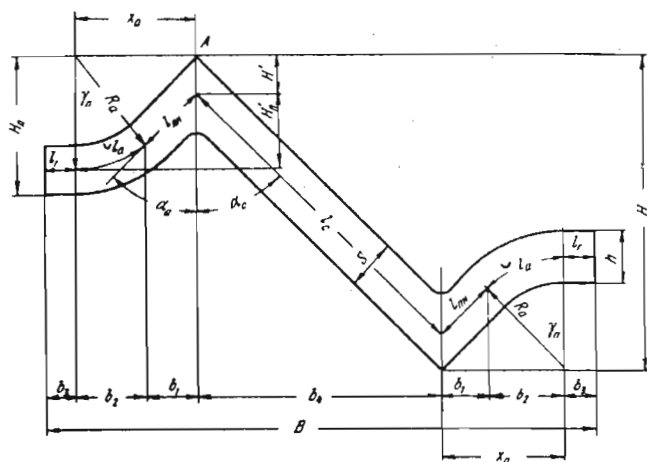
Горизонтальная проекция всего калибра (рис. 148):

$$B = 2(b_1 + b_2 + b_3) + b_4;$$

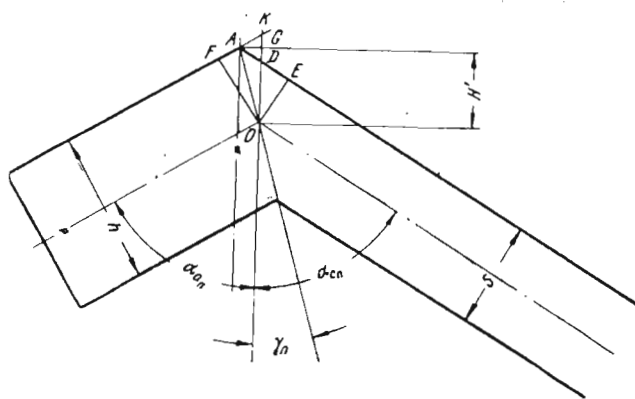
$$b_1 + b_2 = x_a = l_{nn} \sin \alpha_{an} + R_a \sin \gamma_n,$$

$$b_3 = l_r; \quad b_4 = l_c \cos \theta_n = a = \text{const.}$$

После подстановки значений всех составляющих получим



Р и с. 148. Дополнительное построение промежуточного калибра для определения горизонтальной и вертикальной проекций калибра



Р и с. 149. Построение вершины калибра для определения размера \$H'\$

$$B = 2(l_{п.н} \sin \alpha_{an} + R_a \sin \gamma_n + l_r) + a,$$

или

$$B = 2x_a + 2l_r + a = 2(x_a + l_r) + a.$$

Если полка имеет большую толщину, чем стенка (\$h > s\$), то \$b\_4 = a' = \text{const}\$.

Вертикальная проекция \$H\$ остается постоянной и пересчета не требует. Для вреза калибра в валки необходимо определить вертикальную проекцию полок \$H\_n\$. Согласно построению (см. рис. 148)

$$H_n = H' + H'_n + 0,5h.$$

Составляющая \$H'\$ может быть найдена из следующих соотношений (рис. 149). Если толщина полки больше толщины стенки профиля, т. е. \$h > s\$, то из \$\triangle FOK\$

$$OK = \frac{FO}{\sin \alpha_{an}} = \frac{h}{2 \sin \alpha_{an}}.$$

Кроме того, из \$\triangle DOE\$ получим

$$OD = \frac{OE}{\sin \alpha_{cn}} = \frac{s}{2 \sin \alpha_{cn}}.$$

Тогда

$$KD = 2KG = 2GD = OK - OD = \frac{h}{2 \sin \alpha_{an}} - \frac{s}{2 \sin \alpha_{cn}},$$

откуда

$$GD = KG = \frac{1}{4} \left( \frac{h}{\sin \alpha_{an}} - \frac{s}{\sin \alpha_{cn}} \right).$$

Но по предлагаемому методу расчета

$$\alpha_{an} = \alpha_{cn},$$

тогда

$$GD = KG = \frac{h-s}{4 \sin \alpha_{an}} = \frac{h-s}{4 \sin \alpha_{cn}}.$$

Окончательно составляющая  $H'$  при  $\alpha_{an} = \alpha_{cn}$  будет (см. рис. 148):

$$H' = OK - KG = \frac{h}{2 \sin \alpha_{an}} - \frac{h-s}{4 \sin \alpha_{cn}} = \frac{h+s}{4 \sin \alpha_{cn}},$$

или также

$$H' = OD + GD = \frac{s}{2 \sin \alpha_{an}} + \frac{h-s}{4 \sin \alpha_{cn}} = \frac{h+s}{4 \sin \alpha_{an}}.$$

Составляющая  $H'_n$  выразится суммой

$$H'_n = l_{n,n} \cos \alpha_{an} + R_a (1 - \cos \gamma_n).$$

Общая вертикальная проекция развернутой полки

$$H_n = \frac{h+s}{4 \sin \alpha_{an}} + l_{n,n} \cos \alpha_{an} + R_a (1 - \cos \gamma_n) + 0,5h.$$

Если толщина полки равна толщине стенки, т. е.  $h=s$ , то

$$H_n = \frac{h}{2 \sin \alpha_{an}} + l_{n,n} \cos \alpha_{an} + R_a (1 - \cos \gamma_n) + 0,5h.$$

Угол  $\beta_n$  во всех последующих калибрах, начиная от предчистового, будет уменьшаться не только в результате изменения положения средней линии стенки (за счет  $\Delta \varphi_n$ ), но также и вследствие разворачивания полок и увеличения угла  $\alpha_{an}$ . Это уменьшение угла  $\beta_n$  может быть найдено при определении угла  $\beta'_n$  в каждом промежуточном калибре (см. рис. 147):

$$\operatorname{tg} \beta'_n = \frac{H - H_{nn}}{b_1 + b_2}; \quad \beta'_n = \arctg \frac{H - H_{nn}}{b_1 + b_2}.$$

В этом уравнении следует учитывать, какое значение высот калибра надо принимать в зависимости от толщины полки и стенки. При  $h > s$  и  $\alpha_a = \alpha_c$  угол  $\beta_n$  для чистового калибра после упрощения выразится формулой

$$\beta'_1 = \arctg \frac{l_c - l_{ca} + 0,5s}{l_c + l_{ca} - 0,5s}.$$

Для всех остальных промежуточных калибров при  $h > s$

$$\beta'_n = \arctg \frac{0,707(l_c + h + s) - \left[ \frac{h+s}{4 \sin \alpha_{an}} + l_{n,n} \cos \alpha_{an} + R_a (1 - \cos \gamma_n) + 0,5h \right]}{l_{n,n} \sin \alpha_{an} + R_a \sin \gamma_n + l_r + a'}.$$

Следовательно, угол  $\beta_n$  будет уменьшаться еще на величину

$$\Delta \beta'_n = \beta'_n - \beta'_1,$$

и может быть окончательно получен как результат разности

$$\beta_n = \beta_{n-1} - (\Delta \varphi_n + \Delta \beta'_n).$$

Площадь калибра рассчитывают по длине средней линии, а также толщинам стенки и полок.

## Второй метод

Калибровку можно рассчитывать также по способу последовательного раскрытия полок по формуле

$$\alpha_n = 90^\circ + \Delta\alpha(n-1),$$

где  $\alpha_n$  — угол между полкой и стенкой профиля;

$\Delta\alpha$  — приращение угла  $\alpha_n$ ;

$n$  — порядковый номер калибра.

Величина  $\Delta\alpha$  может приниматься по соответствующим рекомендациям для угловой стали (гл. XI). По углу  $\alpha_n$  рассчитывают все остальные величины: толщины стенки и полки, углы их положения, коэффициенты высотной деформации по полке и стенке, длины средних линий и т. д. Практически этот метод сводится к обратной последовательности определения основных размеров калибра по принимаемому углу раскрытия.

Достоинством данного метода является возможность более интенсивного раскрытия полок по проходам и более быстрого приближения к исходной полосе.

## 2. Расчет ширины и высоты калибра при расположении его в валках

Врез калибра в бочку валков для зетовых профилей может быть произведен только после определения ширины калибра относительно «базисной» линии  $MN$  (см. рис. 147).

Ширину и высоту калибра определяют графически после построения фигуры по расчетным данным.

Но эти величины можно найти и аналитически:

$$B_{MN} = \frac{B}{\cos \beta'_n}; \quad H_{nMN} = \frac{H_{nn}}{\cos \beta_n}.$$

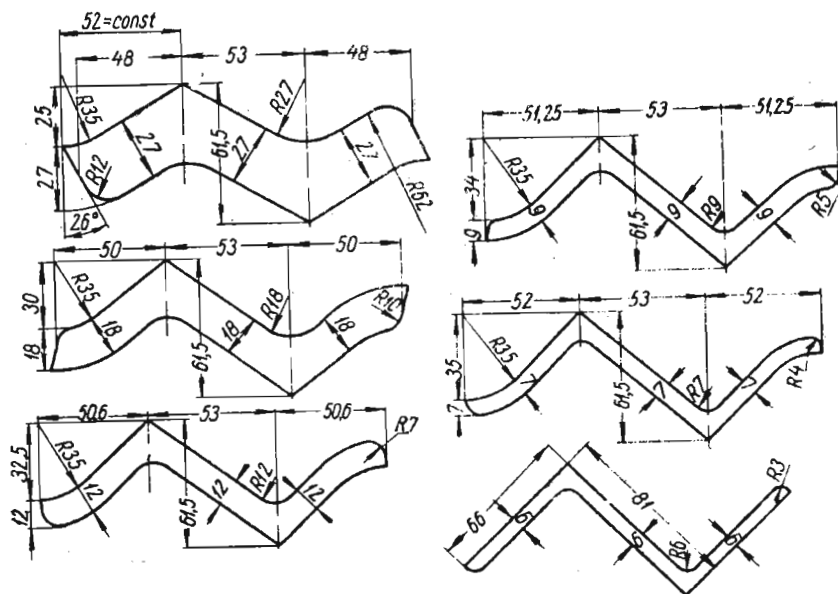


Рис. 150. Размеры калибров зетовой стали № 8

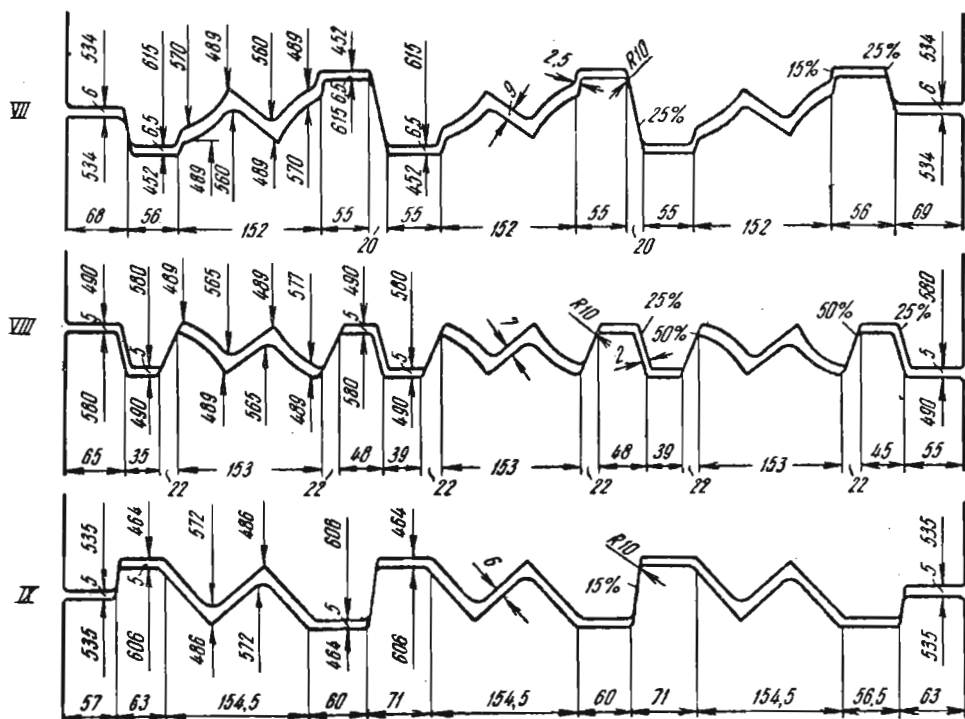


Рис. 151. Калибровка валков зетовой стали № 8 на крупносортом стане 500 (последние три клетки)

Если размеры полок по толщине и ширине одинаковы, то нейтральная линия калибра после его поворота будет находиться на половине общей высоты, что облегчит калибровку валков. Размеры ширины буртов и их диаметры определяют так же, как и для угловой стали.

Для примера на рис. 150 показана калибровка зетовой стали № 8 с соответствующими размерами. На рис. 151 показана калибровка валков последних трех клеток крупносортового стана 500.

### 3. Калибровка зетовой стали для хребтовой балки

Зетовая сталь для хребтовой балки отличается от обычной зетовой стали тем, что толщина одной из ее полок больше, чем стенки. В то же время ширина толстой полки меньше ширины другой, имеющей одинаковую толщину со стенкой.

Калибровка такой балки сводится к расчетам с применением приведенных выше уравнений обоих видов; методика расчета не изменяется. При этом одну полку вместе со стенкой необходимо рассчитывать как их сочетание при условии, что толщина полки больше толщины стенки ( $h > s$ ); вторую же полку рассчитывать из условия равенства толщин ( $h = s$ ). В основе расчета и в этом случае должно выдерживаться равенство коэффициентов высотной деформации по всем элементам профиля.

Методика расчета и отправные данные (коэффициенты деформации, приращения углов раскрытия и др.) могут быть приняты, как и для угловой стали (гл. XI).

## Часть пятая

### КАЛИБРОВКА ФЛАНЦЕВЫХ ПРОФИЛЕЙ

#### Глава XIII

#### КАЛИБРОВКА ДВУТАВРОВЫХ БАЛОК

##### 1. Профиль и его характеристика

Профиль двутавровой балки показан на рис. 152. К важным характеристикам балки относятся: ее высота  $h$  и ширина полки  $b$ , площадь поперечного сечения  $F$ , масса (вес) 1 пог. м, моменты сопротивления  $W_x$  и  $W_y$ , радиусы инерции  $\rho_x$  и  $\rho_y$ , толщина стенки  $d$  и отношение  $\frac{d}{h}$ , характеризующее устойчивость профиля.

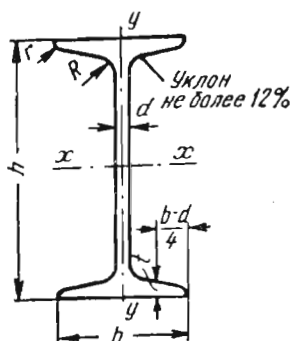


Рис. 152. Профиль двутавровой балки:

$h$  — высота балки;  $b$  — ширина полки;  $d$  — толщина стенки;  $t$  — средняя толщина полки;  $R$  — радиус внутреннего закругления;  $r$  — радиус закругления полки

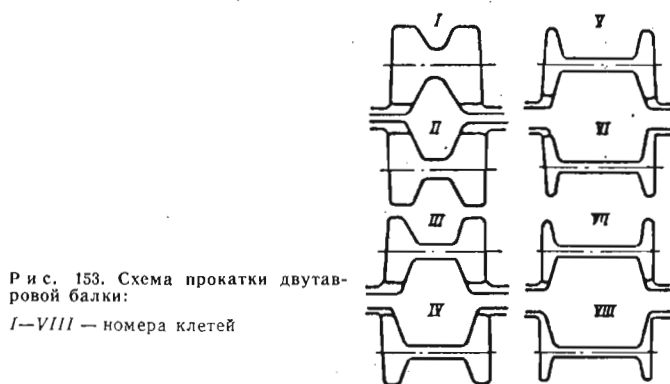
Характеристики двутавровых балок могут быть определены по ГОСТ 8239—56. С увеличением высоты (номера) балки отношения  $\frac{b}{h}$  и  $\frac{d}{h}$  уменьшаются, а отношение  $\frac{F_c}{F}$  (площади стенки к площади всего профиля) увеличивается.

##### 2. Особенности прокатки и калибровки двутавровых балок

Двутавровые балки прокатывают на сортовых и рельсобалочных станах. Схема прокатки балок показана на рис. 153. При калибровке балок необходимо учитывать ряд особенностей деформации металла в калибрах. Характерной особенностью является резко выраженная неравномерность деформации при формировании профиля из прямоугольной заготовки.

Обычно в первых двух-трех проходах (разрезной и следующий за ним калибр) деформация весьма неравномерная; металл при этом име-

ет достаточно высокую температуру и пластичность. Дальнейшее формирование профиля происходит в закрытых фланцевых калибрах. В этих калибрах характер деформации элементов профиля различный. Стенка профиля обжимается в результате прямого давления. Фланец в открытой части калибра (открытый фланец) подвергается большому боковому обжатию и получает при этом некоторое приращение высоты. Фланец в закрытой части калибра (закрытый фланец) подвергается незначительному боковому обжатию и получает большое обжатие



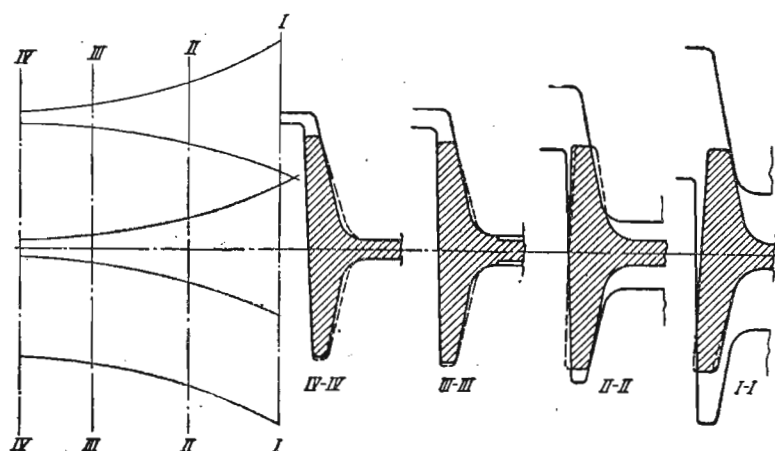
Р и с. 153. Схема прокатки двутавровой балки:  
I—VIII — номера клеток

по высоте, что способствует вытяжке фланца и компенсирует отрицательное влияние утяжки.

Характер деформации металла в балочном калибре описан в работах В. Тафеля, В. Е. Грум-Гржимайло, В. Тринкса, Н. Метца, А. П. Чекарарева, П. И. Полухина, Б. П. Бахтинова, М. С. Мутьева и других исследователей.

Неравномерность деформации элементов профиля неизбежно вызывает некоторое перемещение металла из одной части калибра в другую.

Следующей особенностью деформации металла в закрытом балочном калибре является разновременность обжатий фланцев и стенки. На рис. 154 показаны стадии последовательного обжатия элементов



Р и с. 154. Стадии прокатки (I—IV) в балочном калибре (выпуск в закрытых и открытых ручьях 2 и 5%)

профиля в очаге деформации. Раньше всего начинается боковое обжатие в открытых фланцах калибра и боковое и высотное обжатия в закрытых. Обжатие стенки наступает тогда, когда практически деформация фланцев уже закончена.

Разновременность захвата валками стенки и фланцев зависит от наклона внутренних граней полок (фланцев). Так как наклон внутренних граней фланцев увеличивается от чистовых калибров к черновым, разновременность деформации элементов профиля наиболее резко выражена в черновых калибрах. Это неизбежно приводит к возникнове-

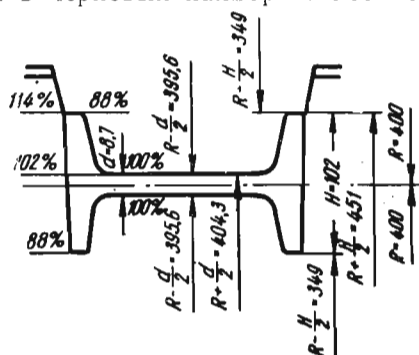


Рис. 155. Катающие радиусы валков при обработке различных частей балки (по схеме В. Е. Грум-Гржимайло)

нию и развитию областей внеконтактной деформации, а также к перемещению металла из одной части профиля в другую.

Большое обжатие стенки в чистовом и предчистовом калибрах может привести к утяжке фланцев по высоте. Это явление особенно заметно при прокатке балок большого размера; площадь стенки профиля таких балок составляет значительную долю площади всего профиля.

При прокатке в балочном калибре скоростные и силовые условия по его очертанию различны. Это объясняется различием катающих диаметров в различных частях калибра (рис. 155), из-за чего стенка и фланцы одного и того же профиля прокатываются с разными скоростями. Наиболее сильное воздействие на профиль оказывают поверхности калибра, обрабатывающие стенку, и весь профиль, без учета опережения, выходит из валков со скоростью, соответствующей скорости этих поверхностей. Принимая за 100% скорость выхода стенки из валков (а значит и скорость выхода всего профиля), получаем, согласно В. Е. Грум-Гржимайло, применительно к балке № 24 и валкам диам. 800 мм различные скорости поверхностей валка (калибра). Так, скорости нижнего валка на конце закрытого фланца и верхнего валка на конце открытого фланца составляют 88% от скорости стенки. Скорость же нижнего валка у основания открытого фланца равна 102% и на конце открытого фланца 114% от скорости стенки.

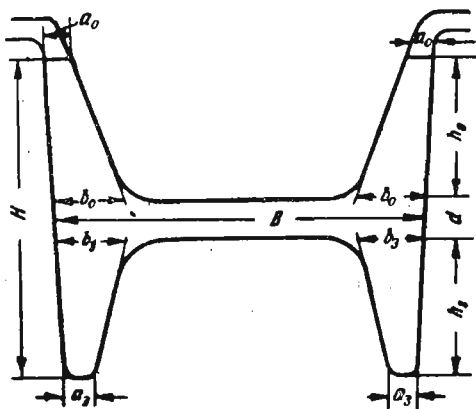
Так как весь профиль выходит из валков с одинаковой скоростью (100%), закрытые фланцы профиля опережают свои части калибра. Под влиянием стенки нижние фланцы как бы проволакиваются через неподвижный калибр. Чем толще фланцы, задаваемые в закрытые части калибра, тем больше тянущее усилие к закрытым фланцам со стороны стенки и тем больше утяжка их по высоте.

Процесс деформации в открытых частях калибра идет по-другому. Здесь задаваемые фланцы профиля обрабатываются коническими поверхностями, имеющими разные скорости: при этом они обжимаются по толщине и получают некоторое приращение высоты. Чередование положения открытых и закрытых фланцев по проходам создает воз-

возможность равномерной обработки нижней и верхней частей прокатываемого профиля.

Различие скоростных и силовых условий по очертанию балочного калибра приводит к его неравномерному износу. Практика показывает, что открытые фланцы калибра изнашиваются быстрее, чем закрытые. По мере износа боковое обжатие в закрытых фланцах калибра постепенно увеличивается, а в открытых — уменьшается. Это влияет также

Р и с. 156. Закрытый балочный калибр



на приращение высоты открытых фланцев и на утяжку высоты закрытых.

Примем следующие обозначения размеров закрытого балочного калибра (рис. 156):

$a_o$  — толщина открытого фланца на конце;

$a_3$  — толщина закрытого фланца на конце;

$b_o$  — толщина открытого фланца у основания;

$b_3$  — толщина закрытого фланца у основания.

Условимся размеры профиля, поступающего в данный калибр, отмечать индексами со штрихами. Тогда коэффициенты бокового обжатия фланцев будут:

а) для открытых фланцев (конца и основания)

$$\eta_o^a = \frac{a_3'}{a_o}, \quad (110)$$

и

$$\eta_o^b = \frac{b_3'}{b_o}, \quad (111)$$

б) для закрытых фланцев (конца и основания)

$$\eta_3^a = \frac{a_o'}{a_3}, \quad (112)$$

и

$$\eta_3^b = \frac{b_o'}{b_3}. \quad (113)$$

Если коэффициент  $\eta_o^b > \eta_o^a$ , то приращение высоты открытого фланца будет минимальным, а иногда наблюдается даже утяжка фланцев. Если коэффициент  $\eta_o^a > \eta_o^b$ , то при этом получается наибольшее приращение высоты открытого фланца.

Ряд вопросов калибровки и прокатки балок, например число проходов, частные коэффициенты деформации по проходам, размещение калибров на валках и другие, решают в зависимости от типа прокатного стана, числа и расположения клетей, мощности привода и т. д.

### Число проходов

Число проходов в фасонных калибрах, необходимое для формирования профиля двутавровой балки, по практическим данным, зависит от номера:

№ профиля	Число проходов	№ профиля	Число проходов
10—12	6—8	18—24	8—11
12—18	7—9	24—60	10—15

При определении числа  $n$  фасонных калибров можно руководствоваться также примерной аналитической зависимостью

$$n = 0,18A + 4,2, \quad (114)$$

где  $A$  — номер профиля двутавровой балки.

Использование приведенного уравнения дает удовлетворительные результаты; уравнение составлено для условия, когда для балки № 10 принимается минимальное число фасонных калибров, а для балки № 60 — максимальное число фасонных калибров.

Общее число проходов принимают несколько большим по сравнению с указанным выше или рассчитанным по формуле (114). Это нужно для того, чтобы в первых двух-трех проходах получить заготовку для подачи ее в первый фасонный разрезной калибр. Это не относится к балкам больших размеров (№ 40 и выше), для прокатки которых поступает фасонная заготовка с блюминга.

### Распределение коэффициентов деформации по проходам

На рис. 157 показана зависимость средней вытяжки от номера прокатываемого профиля. Из рисунка видно, что средняя вытяжка уменьшается с увеличением номера балки. Это объясняется главным образом

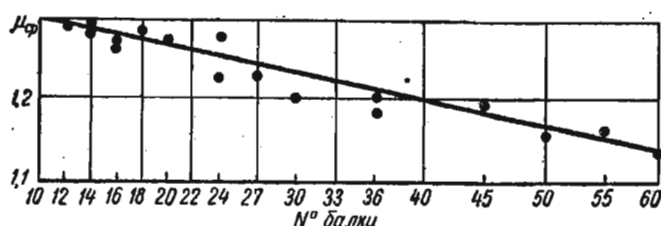


Рис. 157. Зависимость средней вытяжки от номера двутавровой балки

тем, что доля площади стенки в общей площади профиля заметно растет с увеличением высоты профиля, и сохранение высоких значений вытяжек при прокатке балок больших номеров, когда вытяжка всего профиля в значительной степени осуществляется за счет стенки, неизбежно будет приводить к утяжке фланцев.

Средняя вытяжка при прокатке двутавровой балки может быть определена также по уравнению

$$\mu_{ср} = -0,0031A + 1,3372, \quad (114a)$$

где  $A$  — номер балки.

Обычно частные вытяжки распределяют по проходам так, чтобы величина их уменьшалась к чистовому калибру. При прокатке балок малых и средних размеров иногда принимают меньшие значения вытяжки в первых двух фасонных калибрах (по ходу прокатки) для обеспечения захвата металла валками. Аналогичная зависимость соблюдается и для коэффициентов высотной деформации по стенке (рис. 158).

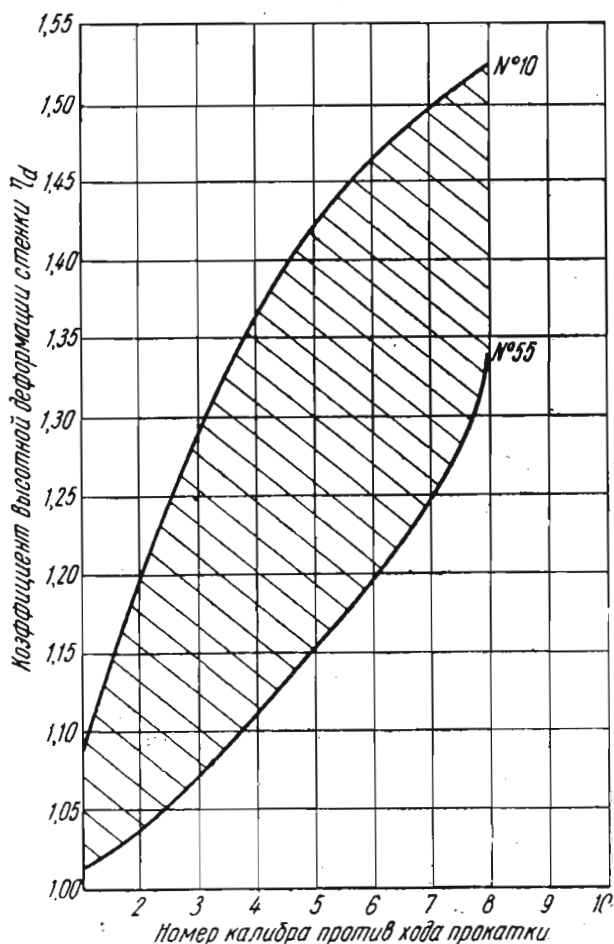


Рис. 158. Распределение коэффициентов деформации по проходам для стенки при прокатке двутавровых балок № 10—55 (то же для швеллеров)

При прокатке двутавровых балок больших размеров в черновых проходах стенка профиля уже достаточно развита и поэтому коэффициент высотного обжатия по стенке во всех проходах меньше, чем коэффициент вытяжки профиля. Это объясняется в ряде случаев стремлением иметь менее энергичную деформацию по стенке, чтобы избежать утяжки высоты фланцев.

Для балок малых и средних размеров коэффициент высотного обжатия по стенке, как правило, больше, чем общий коэффициент вытяжки; только в последних 2—3 проходах по ходу прокатки эти коэффициенты либо выравниваются, либо коэффициент высотного обжатия стенки становится меньше коэффициента вытяжки профиля. Это объясняется тем, что здесь в черновых проходах стенка профиля менее

развита и ее энергичная деформация не приводит к утяжке фланцев по высоте. В то же время интенсивная деформация стенки способствует ее развитию и созданию в черновых калибрах необходимого соотношения площадей стенки и всего профиля (близкого к соотношению в готовом профиле).

Таким образом, можно считать, что на отечественных заводах принят общий принцип распределения коэффициентов деформации по проходам, сводящийся к следующему.

1. Средняя вытяжка  $\mu_{\text{ср}}$  зависит от размера двутавровой балки и возрастает примерно от 1,15 для балки № 60 до 1,30 для балки № 12.

2. Коэффициенты деформации должны плавно уменьшаться от черновых калибров к чистовым. Нарушение этой закономерности возможно в сторону уменьшения коэффициентов вытяжки в черновых калибрах исходя из условий захвата полосы валками.

3. Коэффициент высотного обжатия по стенке  $\eta_c$  для двутавровых балок № 40 и выше во всех проходах меньше, чем коэффициент вытяжки. Для балок № 12—36 в чистовом и предчистовом проходах  $\mu > \eta_c$ , а в черновых проходах  $\eta_c > \mu$ . Разница в коэффициентах деформации тем больше, чем меньше размер профиля.

#### *Распределение коэффициентов деформации по элементам калибра*

Характер деформации фланцев балочного калибра в калибровках отечественных заводов одинаков: в открытом фланце калибра всегда  $\eta_a^o > \eta_b^o$ , а в закрытом фланце  $\eta_b^z > \eta_a^z$ . Распределение коэффициентов бокового обжатия по проходам зависит от номера балки.

Для профилей малых размеров характерно плавное уменьшение коэффициентов бокового обжатия от черновых проходов к чистовым. Во всех калибрах осуществляют более энергичное боковое обжатие металла в открытом фланце и менее энергичное в закрытом. В ряде случаев коэффициент бокового обжатия у конца закрытого фланца  $\eta_z^a$  принимают меньшим единицы, что облегчает проникновение фланцев профиля в закрытые фланцы калибра.

При прокатке балок средних и больших размеров возможно менее плавное изменение коэффициентов бокового обжатия от чернового калибра к чистовому, что зависит от типа стана, формы и размеров исходной заготовки.

В случае прокатки балки из прямоугольной заготовки в двух-трех проходах после первого разрезного калибра коэффициенты бокового обжатия фланцев у основания уменьшаются. При очень больших коэффициентах бокового обжатия имеется опасность возникновения подрезов и закатов у основания фланцев.

Коэффициенты бокового обжатия у конца фланцев и у их основания, а также другие коэффициенты и величины деформации на практике принимают различными (рис. 159—163).

Боковое обжатие фланцев в открытом и закрытом фланцах калибра определяют по соответствующим коэффициентам. В настоящее время существует два направления в методе калибровки двутавровой балки. По первому направлению считают, что в закрытых фланцах калибра боковое обжатие предусматривать не следует, допуская весьма незначительное боковое обжатие у основания фланца. В этом случае происходит только утяжка по высоте. Такой характер деформации в закрытом фланце объясняют более надежным формированием фланца в соответствии с построением калибра. Отсутствие бокового обжатия или его незначительная величина в закрытом фланце способствуют свобод-

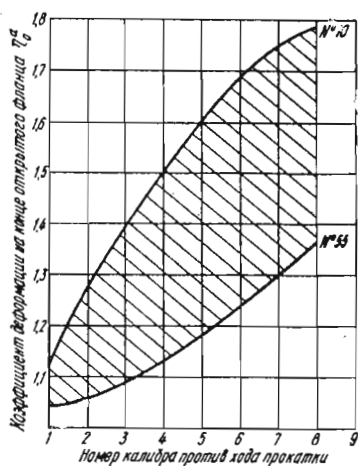


Рис. 159. Распределение коэффициентов деформации на конце открытого фланца при прокатке двутавровых балок № 10—55 (то же для швеллеров)

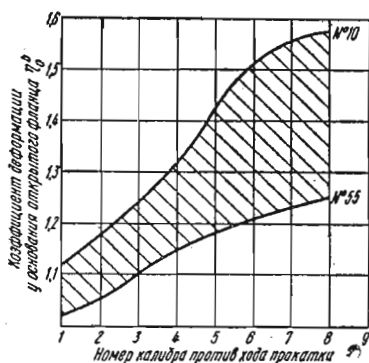


Рис. 160. Распределение коэффициентов деформации у основания открытого фланца при прокатке двутавровых балок № 10—55 (то же для швеллеров)

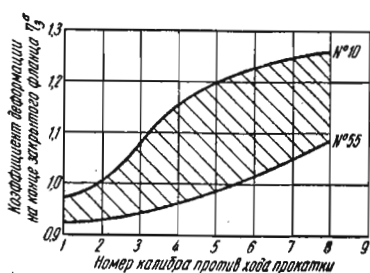


Рис. 161. Распределение коэффициентов деформации на конце закрытого фланца при прокатке двутавровых балок № 10—55

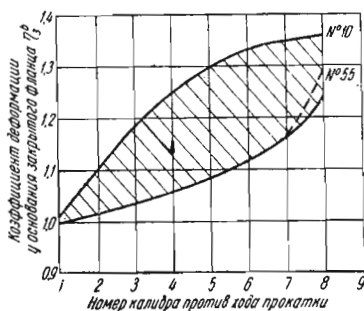
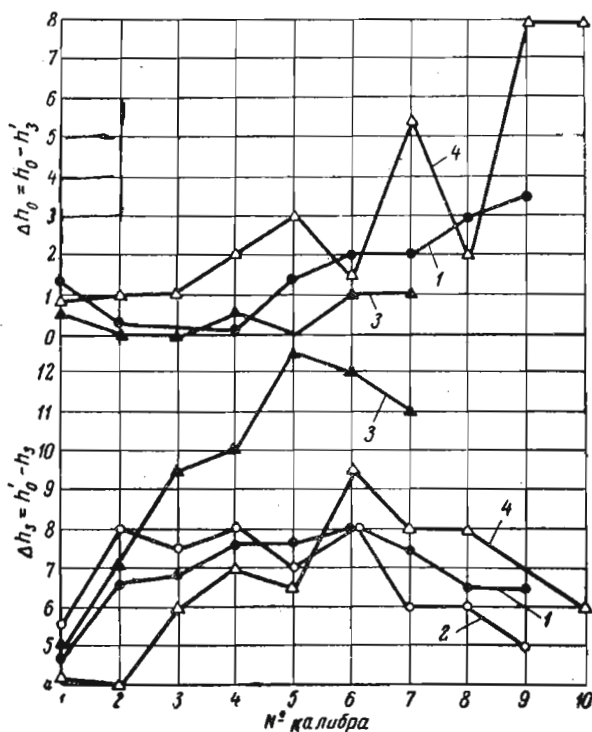


Рис. 162. Распределение коэффициентов деформации у основания закрытого фланца при прокатке двутавровых балок № 10—55

Рис. 163. Распределение приращения открытого фланца и утяжки закрытого фланца по проходам для двутавровых балок № 24—27 на различных заводах:  
1 — завод А; 2 — завод В; 3 — завод Г; 4 — завод Д



ному входу фланцев в данный калибр. Опыт прокатки подтверждает данное положение.

По второму же направлению считают, что в закрытых фланцах калибра следует предусматривать боковое обжатие, задаваясь соответствующими коэффициентами деформации у конца и у основания закрытого фланца. Однако такое решение не всегда оправдывается на практике. По мере выработки открытого фланца калибра происходит значительное защемление металла в закрытом фланце, что приводит к осадке фланца, его утяжке вследствие увеличения сопротивления входу металла в закрытый фланец.

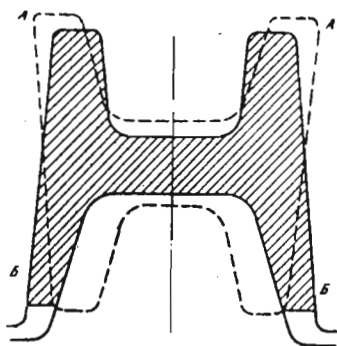


Рис. 164. Схема положения раската, задаваемого в калибр (раскат точками А будет скользить по стенке калибра, начиная от точек соприкосновения Б)

Таким образом, известное приращение высоты в открытом фланце «съедается» в закрытом фланце; при этом происходит дополнительная большая потеря высоты фланца и последующее отклонение размеров от расчетных по калибровке.

Для новых калибров еще допустимо некоторое боковое обжатие, однако по мере выработки калибра будут искажаться элементы промежуточного профиля, определенные калибровкой.

Несомненно, что идеальным условием калибровки и прокатки двутавровых балок следует считать равенство коэффициентов деформации (вытяжек) всех элементов профиля. Этого можно достигнуть только при прокатке в универсальных клетях, обжимая профиль одновременно горизонтальными и вертикальными вальками.

При боковом обжатии в закрытом фланце будет происходить еще осаживание фланца по высоте за счет высотного обжатия задаваемого раската (рис. 164). Нельзя не учитывать и то, что в закрытые фланцы калибра фланцы раската входят при одновременном значительном их изгибе в обратную сторону (изменение выпуска калибра).

#### *Приращение и обжатие (утяжка) фланцев по высоте*

Уменьшение высоты фланцев, включающее утяжку и обжатие, а также приращение высоты фланцев зависят от следующих факторов: степени бокового обжатия фланцев, соотношения коэффициентов бокового обжатия на конце фланцев и у их основания, естественного уширения в калибре, коэффициента внешнего трения, скоростных условий и др.

Обычно величинами приращений и обжатий (утяжек) фланцев при расчете калибровок задаются приблизительно. Возможные ошибки в принимаемой величине приращения открытого фланца компенсируются несколько увеличенным обжатием (по сравнению с расчетным) в последующем закрытом фланце.

На основании исследований и анализа практических данных можно рекомендовать для расчетов следующие средние величины приращений и обжатий (утяжек) фланцев (табл. 14).

Т а б л и ц а 14

Средние величины приращения и утяжки фланцев

Номер балки	Приращение фланцев в открытых ручьях калибров, мм		Утяжка фланцев в закрытых ручьях калибров, мм	
	черновых	предчистовых и чистовых	черновых	предчистовых и чистовых
10—14	1—2	0,75—1,5	4—7	4—5
16—20	1,0—1,5	0,5—1,0	4—7	6—8
22—28	0,5—1,0	0,5—1,0	5—8	6—10
Свыше 28	1,0—1,5	1,0—1,5	5—8	7—10

### Уширение

Уширение в балочном калибре до настоящего времени еще недостаточно изучено. Многие исследователи не придают этому вопросу должного значения. Между тем уширение имеет очень большое значение для формирования профиля и ведения технологического процесса прокатки. Уширение оказывает существенное влияние на утяжку и приращение фланцев, получение профиля с хорошей поверхностью, особенно, если калибры имеют большие выпуски.

Считают, что если разность двух соседних калибров по ширине превышает естественное уширение, то это обычно приводит к утяжке фланцев как в открытом, так и в закрытом ручьях калибра.

Это положение справедливо при значительной разнице ширины двух соседних калибров. Однако при прокатке двутавровых балок из высокоуглеродистых и легированных сталей даже небольшая разница по ширине против естественного уширения приводит к появлению закатов у основания фланцев.

В настоящее время в ряде опубликованных работ по калибровке рекомендуют принимать уширение в чистовом калибре в зависимости от его ширины:

$$\Delta b = 0,01B.$$

В каждом последующем калибре против хода прокатки уширение увеличивают на 1 мм. Однако практикой работы заводов не подтверждаются эти рекомендации. Анализ применяемых различными заводами калибровок показывает, что практически независимо от номера профиля балки, при прокатке низкоуглеродистых сталей уширение в чистовом калибре составляет 1,5—3,0 мм. В последующих калибрах против хода прокатки уширение увеличивается в среднем на 0,5 мм. Только в разрезном калибре уширение значительно больше (8—15 мм).

Анализ условий деформации металла в калибре, а также изучение опыта прокатки двутавровых балок и швеллеров высокого качества без каких бы то ни было признаков заката у основания фланцев позволяют рекомендовать для расчета уширения во фланцевых калибрах следующую формулу:

$$\Delta b_n = C + \frac{n-1}{2}, \quad (115)$$

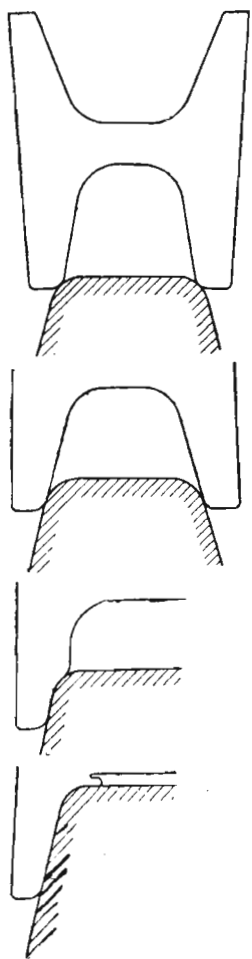


Рис. 165. Схема образования заката у основания фланцев при большом уширении (прокатка двутавровой балки из высокоуглеродистой и легированной стали)

где  $\Delta b_n$  — уширение в данном калибре;  
 $C$  — уширение в чистовом калибре (табл. 15);  
 $n$  — номер прохода (против хода прокатки).

Таблица 15

Величины уширения в чистовом калибре

Номер балки	Величина $C$ , мм, при прокатке стали	
	низкоуглеродистой	высокоуглеродистой и легированной
10—14	1,5	0,75—1,0
14—18	2,0—2,5	1,25—1,5
27—40	2,5—3,0	1,5—2,0
45—60	3,0—4,0	2,0—2,5

Опыт прокатки двутавровых балок из высокоуглеродистых и легированных сталей показывает, что уширение в калибрах следует принимать не более естественного, которое может быть примерно определено по обжатию стенки.

При прокатке балки из низкоуглеродистой стали принимаемое в ряде случаев несоответствие уширения естественной его величине компенсируется вынужденным растяжением стенки в направлении фланцев (вынужденное поперечное растяжение профиля). При этом образование закатов у основания фланцев не наблюдается, несмотря на то что может быть некоторая утяжка фланцев.

При прокатке балок из легированных и высокоуглеродистых сталей с большим уширением в калибрах растяжение стенки не происходит, и поэтому получается срез металла буртами вала с последующим образованием заката (рис. 165).

### Радиусы закруглений

Существенную роль при формировании двутаврового профиля играют закругления углов в местах соединения фланцев со стенкой (рис. 166). Если принимать их без определенной закономерности, то можно получить такие размеры основания фланцев, что будет происходить большая утяжка фланцев по высоте. Так как в углах калибров происходит наиболее интенсивная деформация металла, то значение радиусов закруглений еще больше возрастает.

В настоящее время общепризнано, что радиусы закруглений должны зависеть от толщины фланцев у основания и на конце.

Исходными коэффициентами, определяющими соотношения между радиусами закругления и толщинами фланцев, являются отношения этих величин в чистовом калибре:

$$C_o^b = \frac{R_o}{b_o}; \quad (116)$$

$$C_0^a = \frac{r_0}{a_0}; \quad (117)$$

$$C_3^b = \frac{R_3}{b_3}; \quad (118)$$

$$C_3^a = \frac{r_3}{a_3}. \quad (119)$$

Используя эти коэффициенты для всех последующих калибров против хода прокатки, определяем радиусы закруглений по уравнениям:

$$R_{он}^b = C_0^b b_{он}; \quad (120)$$

$$R_{3н}^b = C_3^b b_{3н}; \quad (121)$$

$$r_{он}^a = C_0^a a_{он}; \quad (122)$$

$$r_{3н}^a = C_3^a a_{3н}, \quad (123)$$

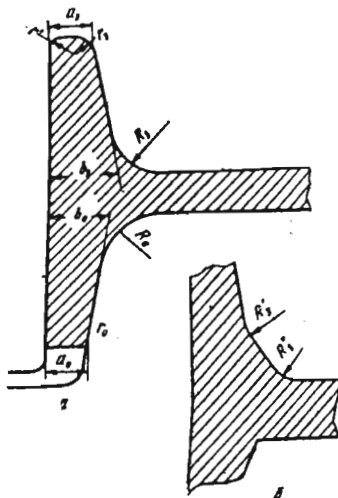
где

$b_{он}$  и  $b_{3н}$  — толщины оснований открытого и закрытого фланцев  $n$ -го прохода;

$a_{он}$  и  $a_{3н}$  — толщины на конце открытого и закрытого фланцев  $n$ -го прохода.

Р и с. 166. Закругления углов калибра:

$a$  — обычное;  $b$  — с дополнительным радиусом по закрытому фланцу



При определении радиусов закруглений для черновых калибров по уравнениям (120) — (123) рекомендуется коэффициенты принимать меньше на 10—20%, чем в чистовом калибре.

#### *Общие положения методики расчета калибровки балок*

Рациональная калибровка балок должна предусматривать наибольшую неравномерность деформации металла в черновых калибрах. Так, для балок больших размеров обычно ставят условие: отношение площади стенки ко всей площади фасонной заготовки, получаемой с блюминга, должно равняться этому отношению для готового профиля.

Анализ действующих калибровок показывает, что отношение  $\frac{F_c}{F}$  остается практически постоянным для всех проходов, кроме разрезного, при прокатке балок малых размеров и несколько повышается от чер-

нового прохода к чистовому при прокатке балок больших размеров. Это объясняется тем, что у балок больших размеров стенка профиля уже достаточно развита в черновых проходах, и поэтому во избежание утяжки фланцев последние деформируют более энергично.

### *Выпуск калибра*

Для закрытых фланцев калибров принимают небольшие выпуски (2—4%). Для этих фланцев выпуски выполняют «внутрь» (рис. 167). Увеличение выпуска наружной стороны закрытых фланцев нежелательно, так как при деформации в них открытых фланцев будет получаться после предшествующего калибра значительный обратный изгиб фланцев и даже возможно появление закатов на внешней части конца полки. Большой выпуск закрытых фланцев затрудняет обратный изгиб соответствующих фланцев в открытых фланцах последующего калибра и может вызвать смятие фланцев задаваемого раската или утяжку фланца с закатом у его основания.

Для черновых калибров (первые один-два) принимают общий выпуск по внешней стороне калибра, а для остальных калибров — отдельно по закрытым и открытым фланцам (см. рис. 167). Выпуск открытых фланцев должен быть больше, чем закрытых. Обычно он составляет 4—8%. Однако имеются калибровки и с выпуском до 15—20%.

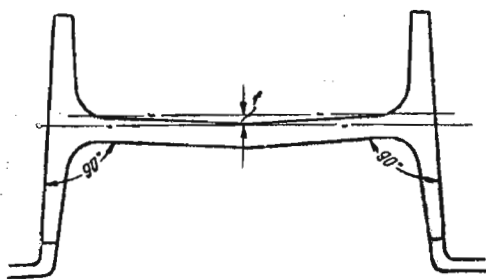
На рис. 168 показана калибровка балки № 12 с большими выпусками. Вместе с тем такой большой выпуск открытых фланцев калибра вряд ли можно рекомендовать. При переточке валков и для создания повышенных боковых обжатий большой выпуск открытых фланцев приемлем. Рассматривая же условия входа открытых фланцев раската в закрытые фланцы калибра, легко заметить, что при прокатке можно получить закаты на внешней части конца полок (см. рис. 164). Подобное явление и наблюдается на практике. Поэтому большие выпуски по открытым фланцам не рекомендуются.

Выпуск открытых фланцев получается внешним, так как их изгиб относительно основания направлен «наружу» от вертикальной линии. Исследования показывают, что по условиям входа раската в калибр и получения качественного профиля при достаточной возможности восстановления размеров калибра следует ограничить верхний предел выпуска 8—10%. Во всех остальных случаях с увеличением выпуска открытых фланцев ухудшаются условия прокатки, профиль получается неустойчивых размеров, а по мере выработки калибров появляется закат на внешней части полки.

Изгиб фланцев при конструировании выпусков следует производить относительно линии *АВ* (см. рис. 167), проходящей по основаниям закрытых фланцев. Выпуск предчистового калибра по открытому и закрытому фланцам должен быть соответственно 3—4 и 2,0—2,5%, а для обоих фланцев чистового калибра — не более 1%.

Другая рекомендация сводится к тому, что выпуск полок калибра можно получить прогибом стенки по вертикальной оси калибра (рис. 169). При этом полки всегда должны располагаться относительно стенки перпендикулярно. Уклон фланцев в этом случае будет общим и определяется углом наклона стенки при ее изгибе. Такой способ получения выпуска калибра вполне приемлем. При входе раската в любой последующий калибр будет происходить обратный изгиб его. Для промежуточного профиля изгибом стенки достигают выпуск калибра 10% и более без всяких нарушений технологического процесса прокатки с последующим уменьшением его к чистовому калибру.

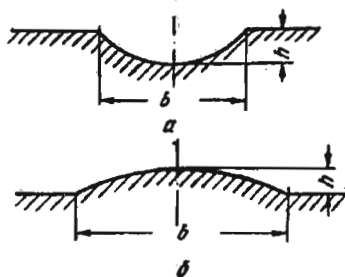




Р и с. 169. Прогиб стенки для облегчения выпуска калибра

### Разрезной калибр

В разрезном калибре решающую роль играет разрезающий гребень. Чем острее разрезающий гребень, тем на большую глубину внедрится он в металл (заготовку) при меньшем расходе энергии. Однако захват металла валками с острым гребнем будет значительно хуже, чем с притупленным гребнем. Для улучшения захвата на разрезающих гребнях



Р и с. 170. Форма углублений и выступов на поверхности разрезающих гребней:

*a* — при вырубке; *b* — при наварке

делают насечки. Размеры насечек должны быть такими, чтобы они не образовали на раскате дефектов в виде плен и закатов. Рекомендуется выдерживать соотношение между глубиной и шириной углублений (канавок), создаваемых вырубкой (рис. 170)

$$\frac{h}{b} = \frac{1}{4} \div \frac{1}{6}.$$

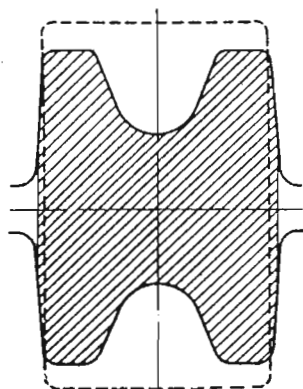
Форма разрезного калибра в большинстве случаев определяется условиями, для которых он предназначен. Так, если в разрезной калибр задают прямоугольную заготовку, то гребень делают сравнительно острым. Если в разрезной калибр задают фасонную (разрезную) заготовку, то гребень предусматривают притупленным и даже несколько плоским, что наиболее приемлемо и осуществляется на рельсобалочных станах.

Радиусы закруглений в разрезных калибрах принимают конструктивно с учетом наиболее благоприятного формоизменения раската с образованием фланцев. Трудно рекомендовать какие-либо конкретные правила построения разрезных калибров для всех случаев прокатки. Как правило, форма их и основные размеры определяются калибровкой.

По конструкции разрезные калибры могут быть двух типов: 1) с разъемом валков вне очертания калибра (подобно обычным балочным калибрам); 2) с разъемом валков посередине общей высоты калибра (рис. 171).

Разрезные калибры второго типа применяют на блюмингах и на станах, прокатывающих разрезную заготовку для рельсобалочных станков. Особенности таких калибров являются значительный выпуск боковых стенок калибра и возможность прокатки разрезных заготовок, различных по ширине. Так как в этих калибрах все фланцы закрытые, то в этом случае приходится конструировать последние с увеличенной шириной с учетом того, что металл лучше будет заполнять калибр и, следовательно, лучше будут выполняться фланцы. Как правило, такие

Р и с. 171. Форма разрезного калибра с разъемом посредине калибра



калибры являются по-существу подготовительными для прокатки в первом разрезном калибре обычной системы калибровки двутавровой балки.

#### *Уширение в разрезном калибре и определение ширины заготовки*

Уширение в разрезном калибре зависит от угла верхнего и нижнего разрезающих гребней. Чем больше угол гребня, тем в большей степени происходит «разгон» металла в ширину.

Уширение практически принимают в пределах

$$\Delta b_{\text{разр}} = 5 \div 10 \text{ мм.}$$

Тогда ширина исходной заготовки

$$B_{\text{заг}} = B_{\text{разр.кал}} - (5 \div 10 \text{ мм}).$$

Большое уширение для разрезного калибра нецелесообразно принимать, так как в этом случае ухудшаются условия формирования фланцев, особенно закрытых. Поперечное течение металла при большом уширении в сочетании с внеконтактной деформацией металла увеличивает утяжку закрытых и открытых фланцев по высоте.

#### *Размеры исходной заготовки*

Аналитическое определение размеров исходной заготовки, наиболее приемлемое для практических расчетов, принадлежит М. С. Мутьеву, А. П. Чекмареву и Б. П. Бахтинову. При выводе уравнения эти авторы учитывали неравномерную деформацию металла и, как следствие ее, утяжку заготовки по высоте при заполнении первого разрезного калибра. М. С. Мутьев рекомендует следующее уравнение для определения высоты прямоугольной заготовки, задаваемой в первый разрезной калибр (рис. 172):

$$H_0 = \left( 0,65 + 0,35 \frac{B_0 H_p}{F_p} \right) H_p, \quad (124)$$

где

$H_0$  — искомая высота прямоугольной заготовки;

$B_0$  — ширина заготовки;

$H_p$  — высота разрезного калибра;

$F_p$  — площадь разрезного калибра.

Уравнение А. П. Чекмарева имеет следующий вид:

$$H_0 = \frac{H_p^2 B_0}{F_p}. \quad (125)$$

Уравнения Б. П. Бахтинова выведены с учетом формы разрезающих гребней калибра:

для калибров с острыми гребнями

$$H_0 = \frac{2}{3} \frac{F_{p.g}}{B_{cp}} + H_p, \quad (126)$$

где

$$B_{cp} = \frac{B_0 + B_p}{2},$$

$F_{p.g}$  — площадь поперечного сечения разрезающих гребней калибра;

$B_p$  — ширина разрезного калибра,

для калибров со значительным притуплением гребней

$$H_0 = \frac{\left(2 + \frac{B_p - 2b}{B_p - 2a}\right) F_{p.g}}{3B_{cp}} + H_p, \quad (127)$$

где

$a$  — толщина фланца разрезного калибра на конце;

$b$  — толщина фланца разрезного калибра у основания.

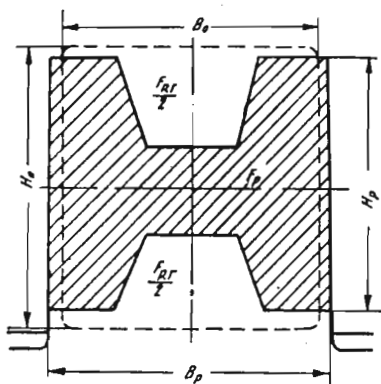


Рис. 172. Схема к определению размеров прямоугольной заготовки

В случае несимметричных калибров, что бывает чаще, величины  $a$  и  $b$  определяют как средние между размерами верхних (индекс «в») и нижних (индекс «н») фланцев:

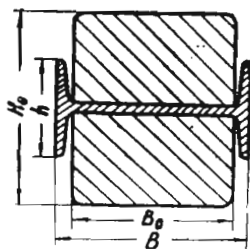
$$a = \frac{a_v + a_n}{2}; \quad b = \frac{b_v + b_n}{2}.$$

Наиболее близкие к практическим данным результаты получаются при определении высоты исходной заготовки по методу М. С. Мутьева.

Имеется следующая ориентировочная зависимость между высотой прямоугольной заготовки, задаваемой в разрезной калибр, и размером чистового профиля (рис. 173):

$$H_0 = (2,0 \div 2,2) h.$$

Р и с. 173. Заготовка для двутавровой балки ( $H_0 \approx 2h$ )



### 3. Расчет калибровки двутавровых балок по коэффициентам деформации

Метод расчета калибровки балок по коэффициентам деформации заключается в следующем.

Исходя из теоретических и практических данных (см. рис. 158—162) принимают коэффициенты деформации по элементам профиля. В соответствии со значениями принятых коэффициентов строят график изменения их по проходам.

Определяют размеры чистового профиля с учетом температурной усадки. При этом среднюю толщину полков  $t$  можно принимать по ГОСТу на профиль (без учета температуры), так как в процессе прокатки фланцы в калибрах быстро изнашиваются и происходит утолщение фланцев профиля.

Определяют высоту фланцев

$$h = \frac{H - d}{2}.$$

Определяют размеры фланцев на конце и у основания по системе уравнений:

$$\begin{cases} a + b = 2t; \\ b - a = kh; \end{cases}$$

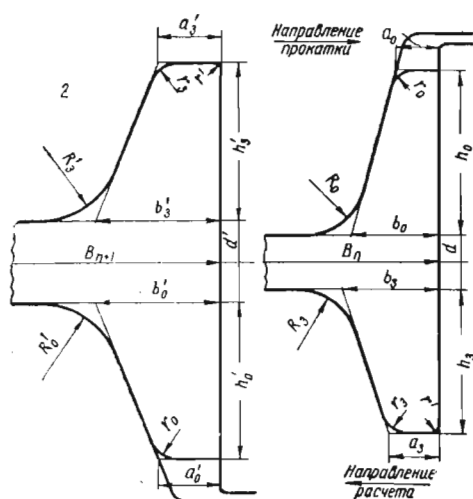
где  $a$  — толщина фланца на конце;  
 $b$  — толщина фланца у основания;  
 $t$  — средняя толщина полки;  
 $h$  — высота фланца;  
 $k$  — уклон внутренней стороны фланца.

Определяют коэффициенты для расчета радиусов закруглений.

Предварительно намечают величины приращения и утяжки фланцев согласно рекомендациям, приведенным выше.

Принимают общее число фасонных калибров в соответствии с размерами профиля по уравнению (114) и данными на стр. 228.

Определяют уширение по проходам с учетом марки прокатываемой стали, площади сечения, коэффициенты вытяжки по проходам и другие величины.



Р и с. 174. Построение калибров и обозначение элементов при методе расчета калибровки по коэффициентам деформации

Как правило, коэффициент деформации открытого фланца на конце принимают больше, чем у основания ( $\eta_o^a > \eta_o^b$ ), а закрытого фланца — наоборот ( $\eta_3^b > \eta_3^a$ ). Коэффициент деформации стенки профиля  $\eta_c$  принимают несколько меньше коэффициента деформации у основания открытого фланца ( $\eta_c < \eta_o^b$ ). Однако в связи с более четким оформлением стенки в первых черновых калибрах коэффициент деформации стенки может быть равен и даже быть больше коэффициента деформации фланца на конце ( $\eta_o^a < \eta_c$ ) в зависимости от сечения исходной заготовки, задаваемой в первый разрезной калибр.

Выбор коэффициентов деформации элементов профиля зависит от многих факторов: типа стана, размеров и формы сечения исходной заготовки, температурного и скоростного режимов прокатки. Поэтому очень трудно рекомендовать абсолютные величины коэффициентов деформации для отдельных станов. Можно лишь говорить об общей закономерности распределения коэффициентов деформации по элементам калибра. Так, если на стан подают разрезную заготовку с вполне оформленной стенкой, то в первых черновых калибрах по ходу прокатки не обязательно коэффициент деформации стенки должен быть больше коэффициента деформации открытого фланца на конце.

Коэффициенты деформации, исходя из конкретных условий, принимают по соответствующим элементам калибра (рис. 174) и формулам (110) — (113). Расчет ведут против хода прокатки.

Коэффициент деформации стенки

$$\eta_c = \frac{d'}{d}.$$

Высоту открытого  $h_o$  и закрытого  $h_3$  фланцев в каждом калибре определяют в зависимости от чередования разъема калибра и соответственно по величинам приращения  $\Delta h_o = h_o - h_3'$  или утяжки  $\Delta h_3 = h_o' - h_3$  фланцев. Приращение и утяжку фланцев принимают по данным табл. 14.

Уширение определяют по уравнению (115) с учетом марки прокатываемой стали.

Радиусы закруглений:

наружные для первых четырех-шести калибров

$$R_o = C_o^b b_o, \quad R_3 = C_3^b b_3;$$

наружные для черновых калибров

$$R_o = (0,8 \div 0,9) C_o^b b_o, \quad R_3 = (0,8 \div 0,9) C_3^b b_3;$$

внутренние для всех калибров

$$r_o = C_o^a a_o, \quad r_3 = C_3^a a_3,$$

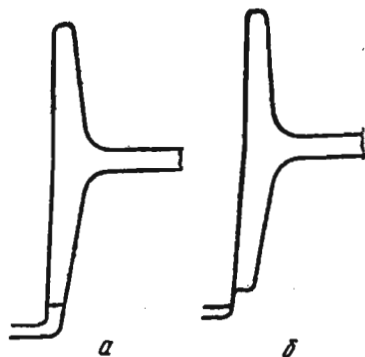
где

$$C_3^b = C_o^b = \frac{R_{\text{чист}}}{b_{\text{чист}}}, \quad C_3^a = C_o^a = \frac{r_{\text{чист}}}{a_{\text{чист}}}.$$

Однако в черновых калибрах можно принимать радиусы  $R_o$  и  $R_3$  конструктивно, учитывая условия входа раската в калибр.

Р и с. 175. Форма открытого фланца:

$a$  — со свободным уширением;  
 $b$  — с ограничением уширения



Радиус закругления закрытого фланца  $r'$  принимают конструктивно в пределах 1—5 мм с тем, чтобы исключить концентрацию напряжений в этой части калибра. Если в открытых фланцах предусмотрено свободное уширение (рис. 175,  $a$ ), тогда радиус  $r_o$  при расчетах калибровки не определяют.

Исследования и анализ заводских калибровок показывают, что коэффициент деформации в открытом фланце на конце больше коэффициента деформации у основания и изменяется в следующих пределах:

для чистового калибра

$$\eta_o^a = (1,005 \div 1,01) \eta_o^b,$$

для остальных калибров

$$\eta_o^a = (1,04 \div 1,10) \eta_o^b.$$

Коэффициент деформации в закрытом фланце у основания больше коэффициента деформации на конце

$$\eta_3^b = (1,03 \div 1,05) \eta_3^a.$$

Коэффициенты в приведенных уравнениях возрастают в направлении от чистового калибра к черновым. Но можно принять и другой характер изменения коэффициентов. В этом случае может несколько измениться форма калибров. Учитывая, что обычно после первого опробования калибровки производят корректировку, другое распределение коэффициентов не усложнит процесс формоизменения металла в калибре.

# Расчет калибровки облегченной двутавровой балки № 14

Стандартные размеры профиля:  $d=4,9$  мм,  $h=140$  мм,  $t=7,5$  мм,  $b=83$  мм,  $R=8$  мм,  $r=3$  мм. Считаем, что балка — из высокоуглеродистой спокойной стали. Принимаем девять фасонных калибров.

Коэффициенты деформации элементов профиля по теоретическим и практическим данным приведены в табл. 16 и на рис. 176. Плавное изменение коэффициентов деформации характеризует постепенное изменение деформации металла

соответственно его пластическим свойствам.

Так как в первый по ходу прокатки фасонный калибр может задаваться прямоугольной или разрезная заготовка, то в табл. 16 и на рис. 176 не приведены коэффициенты деформации для девятого калибра.

**Чистовой калибр.** С учетом прокатки профиля по минусовым допускам чистовой калибр строим по следующим размерам:  $a_3=5$  мм,  $h_3=39,1$  мм,  $b_3=9,6$  мм,  $r=3$  мм,  $R_3=7,5$  мм,  $d=4,8$  мм,  $r'=1$  мм.

Учитывая износ валков, размеры открытого фланца принимаем:  $a_0=4,75$  мм,  $b_0=9,5$  мм,  $h_0=39,1$  мм,  $R_0=7,5$  мм.

Ширина калибра  $B=140$  мм. Выпуск открытого и закрытого фланцев калибра принимаем 1%.

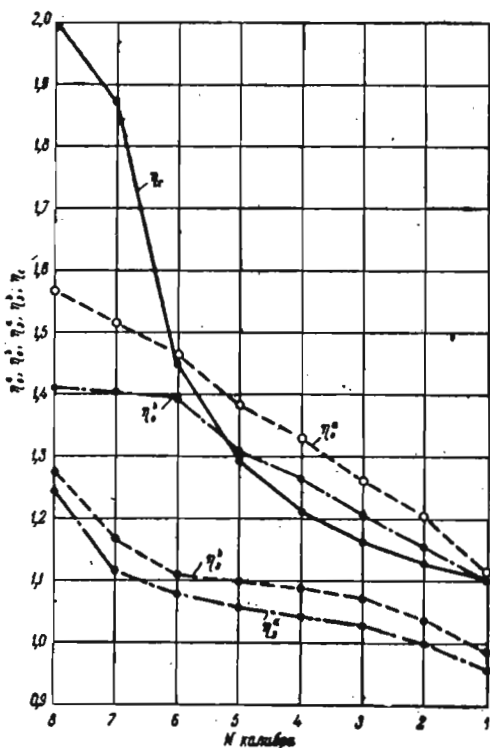


Рис. 176. Изменение коэффициентов деформации по проходам для облегченной балки № 14

Таблица 16  
Коэффициенты деформации элементов профиля двутавровой балки № 14  
(расчет против хода прокатки)

Номер калибра	$\eta_0^a$	$\eta_0^b$	$\frac{\eta_0^a}{\eta_0^b}$	$\eta_3^a$	$\eta_3^b$	$\frac{\eta_3^b}{\eta_3^a}$	$\eta_c$
1	1,115	1,105	1,008	0,96	0,99	1,03	1,105
2	1,21	1,16	1,04	1,0	1,040	1,040	1,13
3	1,265	1,21	1,045	1,032	1,075	1,04	1,165
4	1,335	1,27	1,05	1,045	1,09	1,04	1,215
5	1,385	1,31	1,055	1,06	1,1	1,04	1,295
6	1,47	1,395	1,055	1,082	1,12	1,04	1,45
7	1,52	1,405	1,08	1,12	1,170	1,045	1,875
8	1,57	1,41	1,11	1,25	1,27	1,01	2

Площадь калибра определяем без учета радиусов закругления

$$F_1 = (a_0 + b_0)h_0 + (a_3 + b_3)h_3 + Bd = \\ = (4,75 + 9,5)39,1 + (5 + 9,6) \cdot 39,1 + 140 \cdot 4,8 = 1800 \text{ мм}^2.$$

*Второй калибр.* Согласно принятым коэффициентам деформации определяем размеры элементов калибра. Если в первом (чистовом) калибре верхний фланец открытый, а нижний закрытый, то во втором — наоборот.

*Закрытый (верхний) фланец.* Размеры определяем по коэффициентам деформации в открытом фланце предыдущего калибра:  $a'_{32} = \eta_{01}^a \cdot a_{01} = 1,115 \cdot 4,75 = 5,3 \text{ мм}$ ;  $b'_{32} = \eta_{01}^b \cdot b_{01} = 1,105 \cdot 9,5 = 10,5 \text{ мм}$ .

Принимаем приращение высоты открытого фланца предыдущего калибра  $\Delta h_{01} = 0,1 \text{ мм}$ . Тогда высота закрытого фланца второго калибра

$$h'_{32} = h_{01} - \Delta h_{01} = 39,1 - 0,1 = 39 \text{ мм}.$$

Радиус закругления у основания фланца

$$R_{32} = C_3^b b'_{32} = 0,79 \cdot 10,5 \approx 8,5 \text{ мм},$$

где

$$C_3^b = \frac{R_1}{b_1} = \frac{7,5}{9,5} = 0,79.$$

Радиус закругления на конце фланца

$$r_{32} = C_3^a a'_{32} = 0,6 \cdot 5,3 \approx 3 \text{ мм},$$

где

$$C_3^a = \frac{r_1}{a_1} = \frac{3}{5} = 0,6.$$

Радиус очертания наружного угла на конце закрытого фланца принимаем  $r'_3 = 1 \text{ мм}$ ; уклон закрытого фланца 2%.

*Открытый фланец.* Размеры открытого фланца определяем по коэффициентам деформации закрытого фланца предыдущего калибра:

$$a'_{02} = \eta_{31}^a \cdot a_{31} = 0,96 \cdot 5 = 4,8 \text{ мм};$$

$$b'_{02} = \eta_{31}^b \cdot b_{31} = 0,99 \cdot 9,6 = 9,5 \text{ мм}.$$

Принимаем утяжку фланца в чистовом (первом) калибре примерно 4,9 мм, тогда высота фланца во втором калибре

$$h'_{02} = h_{31} + \Delta h_{31} = 39,1 + 4,9 = 44 \text{ мм}.$$

Радиус закругления у основания фланца одинаков с ранее найденным

$$R_{02} = R_{32} = 8,5 \text{ мм}.$$

Уклон открытого фланца принимаем 5%.

Уширение в первом калибре с учетом марки стали

$$\Delta b_1 = C + \frac{n-1}{2} = 1 + \frac{1-1}{2} = 1 \text{ мм}.$$

Тогда ширина второго калибра

$$B_2 = B_1 - \Delta b_1 = 140 - 1 = 139 \text{ мм}.$$

*Стенка.* Толщина стенки

$$d_2 = \eta_c d_1 = 1,105 \cdot 4,8 = 5,3 \text{ мм}.$$

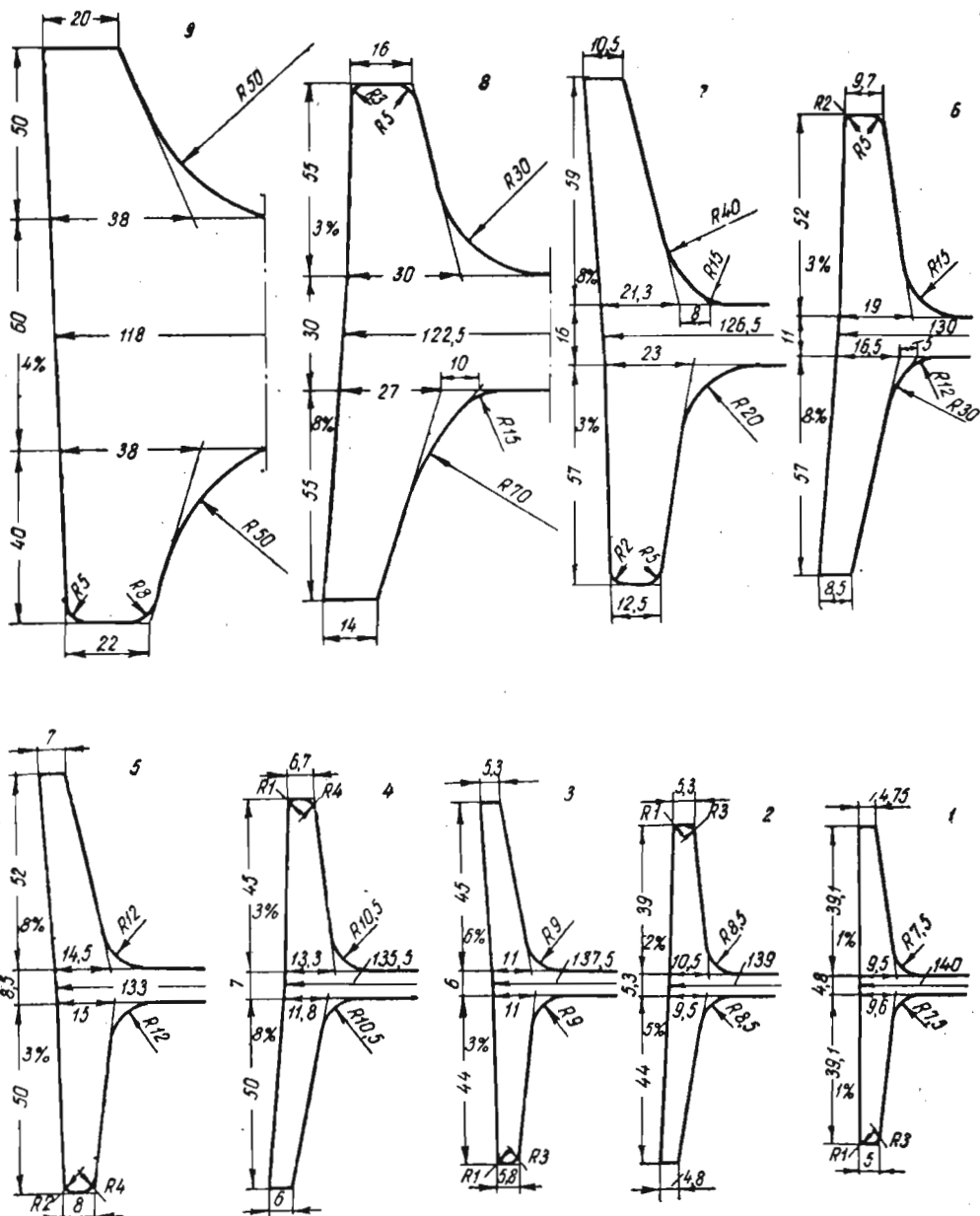


Рис. 177. Калибровка обгелченной двутавровой балки № 14:  
1—9 — номера калибров

Площадь профиля (калибра)

$$F_2 = (b'_{o2} + a'_{o2}) h'_{o2} + (a'_{32} + b'_{32}) h'_{32} + B_2 d_2 = \\ = (4,8 + 9,5) 44 + (10,5 + 5,3) 39 + 139 \cdot 5,3 = 1985 \text{ мм}^2.$$

Коэффициент вытяжки в первом калибре

$$\mu_1 = \frac{F_2}{F_1} = \frac{1985}{1800} = 1,1.$$

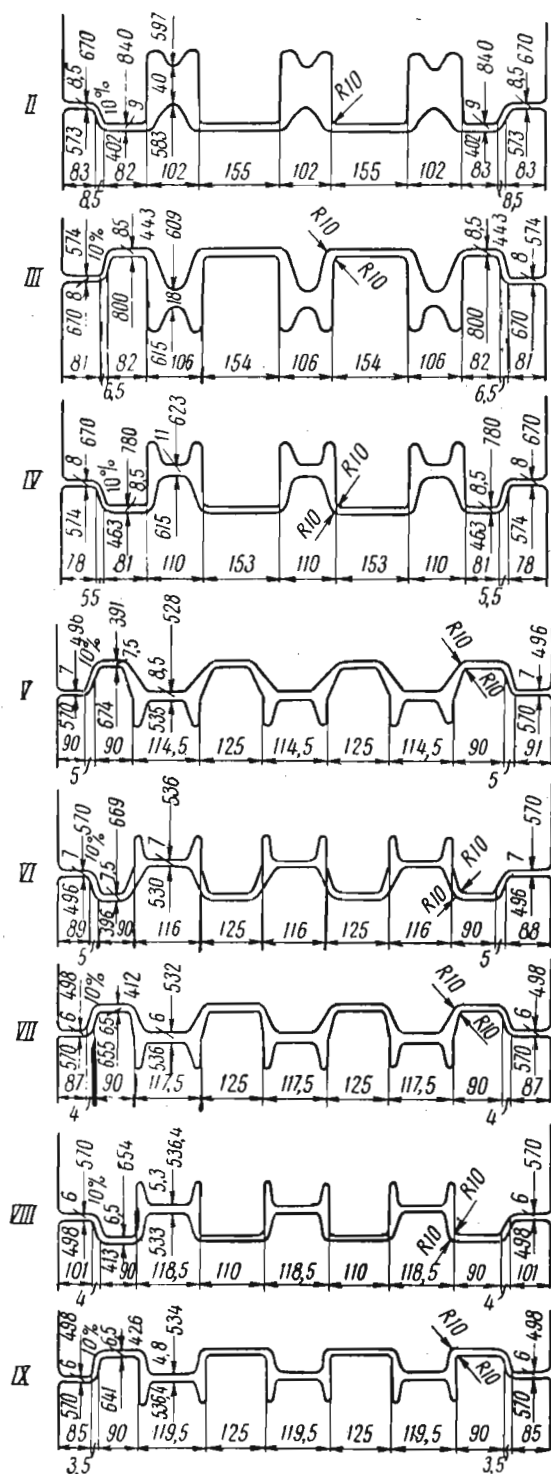


Рис. 178. Калибровка валков стана 500 для прокатки двуглавой балки № 12:

II—IХ — номера клетей; II—IВ —  $D_0=630$  мм; V—IХ —  $D_0=540$  мм

Номер калибра	Площадь калибра $F$ , мм <sup>2</sup>	Ширина калибра $B$ , мм	Коэффициент вытяжки, $\mu$	Уширение $\Delta b$ , мм	Открытый фланец			
					$\eta_o^a$	$\eta_o^b$	$a_o$ , мм	$b_o$ , мм
1	1800	140	1,1	1,0	1,115	1,105	4,75	9,5
2	1985	139	1,158	1,5	1,21	1,16	4,8	9,5
3	2300	137,5	1,19	2	1,265	1,21	5,3	11
4	2740	135,5	1,24	2,5	1,335	1,27	6	11,8
5	3395	133,0	1,275	3	1,385	1,31	7	14,5
6	4345	130,0	1,365	3,5	1,47	1,395	8,5	16,5
7	5925	126,5	1,445	4,0	1,52	1,405	10,5	21,3
8	8560	122,5	1,445	4,5	1,57	1,41	14	27
9	12 380	118	—	—	—	—	20	38

По найденным размерам вычерчиваем второй калибр.

Расчет последующих калибров производим аналогично. Все расчетные данные сведены в табл. 17. Калибровка облегченной балки № 14 показана на рис. 177. Расчет размеров исходной заготовки может быть осуществлен по ранее приведенной методике.

Практически расчет калибровки двутавровой балки сводится к составлению таблицы, аналогичной табл. 17, в которую вносят все основные размеры профиля.

Для того чтобы иметь подтверждение правильного выбора коэффициентов деформации, рекомендуется вначале построить график распределения этих коэффициентов. При необходимости эти коэффициенты можно скорректировать, а затем по ним определять соответствующие размеры элементов профиля.

Методика расчета калибровки сравнительно проста и дает положительные результаты.

Для ознакомления с другими применяемыми на практике методами расчета калибровки двутавровых балок можно использовать специальную литературу.

#### 4. Расположение калибров на валках

При расточке валков их ручки составляют контур двутавровой балки, причем один из ручьев составляет большую часть контура балки. Такой неодинаковый по глубине врез ручьев обуславливает начальный диаметр валков и технологическое назначение каждого валка в отдельности. Валок, имеющий врез большей части контура калибра, называют «закрытым», а второй валок — «открытым». На рис. 178 показано расположение калибров на валках для прокатки двутавровой балки № 12.

При большей глубине вреза ручья в валок, чтобы не уменьшить его прочность, требуется иметь больший диаметр бочки. Следовательно, закрытый валок почти всегда имеет диаметр бочки больше диаметра бочки открытого валка. Соотношение размеров диаметров бочки валков определяется принятым номинальным диаметром валков.

Номинальный диаметр валков  $D_0$  принимают конструктивно. При совмещении нейтральной линии калибра со средней линией валков по

облегченной двутавровой балки № 14

$h_0$ , мм	$\Delta h_0$ , мм	$R_0$ , мм	Закрытый фланец							Стенка	
			$\eta_a$	$\eta_b$	$a_3$ , мм	$b_3$ , мм	$h_3$ , мм	$\Delta h_3$ , мм	$R_3$ , мм	$\eta_c$	$d$ , мм
39,1	+0,1	7,5	0,96	0,99	5	9,6	39,1	-4,9	7,5	1,105	4,8
44	—	8,5	1,0	1,04	5,3	10,5	39,0	-6	8,5	1,13	5,3
45	—	9	1,032	1,075	5,8	11	44	-6	9,0	1,165	6
50	—	10,5	1,045	1,09	6,7	13,3	45	-7	10,5	1,215	7
52	—	12	1,06	1,1	8	15	50	-7	12	1,295	8,5
57	—	12	1,082	1,12	9,7	19	52	-7	15	1,45	11
59	+4,0	15	1,12	1,17	12,5	23	57	+2,0	20	1,875	16
55	+15	15	1,25	1,27	16	30	55	+5	30	2	30
50	—	50	—	—	22	38	40	—	50	—	60

полученному диаметру верхнего валка в любой точке можно определить диаметр нижнего валка:

$$D_n = 2D_0 - (D_v + 2f).$$

Распределение калибров по клетям и размеры буртов обуславливаются схемой прокатки и конкретными условиями данного стана.

При врезе калибров в валки весьма существенным является и рациональное использование длины бочки. Это учитывается при определении формы и размеров буртов.

При врезе ручья двутавровой балки (рис. 179) в бочку валка ширина буртов между ручьями  $L_1$  и крайних  $L_2$  может быть различной. Неправильное определение размеров этих буртов приводит к их изломам по сечению  $СК$  (для промежуточного бурта) или по  $AB$  (для крайнего бурта).

По исследованиям В. П. Северденко, боковое удельное давление возрастает от закрытого фланца к открытому и наибольшим бывает на конце открытого фланца. Пренебрегая местным увеличением удельного давления против стенки профиля, принимаем прямолинейное возраста-

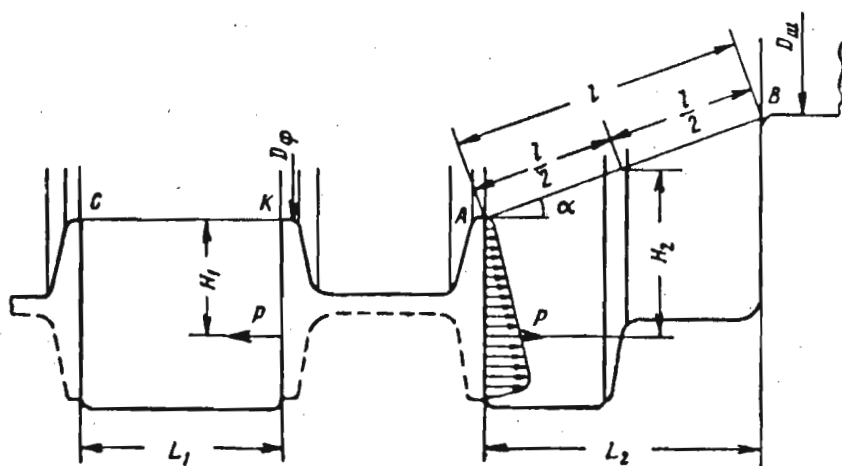


Рис. 179. Схема действующих сил к определению размеров промежуточных и крайних буртов валков, исходя из условия их равнопрочности

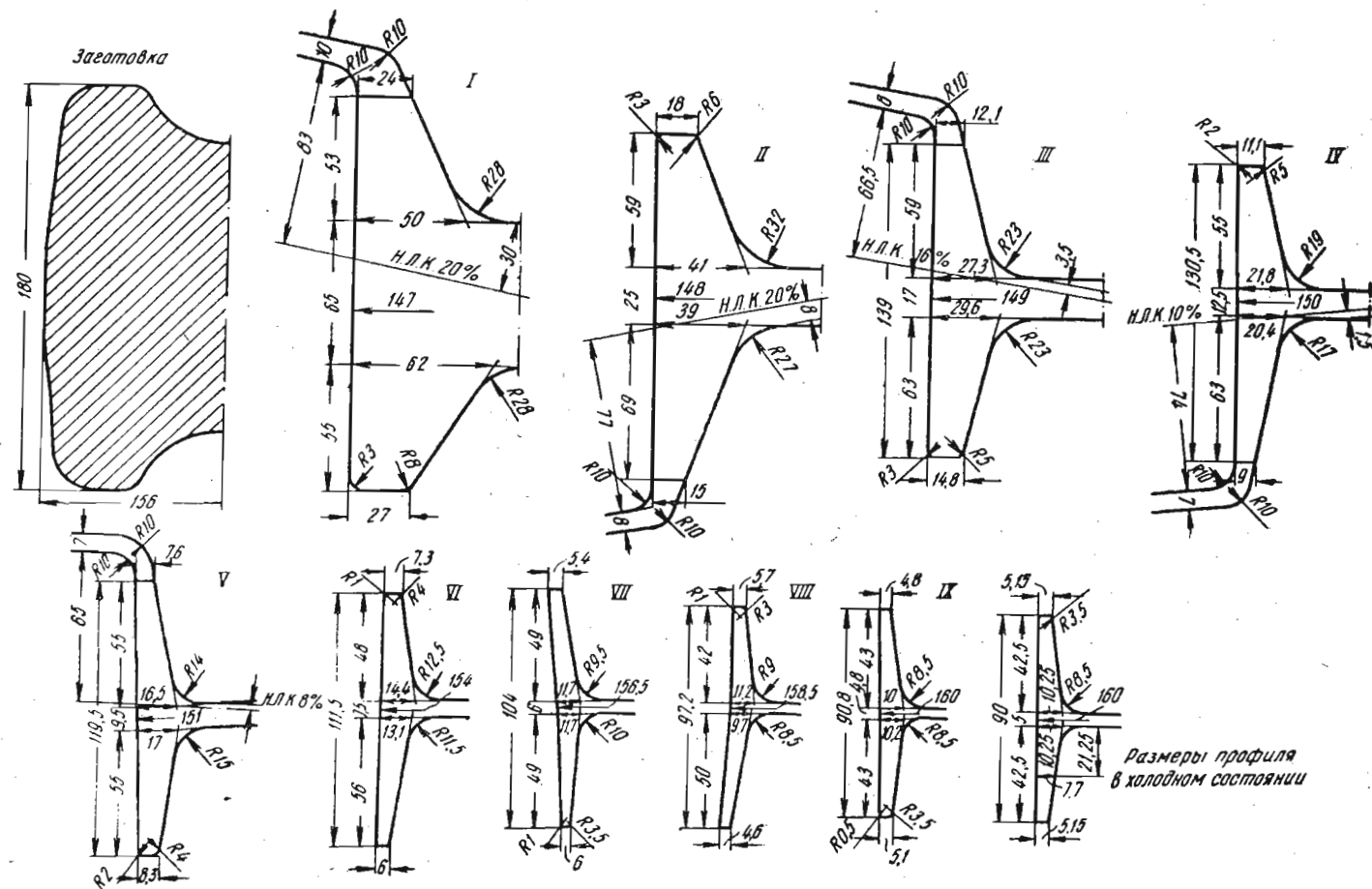


Рис. 180. Прокатка двутавровой балки № 16 в косорасположенных калибрах (стан 500):  
I—IX — номера клеток

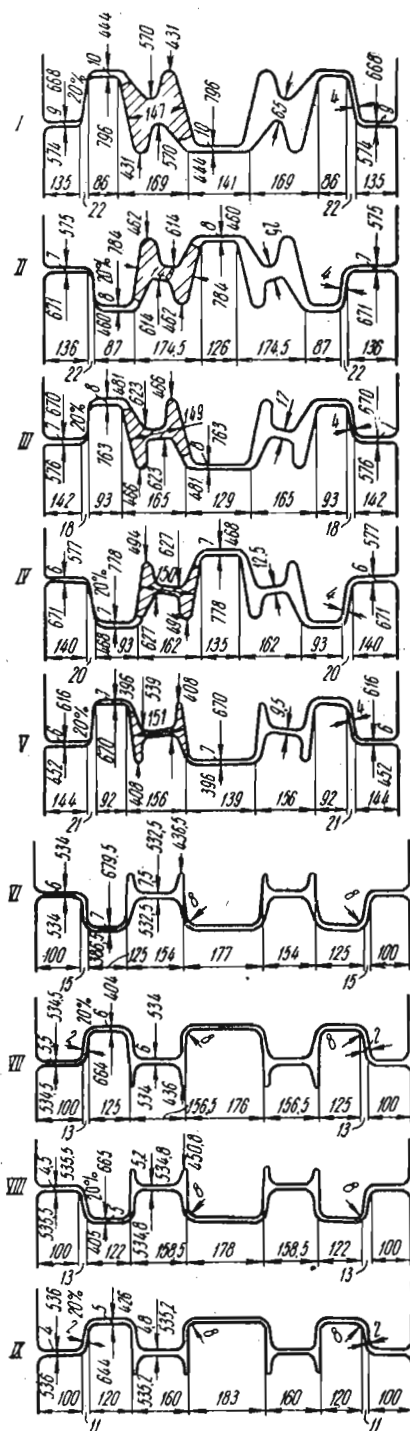
ние удельных давлений. Эпюра удельных давлений на рис. 179 изображена только на одной стороне фланцев. Приведенный характер распределения удельных давлений позволяет произвести расчет ширины крайнего и промежуточного буртов, исходя из условия их равнопрочности.

**Диаметр бурта по открытому фланцу.** В настоящее время балочный калибр строят обычно со свободным уширением металла в открытом фланце (см. рис. 175). В этом случае не возникает опасений переполнения фланцев, образования заусенцев и появления поверхностных дефектов в виде заката. При таком построении калибра следует определить увеличение диаметра валька по открытому фланцу.

Исходя из условий деформации металла в открытых фланцах, рекомендуется для черновых и промежуточных калибров увеличивать высоту открытого фланца при врезе в валки на 20—25 мм. Следовательно, диаметр по бурту со стороны открытого фланца должен быть увеличен вдвое, что составит 40—50 мм. Для валков с предчистовыми и чистовыми калибрами эта величина может быть уменьшена против рекомендуемой на 20—25%. Примерно такая величина принята при врезе калибров в валки для балки № 12 (см. рис. 178). Чрезмерно увеличивать диаметр буртов по открытым фланцам не рекомендуется, так как это уменьшает их прочность.

## 5. Прокатка балок в косорасположенных калибрах

Метод расчета калибровки двутавровой балки при прокатке ее в косорасположенных калибрах остается таким же, как и при обычной прокатке. Различие сводится лишь к построению калибра (рис. 180 и 181): открытые и закрытые фланцы в этом случае расположены в калибрах по диагонали. Поэтому калиб-



Р и с. 181. Калибровка валков для прокатки балки № 16 с косорасположенными калибрами:

$I-IX$  — номера клеток

ровку двутавровой балки в косорасположенных калибрах иногда называют диагональной. Угол поворота оси калибра к горизонтальной оси валков принимают до  $15-20^\circ$ .

Особенности прокатки двутавровой балки в косорасположенных калибрах следующие.

1. Создание условий всестороннего обжатия металла, что улучшает качество готового профиля.

2. Уменьшение трения металла в открытых и особенно в закрытых фланцах; при этом увеличивается стойкость калибра, сокращается число перевалок и переходов на новые калибры. Следовательно, увеличивается производительность стана.

3. Не требуются большие выпуски по открытым фланцам. Калибры можно конструировать совсем без выпуска, так как поворот калибра на определенный угол создает условия свободного выхода полосы из закрытого фланца.

4. Большой уклон открытого фланца при косорасположенном калибре позволяет применять более высокие обжатия, благодаря чему можно сократить число проходов в фасонных калибрах.

Из главных недостатков этого способа прокатки, затрудняющих его применение, следует отметить глубокий врез ручьев в валки и особенно возникновение осевых сил, которые стремятся сдвинуть валки друг относительно друга. Для предотвращения сдвига валков при прокатке на них делают упорные конусы, которые притирают «на масло» (см. рис. 181), однако неудобства от осевых усилий остаются значительными.

Способ прокатки двутавровой балки в косорасположенных калибрах применяют в том случае, когда по условиям производства нет возможности получить исходную заготовку требуемых размеров.

## 6. Калибровка балок с параллельными полками

При прокатке двутавровых балок больших размеров (с непараллельными полками) наблюдается большая разность окружных скоростей по стенке и фланцам. Соответственно скоростным условиям деформации возникает большая неравномерность распределения напряжений по элементам профиля, в связи с чем ограничен верхний предел размеров двутавровых балок. Однако для строительных целей требуются профили двутавровых балок с большими размерами, чем предусмотренные ГОСТ 8239—56.

Балки больших размеров с непараллельными полками в настоящее время прокатывают на рельсобалочных станах. Но и на этих станах прокатывают балки предельного размера № 70, полки которых имеют ширину 210 мм. Прокатывать на рельсобалочных станах балки больших размеров по силовым, скоростным и другим специфическим условиям формоизменения невозможно. Прокатка балок с параллельными полками высотой до 1000 мм и шириной полков более 400 мм производится на универсальных балочных станах.

Расчет калибровки двутавровых балок с параллельными полками определяется особенностями технологического процесса прокатки и состоит из следующих расчетов: а) подготовительных фасонных сечений при прокатке на блюминге; б) калибровки черновых клетей; в) калибровки чистовой группы клетей.

Прокатка широкополочных балок с параллельными полками из фасонной заготовки, полученной с блюминга, осуществляется в главных универсальных клетях при одновременном обжатии стенки и полков по

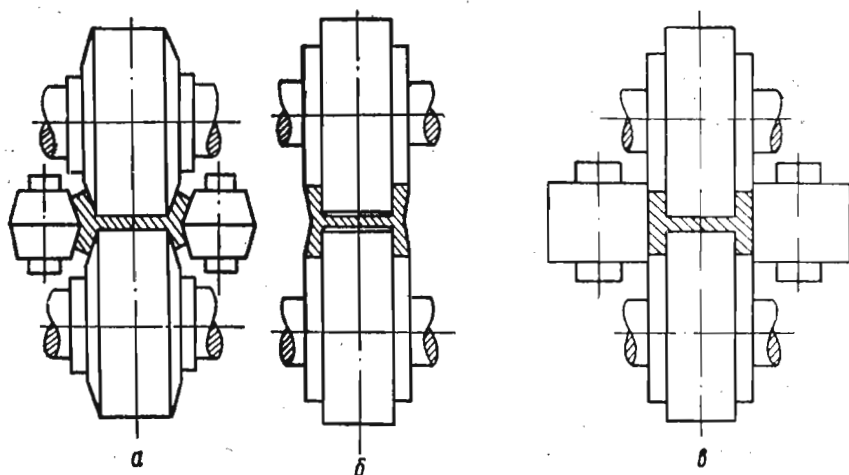


Рис. 182. Схема прокатки двутавровой балки с параллельными полками

толщине (рис. 182, а), во вспомогательных клетях, где производится обжатие полок по высоте (рис. 182, б) и в чистой универсальной клетке (рис. 182, в).

В качестве примера рассмотрим схему расчета калибровки балки № 40Т.

### *Прокатка на блюминге*

Для этих балок отливают слитки специальной формы с примерным очертанием будущих фланцев и стенки. Конфигурация элементов слитка отвечает калибровке профиля и расчетным величинам обжатий на блюминге. Режимы обжатий на блюминге устанавливают, исходя из мощности электродвигателя и прочности валков. Число проходов определяют в зависимости от начальных и конечных толщин стенки, а также обжатий в принятой схеме прокатки слитка.

Схему обжатий слитка принимают следующей. Вначале дают два прохода с небольшими обжатиями по высоте стенки, чтобы скорректировать размер слитка в соответствии с общей шириной первого фасонного калибра. При этом удаляется окалина с поверхности слитка и ликвидируется полученный в изложнице выпуск на фланцах, который может служить причиной неудовлетворительного заполнения металлом фланцев калибра в валках блюминга.

Ширина слитка по сравнению с общей высотой готового профиля примерно составляет

$$B_{\text{сл}} = (2 \div 2,2) H_{\text{проф.}}$$

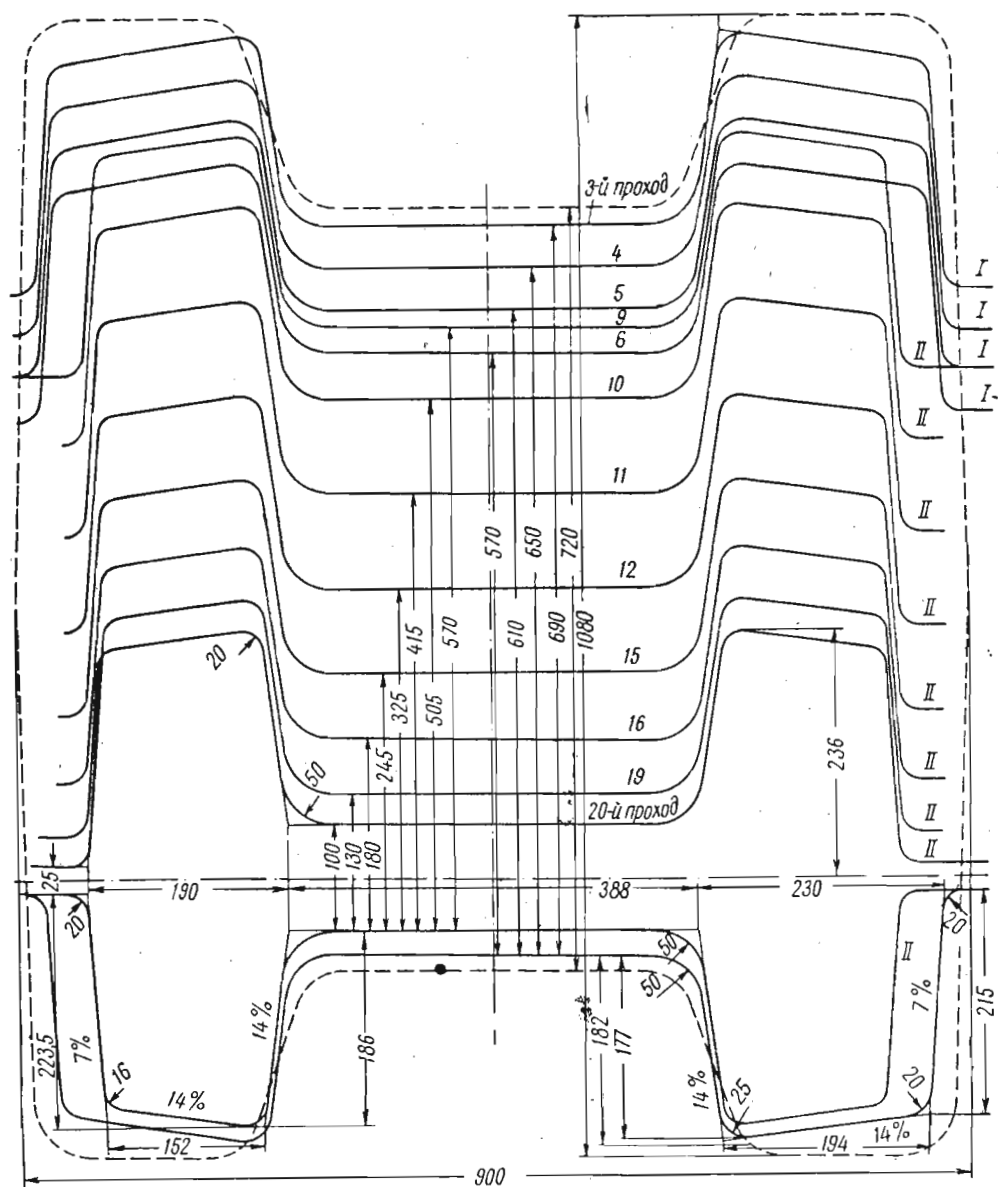
Первые два прохода при небольших обжатиях осуществляют в ящичном калибре, по существу на валках с гладкой бочкой. После этого дальнейшую деформацию слитка производят в первом фасонном калибре. Абсолютное обжатие в каждом проходе первого фасонного калибра принимают небольшим (30—50 мм), чтобы обеспечить формирование фланцев.

В первом фасонном калибре осуществляют примерно четыре прохода, которых достаточно для получения раската промежуточного сечения в соответствии с размерами калибра. Далее соответствующим обжатием производят корректировку ширины раската перед подачей его во вто-

рой фасонный калибр, из которого двутавровую заготовку подают непосредственно на балочный стан.

Обжатия во втором фасонном калибре принимают такими, чтобы они ограничивались лишь мощностью электродвигателя и условиями захвата. Только в последних двух проходах используют сравнительно небольшие обжатия, так как они определяют точность размеров фасонной заготовки, получаемой на блюминге. Таким образом, валки блюминга должны иметь один ящичный калибр и два двутавровых калибра с различными размерами фланцев.

На рис. 183 приведены размеры обоих фасонных калибров и схема обжатий по стенке и фланцам. Внутренний уклон фланцев в обоих ка-



Р и с. 183. Схема обжатий слитка в фасонных калибрах I и II на блюминге и размеры этих калибров

либрах составляет 14%, наружный 7%; уклон на конце фланцев (по дну) принимается равным внутреннему уклону фланцев. Уширение при расчете ширины профиля принято таким же, как при прокатке прямоугольного слитка. Режимы обжатий слитка на блюминге и раската двутаврового сечения в клетях балочного стана можно найти в специальной литературе.

### *Прокатка в черновой группе клетей*

Черновая группа клетей состоит из вспомогательной и главной универсальной клетей. Обжатие полок (фланцев) и стенки профиля осуществляют в универсальной клети одновременно горизонтальными и вертикальными валками. При этом необходимо строго соблюдать условие равенства вытяжек фланцев и стенки. Это — основное положение калибровки, отклонение от которого вызовет нежелательные явления при прокатке. Разность вытяжек элементов профиля, помимо перемещения металла из одной части профиля в другую, будет вызывать появление дополнительных напряжений в металле. С учетом того, что при прокатке в универсальной клети ширина стенки и ширина полок изменяются незначительно, т. е.  $B_1=B_2$  и  $h_1=h_2$ , можно записать

$$\frac{d_1}{d_2} = \frac{t_1}{t_2} = \mu.$$

Тогда

$$\frac{t_1}{d_1} = \frac{t_2}{d_2} = \text{const.}$$

Данное условие должно соблюдаться в каждом проходе:

$$\frac{t_1}{d_1} = \frac{t_2}{d_2} = \frac{t_3}{d_3} = \dots = \frac{t_n}{d_n} = \text{const.}$$

В связи с тем, что

$$d_1 = d_2 + \Delta d \text{ и } t_1 = t_2 + \Delta t,$$

имеем

$$\frac{t_2 + \Delta t}{d_2 + \Delta d} = \frac{t_1 - \Delta t}{d_1 - \Delta d}.$$

или

$$\frac{\Delta t}{\Delta d} = \frac{t_1}{d_1} = \frac{t_2}{d_2} = \frac{t_n}{d_n} = \text{const.} \quad (128)$$

Следовательно, взяв для какого-либо прохода абсолютное обжатие стенки, можно определить обжатие полок.

При прокатке на балочном стане готовый профиль балки № 40Т получают за 15 проходов.

Первый проход (калибр) в универсальной клети

С блюминга поступает раскат двутаврового сечения с толщинами стенки  $d=100$  мм и фланцев  $t=190$  мм. Отношение

$$\frac{t}{d} = \frac{190}{100} = 1,9.$$

Из толщин фланцев и стенки готового профиля (см. ГОСТ 6183—52) следует, что необходимо несколько изменить это отношение таким обра-

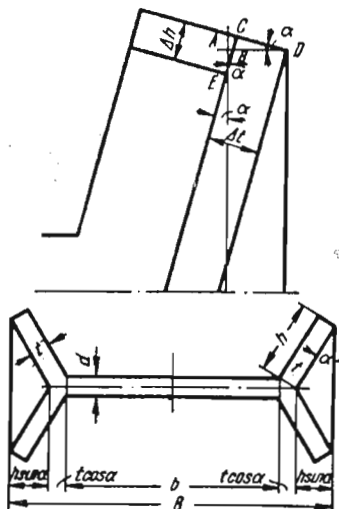


Рис. 184. Схема к выводу уравнения для определения ширины калибра

зом, чтобы толщина полок при обжатиях уменьшилась по сравнению с толщиной стенки.

Принимаем  $\frac{t}{d} = 1,72$ . При этом в первом проходе абсолютное обжатие по стенке принимаем равным  $\Delta d_1 = 3$  мм, тогда

$$d_1 = d - \Delta d_1 = 100 - 3 = 97 \text{ мм.}$$

Толщину фланцев определяем из отношения  $\frac{t}{d} = 1,72$ , откуда

$$t_1 = d_1 \cdot 1,72 = 97 \cdot 1,72 = 167 \text{ мм.}$$

Обжатие по толщине фланцев

$$\Delta t_1 = t - t_1 = 190 - 167 = 23 \text{ мм*}.$$

Общую ширину калибра в первом проходе определяем графическим построением, так как деформация по толщине фланцев не приводит к полному формированию фланцев.

Во всех остальных проходах, где обжатие производится по всей высоте фланца, общую ширину калибра (рис. 184) определяем по уравнению

$$B = b + 2(t \cos \alpha + h \sin \alpha). \quad (129)$$

По рис. 184 одностороннее уменьшение ширины составит

$$AD = AB + BD = \frac{0,5 (\Delta h - \Delta t \operatorname{tg} \alpha) \sin 2\alpha + \Delta t}{\cos \alpha},$$

где

$$AB = BE \sin \alpha = (\Delta h - \Delta t \operatorname{tg} \alpha) \sin \alpha,$$

$$BD = \frac{\Delta t}{\cos \alpha}.$$

Уменьшение ширины по обеим полкам

$$2AD = \frac{2\Delta t + (\Delta h - \Delta t \operatorname{tg} \alpha) \sin 2\alpha}{\cos \alpha}.$$

\* Равенство (128) не соблюдается в первом проходе из-за корректировки размеров.

Тогда окончательно ширина каждого последующего калибра (по ходу прокатки)

$$B_n = B_{n-1} - \frac{2\Delta t_n + (\Delta h_n - \Delta t_n \operatorname{tg} \alpha) \sin 2\alpha}{\cos \alpha},$$

где  $\alpha$  — угол наклона полки;

$n$  — номер прохода.

Например, известны следующие величины калибра для конечного профиля, выходящего из черновой группы клетей для последующей прокатки:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \alpha &= 0,14; & \alpha &= 8^\circ; & \sin 8^\circ &= 0,139; & \cos 8^\circ &= 0,99; \\ \sin 16^\circ &= 0,275; & t_n &= 34 \text{ мм}; & \Delta t_n &= 7 \text{ мм}; & \Delta h_n &= 2 \text{ мм}; \\ b_n &= 388 \text{ мм}; & h_n &= 206 \text{ мм}. \end{aligned}$$

Тогда по уравнению (129)

$$B_n = B_{\text{общ}} = 388 + 2(34 \cdot 0,99 + 206 \cdot 0,139) = 512,7 \text{ мм}.$$

Ширина предыдущего калибра

$$\begin{aligned} B_{n-1} &= B_n + \frac{2\Delta t_n + (\Delta h_n - \Delta t_n \operatorname{tg} \alpha) \sin 2\alpha}{\cos \alpha} = 512,7 + \\ &+ \frac{2 \cdot 7 + (2 - 0,14 \cdot 7) \cdot 0,275}{0,99} = 527,15 \text{ мм}. \end{aligned}$$

Уширение фланцев можно рассчитать, как при прокатке обычной полосы, по одному из ранее рекомендованных уравнений.

Валки клетки имеют выпуск 14%. Тем самым обеспечивается хорошая устойчивость профиля при деформации и обеспечивается восстановление размеров ручьев при переточках.

### *Чистовая группа клетей*

Чистовая группа клетей состоит из трех клетей: главной универсальной, вспомогательной и чистовой универсальной. В чистовой клетке производят только один проход без обжатия кромок фланцев. Калибровку и режимы обжатий для этой группы клетей рассчитывают так же, как для черновой группы клетей.

Уклон полок в валках чистовой группы клетей составляет 6%. В этой группе клетей нет необходимости применять большой уклон, так как профиль приближается к чистовым размерам и в последней клетке при малом уклоне облегчаются условия захвата и обжатия элементов балки.

## КАЛИБРОВКА ШВЕЛЛЕРОВ

## 1. Профиль и его характеристика

Швеллер является широко распространенным строительным профилем (рис. 185). Важными характеристиками швеллера являются: его высота  $h$  и ширина полки  $b$ , толщина стенки  $d$ , площадь поперечного сечения  $F$ , масса (вес) 1 пог. м, моменты сопротивления  $W_x$  и  $W_y$ , радиусы инерции  $\rho_x$  и  $\rho_y$ , а также отношение  $\frac{d}{h}$ , определяющее устойчивость профиля. Характеристики швеллеров приведены в ГОСТ 8240—56.

Швеллеры имеют номера от 5 до 40. С увеличением номера профиля отношения  $\frac{b}{h}$  и  $\frac{d}{h}$  уменьшаются. Для профилей малых размеров отношение площади стенки к площади профиля  $\frac{F_c}{F} = \frac{1}{3}$ , для швеллеров больших размеров  $\frac{F_c}{F} > \frac{1}{2}$ .

По действующему в настоящее время ГОСТ 8240—56 значительно уменьшена (по сравнению с ОСТ 10017—39) толщина стенки профиля, особенно для швеллеров больших номеров, а также несколько уменьшена средняя толщина полки и увеличена ее ширина. В результате этих изменений масса профиля уменьшилась, а удельное сопротивление возросло.

Швеллеры имеют меньший уклон и большую ширину фланцев по сравнению с балками соответствующих номеров.

Особенностью прокатки швеллеров является и наличие в калибрах так называемых ложных фланцев (см. ниже).

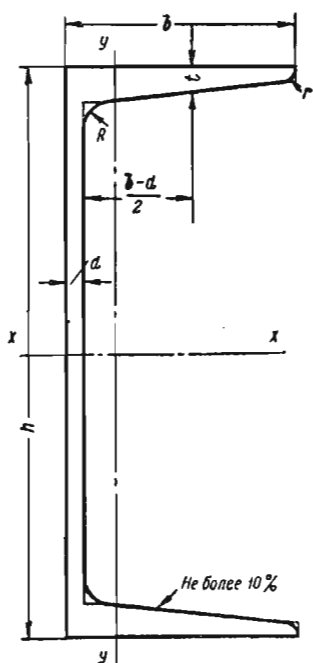


Рис. 185. Профиль швеллера:

$h$  — высота профиля;  $b$  — ширина полки;  $d$  — толщина стенки;  $t$  — средняя толщина полки;  $R$  и  $r$  — радиусы закруглений

## 2. Схемы прокатки и методы калибровки швеллеров

Схема прокатки швеллера определяется типом стана и рассчитанной применительно к стану калибровкой. При калибровке швеллера применяют несколько методов, например балочный, с большим выпуском полок, со сгибанием полок.

При балочном методе черновые фасонные калибры являются общими для прокатки балок и швеллеров. В результате

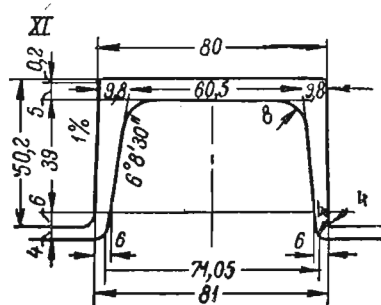
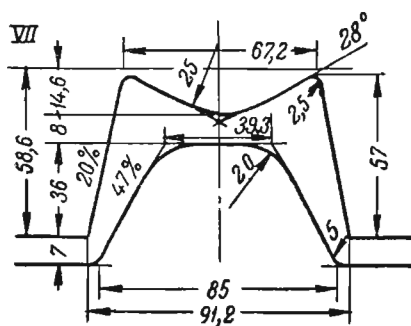
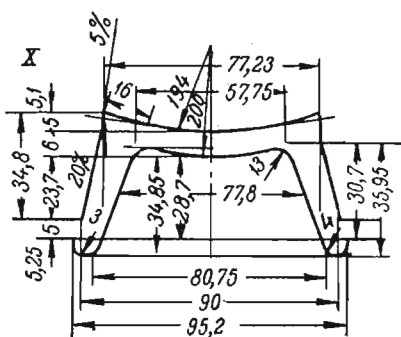
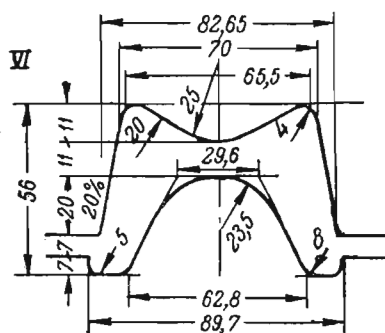
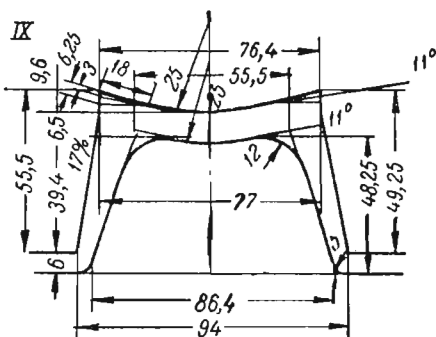
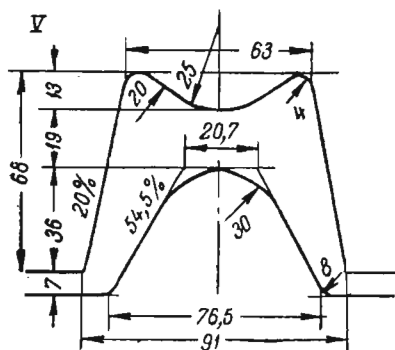
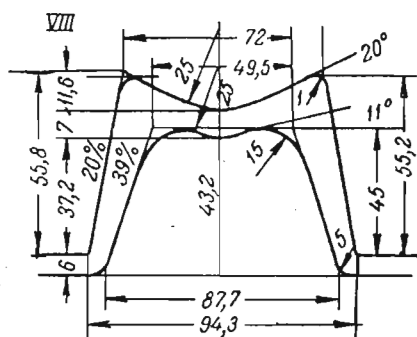
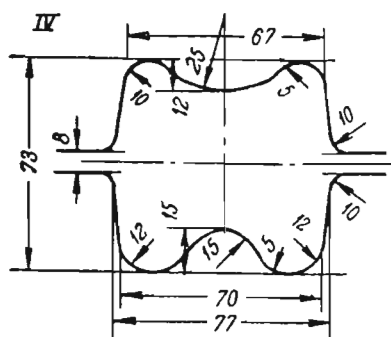
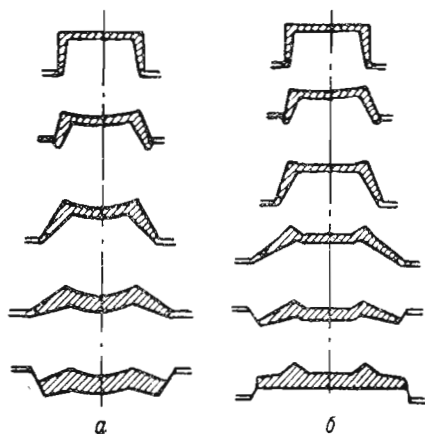


Рис. 186. Калибровка швеллера № 8 с применением больших выпусков полки:  
IV—XI — номера клеток

этого при прокатке швеллеров получаются очень большие обжатия по ложным фланцам, что приводит к значительному перемещению металла из ложных фланцев в полку и стенку, а также к получению профиля с неустойчивыми размерами. В настоящее время такой метод калибровки и прокатки швеллеров почти не применяют. Экономия валков за счет совмещения калибров не оправдывается, так как при этом увеличивается расход энергии при прокатке и ухудшаются качественные показатели.

Схема калибровки и прокатки швеллера по балочному методу сохранилась лишь на тех станах, где это обусловлено особенностями конструкции основного оборудования и сортамента стана.



Р и с. 187. Способы калибровки швеллеров (а и б) по методу последовательного сгибания

Использование общих калибров допустимо и рационально только в одной группе профилируемых размеров, если чистовые профили незначительно отличаются по размерам. Так, при прокатке нормальных и облегченных профилей несколько черновых калибров могут быть общими.

В настоящее время на отечественных заводах основным методом калибровки признан метод с применением больших выпусков полок. Выпуск полок принимают в пределах 15—20%, что допускает значительные боковые обжатия металла при прокатке и позволяет легко восстанавливать калибр при переточке валков с относительно малым съемом металла.

Выпуск полок обеспечивается благодаря углу между полкой и стенкой более  $90^\circ$ , а также прогибом стенки так, чтобы между полкой и стенкой в месте их соединения постоянно сохранялся прямой угол. Уклон полок может быть достигнут и обоими способами одновременно. На рис. 186 показана калибровка швеллера № 8 по этому методу. В последующих расчетах будет рассматриваться метод калибровки швеллера с применением большого выпуска полок.

В последнее время применяют систему калибровки швеллера, основанную на последовательном сгибании раската по ходу прокатки (рис. 187). Этот метод калибровки имеет большие преимущества: уменьшается глубина вреза калибров в валки, увеличивается стойкость калибров и допускается большое обжатие (более высокие коэффициенты деформации). Возможно применение развернутой калибровки швеллера, подробно изложенной в трудах Д. И. Старченко.

## Особенности прокатки швеллеров

Профиль швеллера можно рассматривать как часть двутавровой балки, если у последней отделить верхние фланцы. В связи с этим и был предложен в свое время балочный метод калибровки швеллеров. Однако условия деформации металла в швеллерном калибре имеют специфические особенности.

Для того чтобы предохранить металл в углах профиля от охлаждения и обеспечить лучшее выполнение этих углов, во всех промежуточных калибрах предусматривают ложные фланцы, которые по ходу прокатки постепенно обжимают. Если в калибрах двутавровой балки созданы условия последовательной и поочередной обработки открытых и закрытых фланцев, то в швеллерных калибрах такая очередность не соблюдается, так как по условиям получения профиля ложные фланцы имеют совсем иное назначение.

Особенностью прокатки и калибровки швеллеров является значительная деформация всех элементов профиля при постоянном разделе калибра только по одним фланцам. Обычно раздел калибра предусматривают по нижним (действительным) фланцам. Следовательно, принятое построение калибров и обуславливает общность условий деформации металла в них по всем элементам.

### Построение промежуточных и чистовых калибров

Швеллерные калибры характеризуются наличием ложных и действительных фланцев (см. рис. 186). Ложные фланцы рассчитывают по-разному. Оказалось весьма затруднительным привести обобщенные зависимости размеров ложных фланцев от какой-либо вполне определенной характеристики профиля. Известна лишь одна общая закономерность при расчетах — это применение повышенных коэффициентов деформации по ложному фланцу по сравнению с действительным.

Рекомендуется размеры ложного фланца принимать по следующим уравнениям:

$$h_{л.ф} = (0,03 \div 0,05) h (n - 1);$$

$$b_{л.ф} = (1 \div 1,3) b; \quad a_{л.ф} = (0,6 \div 0,65) b_{л.ф},$$

где

$h_{л.ф}$  и  $h$  — высота ложного и действительного фланцев;

$b_{л.ф}$  и  $b$  — толщина ложного и действительного фланцев у основания;

$a_{л.ф}$  — толщина ложных фланцев на конце;

$n$  — номер калибра против хода прокатки.

Ложные фланцы в чистовом калибре имеют двойное назначение. Во-первых, они служат для предупреждения утяжки внешних углов стенки готового профиля после охлаждения (особенно швеллеров больших размеров). Во-вторых, ложные фланцы улучшают условия правки профиля в холодном состоянии на правильной машине.

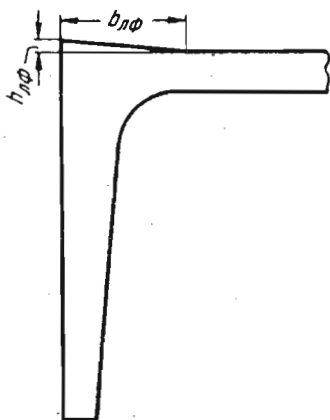
Наличие небольшого ложного фланца на готовом профиле обеспечивает вполне достаточное давление на полки и создает такой изгибающий момент, что полки без бокового давления образуют прямой угол со стенкой. Форма ложного фланца на чистовом профиле представляет собой треугольник (рис. 188). Размеры его принимают следующими:

$$h_{л.ф} = 0,15 \div 0,3 \text{ мм}; \quad b_{л.ф} = (1,25 \div 1,5) b.$$

Размеры чистового калибра следует принимать с учетом минусовых допусков. Особенно это относится к определению средней толщины пол-

ки. Построение калибра с минусовыми допусками обеспечивает получение более экономичного профиля. По мере выработки калибра (прежде всего полок) размеры профиля постепенно увеличиваются, достигая номинальных, и при значительной выработке калибра масса погонного метра профиля может оказаться в пределах плюсового допуска, но это бывает редко, так как обычно к этому времени переходят на новые калибры.

В ряде случаев представляется возможность (из-за распределения коэффициентов деформации по проходам) иметь два одинаковых чисто-



Р и с. 188. Форма ложного фланца в чистовом калибре (готовый профиль)

вых калибра. Это позволяет работать на валках более продолжительное время и получать профиль с большей точностью.

#### *Построение контрольных калибров и их назначение*

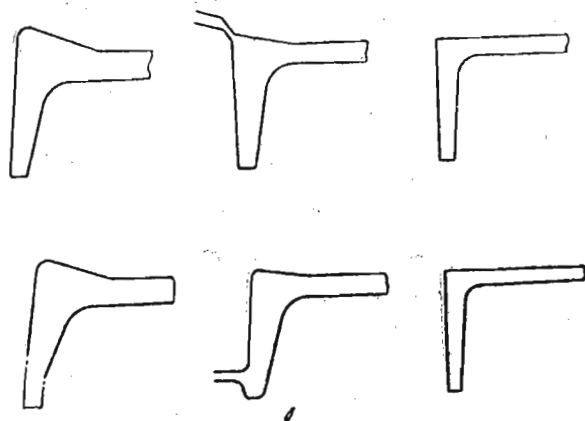
При калибровке швеллеров отсутствует чередование расположения раздела калибров. Калибры конструируют при постоянном разделе по действительным фланцам. В таком случае при открытых фланцах калибра нет возможности проконтролировать высоту получающихся фланцев профиля. Поэтому предусматривают так называемые контрольные калибры, которые предназначены главным образом для деформации полок по высоте, т. е. для контроля их высоты. Обычно при общем числе фасонных калибров 7—9 принимают два контрольных калибра, из которых один является черновым, а второй, как правило, предчистовым; его иногда называют чистовым контрольным калибром.

Имеются контрольные калибры двух типов, отличающиеся между собой местом раздела. На рис. 189, а показан контрольный калибр закрытого типа с разделом в верхней части. Такой калибр имеет преимущество в том, что из него выходит раскат с точными размерами. Однако он имеет и существенные недостатки. Главный из них состоит в том, что при входе полка в закрытую часть контрольного калибра происходит запрессовывание (заклинивание) металла, в результате чего выход раската из валков весьма затрудняется. Чтобы не было заклинивания металла в контрольном калибре, необходимо из предшествующего калибра получать раскат с меньшей толщиной полка на конце. Заклинивание металла связано также с выработкой калибра и приводит к повышенному расходу энергии при прокатке.

Существенным недостатком контрольного калибра указанной формы является также и трудность восстановления его размеров при пере-

точках валков: приходится при этом значительно уменьшать диаметр валков. Закрытые части калибра (полки) вызывают уменьшение прочности валков. В настоящее время закрытый контрольный калибр почти не применяют.

Большое распространение получил контрольный калибр полуоткрытого типа (рис. 189, б). Его преимущества перед закрытым контрольным калибром являются очевидными: уменьшается врез в бочку валков, отсутствует заклинивание раската в калибре (что повышает его стойкость), уменьшается расход энергии при прокатке, обеспечивается не только контроль полки по высоте, но и возможность бокового обжатия полки, кроме нижней ее части, находящейся в закрытой части калибра



Р и с. 189. Последние три калибра при прокатке швеллеров

(в противном случае металл будет выдавливаться в зазор между валками).

По-существу, такой калибр является открытым, так как средняя и верхняя части фланца, т. е. большая его часть обрабатывается верхним и нижним валками.

Для построения контрольного калибра необходимо определить толщину полки на конце и место разъема калибра. Рекомендуется толщину на конце полки определять по уравнению

$$a_{\text{контр}} = (1,04 \div 1,05) a',$$

где  $a'$  — толщина полки на ее конце у раската, задаваемого в данный контрольный калибр.

Раздел калибра принимают на расстоянии  $h_x = 7 \div 20$  мм от конца полки в зависимости от номера швеллера и места нахождения калибра. Чем больше номер швеллера, тем большим надо принимать это расстояние. Для черногового контрольного калибра это расстояние также принимают большим. Выпуск нижней части калибра (полок) принимают в пределах  $10 \div 15\%$ . Радиусы закруглений принимают конструктивно.

#### *Форма калибров, предшествующих контрольным калибрам*

Калибр, предшествующий контрольному, как правило, имеет обычную форму (см. рис. 189, а), однако иногда ее изменяют: нижнюю часть полки предусматривают с двойным выпуском (см. рис. 189, б). Благодаря этому исключается образование заусенцев в предотделочном ка-

50

либре и заката в отделочном. Указанная форма калибра особенно приемлема при прокатке швеллеров больших размеров и в том случае, когда в контрольном калибре принимают большие боковые обжатия полок.

### *Уклон полок, изгиб стенки, радиусы закруглений*

Определенных рекомендаций и правил применения того или другого способа получения выпуска калибров нет. Однако наиболее целесообразно получать выпуск полок путем изгиба стенки. В этом случае нет опасения утяжки металла из внешних углов стенки, что может наблюдаться при отгибании полок по мере приближения к чистовому проходу. Изгиб стенки профиля способствует лучшему центрированию при входе металла в калибр. Он может рекомендоваться при калибровке швеллеров средних и больших размеров. Радиусы закруглений в швеллерных калибрах принимают конструктивно или определяют так же, как и в балочных.

### *Уширение*

Все положения, приведенные выше по уширению при прокатке двутавровых балок, применимы к швеллерам. Поэтому при расчетах калибровки швеллеров используют одни и те же уравнения (см. гл. XIII). Применительно к швеллерам отметим только следующую особенность. Эти профили прокатывают в калибрах с постоянным разъемом валков на конце полок при определенном их выпуске. Обратного изгиба полок, как у фланцев двутавровых балок, при подаче раската в каждый последующий калибр нет. Поэтому здесь допустимо, если в этом есть необходимость, повышенное уширение по сравнению с расчетным.

Однако исследования и практика показывают, что если профиль прокатывают из высокоуглеродистых или легированных сталей, то уширение следует принимать только в пределах указанных рекомендаций. В противном случае может образовываться закат на внутренней стороне у основания полки.

### *Размеры исходной заготовки*

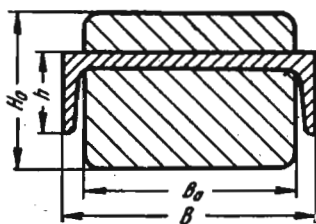
Первые по ходу прокатки швеллерные калибры незначительно отличаются от калибров двутавровых балок. Это подобие формы калибров и примерно одинаковые величины их площадей при одинаковых размерах швеллера и балки позволяют рекомендовать ту же методику определения размеров исходной заготовки, что и для балок.

Уравнения (124) — (127) для определения высоты исходной заготовки, приведенные ранее для балок, справедливы также и здесь при постановке в них соответствующих значений. Ориентировочно высота прямоугольной заготовки, задаваемой в разрезной калибр, должна быть больше размера полок чистового профиля не менее, чем в два раза:

$$H_0 = (2,0 \div 2,2) h.$$

Ширина заготовки равняется ширине разрезного калибра за вычетом уширения в нем (рис. 190). Обычно для швеллеров больших размеров, как и для двутавровых балок, применяется разрезная заготовка, определение размеров которой рассмотрено в главе о калибровке балок.

Рис. 190. Заготовка для швеллера ( $H_0 \approx 2h$ )



### Распределение коэффициентов деформации по элементам швеллера

Любое промежуточное сечение в общей системе калибровки швеллера можно рассматривать состоящим из действительных фланцев (полки), стенки и ложных фланцев. Рассмотрим закономерности распределения коэффициентов деформации по указанным элементам профиля.

Профиль определяют действительные фланцы и стенка. Поэтому главными показателями, характеризующими интенсивность процесса прокатки металла в калибрах, являются коэффициенты деформации полки и стенки. При рассмотрении методики расчета калибровки швеллера будем условно выделять всю стенку профиля.

Если в качестве исходной заготовки служит профиль двутаврового сечения, то коэффициенты деформации стенки и полки принимают иные, чем в том случае, если исходная заготовка имеет прямоугольное сечение. При исходной заготовке двутаврового сечения коэффициенты деформации  $\eta^a$  (конца полки) и  $\eta^b$  (основания полки) незначительно отличаются между собой.

Часто приходится использовать исходные заготовки прямоугольного сечения. В этих случаях в черновых калибрах формируются стенка и фланцы. Поэтому, как правило, коэффициент деформации стенки в этих калибрах намного больше, чем коэффициенты деформации остальных элементов.

Общая закономерность распределения коэффициентов деформации элементов профиля следующая:

чистовой калибр

$$\eta^a \leq \eta^b;$$

черновые калибры

$$\eta_c > \eta^a > \eta^b;$$

промежуточные и предчистовые калибры

$$\eta^a > \eta_c \geq \eta^b.$$

В чистовом калибре все коэффициенты деформации практически одинаковы.

Коэффициент деформации на конце ложного фланца  $\eta_{л.ф}^a$  резко возрастает в черновых калибрах по ходу прокатки, а коэффициент деформации у основания ложного фланца  $\eta_{л.ф}^b$  постепенно уменьшается.

На рис. 191 показан полученный на основе исследований обобщенный график изменения средних коэффициентов вытяжки при прокатке швеллеров № 18—36. Экстраполированием можно достроить график и для швеллеров остальных номеров. По примеру калибровки двутавровых балок здесь также должен быть принят график изменения коэффициента обжатия стенки  $\eta_c$  по проходам (аналогично рис. 158).

Существенное значение при расчетах имеет отношение коэффициента деформации стенки  $\eta_c$  к среднему коэффициенту деформации пол-

ки  $\eta_{\phi}$ . На рис. 192 показано изменение этого отношения при прокатке швеллеров № 18—40; для остальных номеров могут быть произведены дополнительные построения и получены соответствующие значения отношений  $\frac{\eta_c}{\eta_{\phi}}$ . Из графика следует, что с увеличением номера профиля

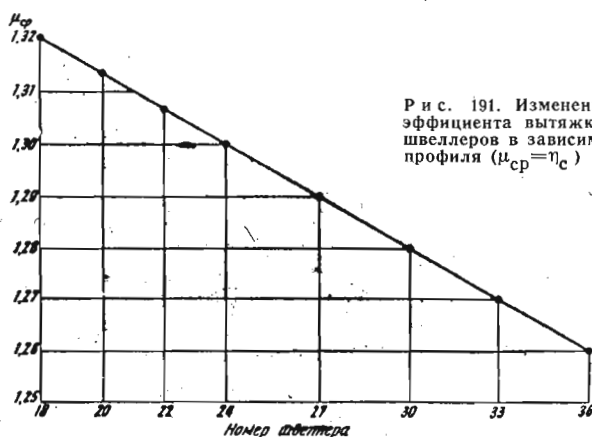


Рис. 191. Изменение среднего коэффициента вытяжки при прокатке швеллеров в зависимости от номера профиля ( $\mu_{ср} = \eta_{с}$ )

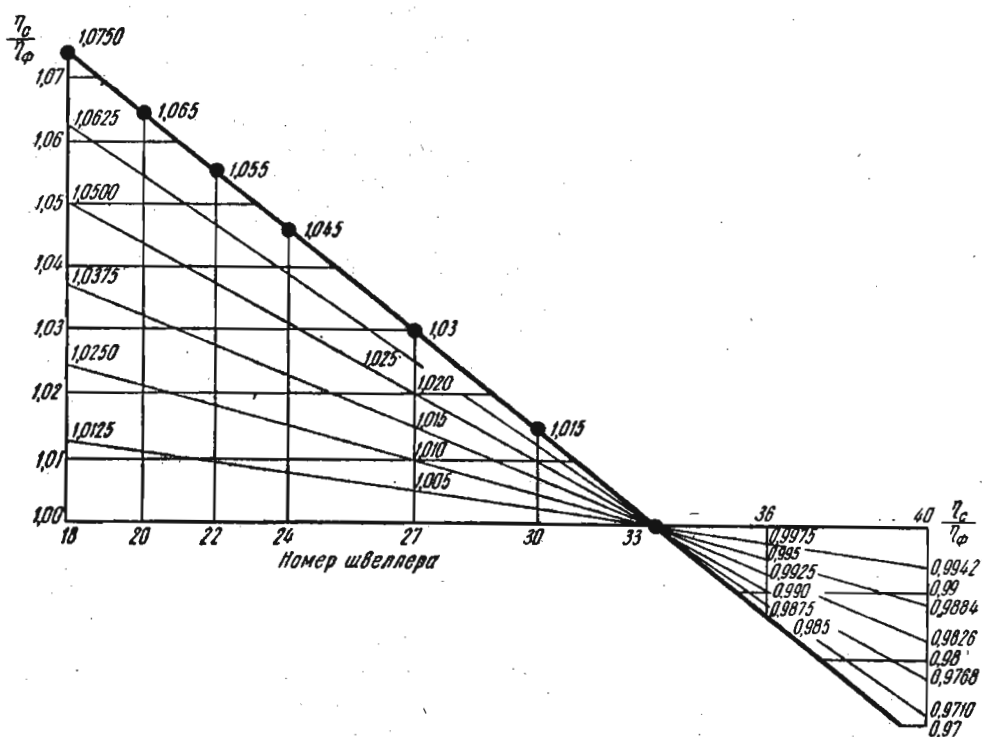


Рис. 192. Изменение отношения  $\frac{\eta_c}{\eta_{\phi}}$  в зависимости от номера швеллера

это отношение уменьшается и для швеллеров № 36 и 40 становится меньше единицы. Следовательно, швеллеры больших размеров (№ 36 и 40) прокатывают с более энергичной деформацией фланцев, чем стенки. Это делают для избежания утяжки фланцев в связи с тем, что доля

стенки в общей площади профиля у швеллеров больших номеров больше, чем у швеллеров малых номеров. Для швеллеров № 18—33 отношение  $\frac{\eta_c}{\eta_\phi}$  уменьшается от черновых проходов к чистовому; для швеллеров № 36 и 40 наблюдается обратная зависимость, т. е. отношение  $\frac{\eta_c}{\eta_\phi}$  увеличивается от черновых проходов к чистовому.

### 3. Расчет калибровки швеллеров

Один из применяемых на практике способов расчета калибровки швеллеров сводится к предварительному построению графиков распределения коэффициентов деформации элементов переходных сечений, что было рассмотрено в предыдущем разделе.

Коэффициенты деформации элементов профиля определяют по следующим равенствам (при этом размеры элементов со штрихом относятся к раскату, задаваемому в последующий калибр).

Ложный фланец:

$$\eta_{л.ф}^a = \frac{a'_{л.ф}}{a_{л.ф}}; \quad \eta_{л.ф}^b = \frac{b'_{л.ф}}{b_{л.ф}}.$$

Обжатие ложного фланца по высоте принимают конструктивно в пределах

$$\Delta h_{л.ф} = -(1,0 \div 7,0) \text{ мм.}$$

Это обжатие зависит от размера профиля и положения калибра (в черновых калибрах — больше, в промежуточных и предчистовых — меньше).

Действительный фланец:

$$\eta_\phi^a = \frac{a'}{a}; \quad \eta_\phi^b = \frac{b'}{b}.$$

Приращение высоты действительного фланца

$$\Delta h = 1,0 \div 3,0 \text{ мм.}$$

В черновых калибрах (в первых двух-трех по ходу прокатки) высота действительного фланца постоянна или несколько уменьшается:

$$\Delta h = -(2 \div 5) \text{ мм.}$$

Стенка профиля:

$$\eta_c = \frac{d'}{d}.$$

Коэффициенты деформации принимают исходя из теоретических и практических данных для прокатываемого профиля и типа стана. Изменение этих коэффициентов на графике должно быть плавным, без необоснованных пиков. Предельные величины коэффициентов деформации швеллеров принимают такими же, как и двутавровых балок (см. рис. 158—160).

Порядок расчета калибровки следующий.

1. Принимают коэффициенты деформаций по проходам и всем элементам профиля применительно к данному типу стана, а также с учетом формы сечения исходной заготовки. Величины этих коэффициентов должны соответствовать коэффициентам деформации двутавровых ба-

лок (открытые фланцы). Контрольные калибры строят главным образом конструктивно (см. выше).

2. Число проходов (число фасонных калибров) определяют по данным на стр. 228, как и для двутавровых балок.

3. Вычерчивают график, по которому можно произвести корректировку принимаемых коэффициентов деформации, чтобы получалось постепенное уменьшение их по ходу прокатки.

4. Размеры фланцев на их конце и у основания определяют так же, как и фланцев двутавровой балки; коэффициенты деформации — по рис. 158—160.

5. Определяют уширение.

6. Определяют радиусы закругления и выпуск полок по приведенным выше рекомендациям.

7. Составляют сводную таблицу расчетов калибровки.

8. После всех расчетов вычерчивают калибры.

### *Расчет калибровки швеллера № 12*

Размеры профиля в холодном состоянии по ГОСТ 8240—56:  $h = 120$  мм;  $d = 4,8$  мм;  $b = 52$  мм;  $t = 7,8$  мм; уклон полки 10%;  $R = 7,5$  мм;  $r = 3$  мм;  $F = 1330$  мм<sup>2</sup>.

Принимаем коэффициенты деформации элементов профиля по рис. 193 и 194. Принимаем также, что второй и шестой калибры против хода прокатки будут контрольными.

*Первый (чистовой) калибр.* Ширину калибра по стенке принимаем без учета коэффициента температурной усадки, т. е.  $B_1 = 120$  мм, что обеспечит прокатку с минусовыми допусками.

Высота калибра по полке

$$h_1 = 1,015b = 1,015 \cdot 52 = 52,75 \text{ мм.}$$

Принимаем высоту ложного фланца  $h_{л.ф} = 0,3$  мм. Тогда окончательно

$$h_1 = 52,75 + 0,3 = 53,05 \text{ мм.}$$

Размеры действительного фланца у основания и на конце рассчитываем по уклону полки с учетом минусового допуска:

$$\Delta t_1 = \frac{52,75 - 4,8}{2} \cdot 0,1 = 2,4 \text{ мм;}$$

$$b_1 = 7,8 + 2,4 = 10,2 \text{ мм.}$$

$$a_1 = 7,8 - 2,4 = 5,4 \text{ мм.}$$

При допуске по толщине фланца 0,5 мм окончательные размеры действительного фланца:

$$b_1 = 10,2 - 0,5 = 9,7 \text{ мм и } a_1 = 5,4 - 0,5 = 4,9 \text{ мм.}$$

Высота действительного фланца

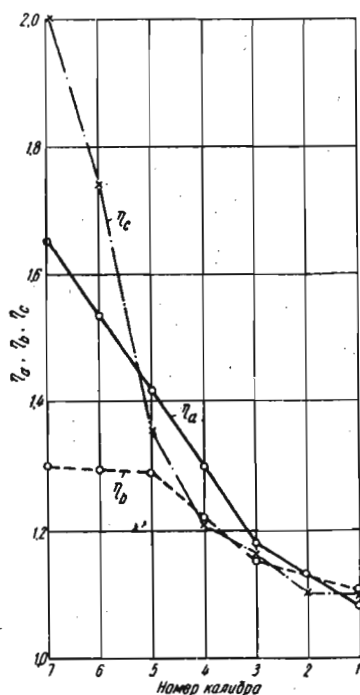
$$h = 52,75 - 4,8 = 47,95 \text{ мм.}$$

Добавляя 0,95 мм к общей высоте калибра, получаем

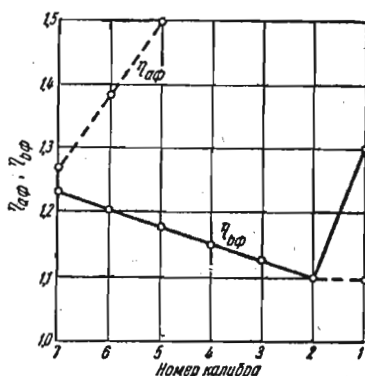
$$53,05 + 0,95 = 54 \text{ мм.}$$

Высота действительного фланца калибра окончательно будет

$$54 - 0,3 - 4,8 = 48,9 \text{ мм.}$$



Р и с. 193. Распределение коэффициентов деформации по проходам при прокатке швеллера № 12



Р и с. 194. Распределение коэффициентов деформации ложных фланцев по проходам при прокатке швеллера № 12

Эти данные приняты для построения чистового калибра. Размер основания ложного фланца

$$b_{л.ф} = 1,5 b_1 = 1,5 \cdot 9,7 \approx 15 \text{ мм.}$$

Радиусы закругления принимаем такие, как и у готового профиля:

$$R = 7,5 \text{ мм и } r = 3 \text{ мм.}$$

Профиль прокатывается из низкоуглеродистой стали, поэтому уширение в первом (против хода прокатки) калибре будет

$$\Delta b_1 = C + \frac{n-1}{2} = 1,5 \text{ мм,}$$

так как  $C = 1,5$ , а  $n = 1$ .

Площадь сечения одного ложного фланца

$$F_{л.ф} = 0,5 \cdot 15 \cdot 0,3 = 2,25 \text{ мм}^2.$$

Площадь сечения одного действительного фланца

$$F_{д.ф} = \frac{9,7 + 4,9}{2} 48,9 = 354 \text{ мм}^2.$$

Площадь сечения стенки

$$F_c = 120 \cdot 4,8 = 576 \text{ мм}^2.$$

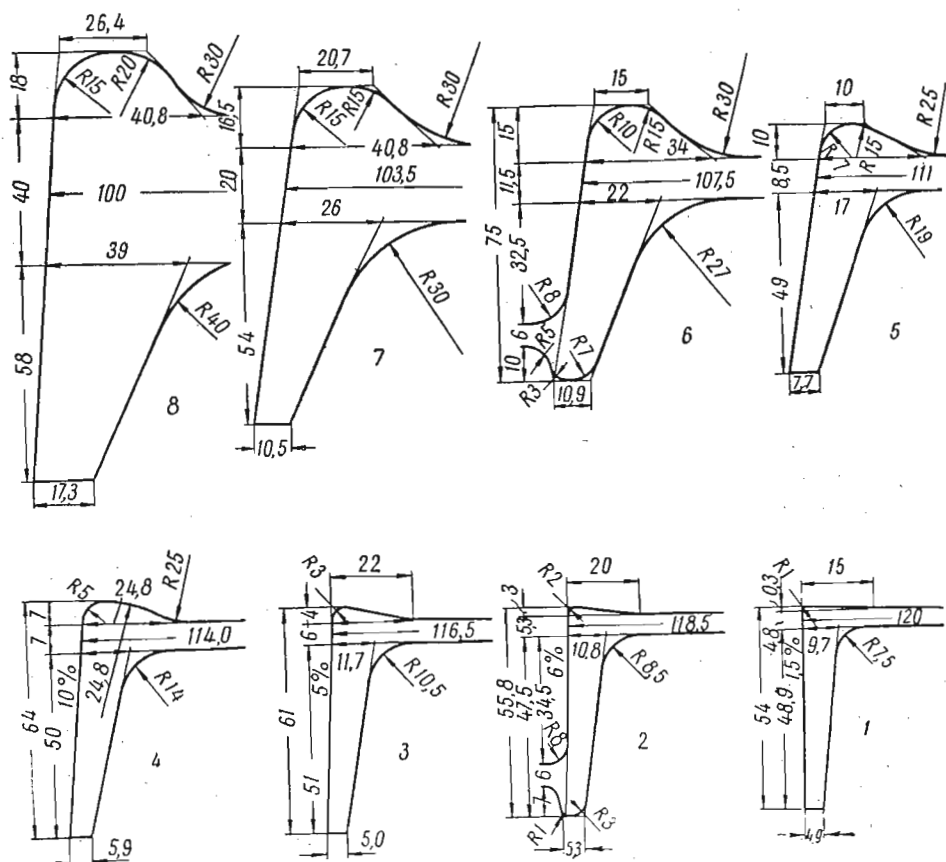
Суммарная площадь сечения

$$F_1 = 2 \cdot 2,25 + 2 \cdot 354 + 576 \approx 1288 \text{ мм}^2.$$

Второй (предчистовой) калибр. Этот калибр является контрольным. Для контрольных калибров следует принимать другие коэффициенты деформации элементов (на графиках они не показаны).

Коэффициент деформации ложного фланца в чистовом калибре принимаем  $\eta_{л.ф}^2 = 1,33$ . Тогда

$$b_{л.ф2} = 1,33 \cdot 15 = 20 \text{ мм.}$$



Р и с. 195. Калибровка швеллера № 12:

1—8 — номера калибров против хода прокатки

# Сводные данные расчета

Номер калибра	Ширина калибра $B$ , мм	Площадь калибра $F$ , мм <sup>2</sup>	Уширение $\Delta b$ , мм	Коэффициент вытяжки профиля $\mu$	Общая высота профиля по полке, мм	Полка							
						коэффициент деформации $\eta_a$	коэффициент деформации $\eta_b$	толщина на конце $a_n$ , мм	толщина у основания $b_n$ , мм	высота $h$ , мм	приращение высоты $\Delta h$ , мм	площадь $F_n$ , мм <sup>2</sup>	Коэффициент вытяжки $\mu_n$
1	120	1288	1,5	1,2	54	1,083	1,115	4,9	9,7	48,9	+1,4	354	1,065
2	118,5	1544	2	1,06	55,8	0,96	1,083	5,3	10,8	47,5	-3,5	378	1,125
3	116,5	1640	2,5	1,185	61	1,18	1,155	5	11,7	51	+1,0	426	1,135
4	114	1942	3	1,31	64	1,30	1,26	5,9	13,5	50	+1,0	484	1,25
5	111	2541	3,5	1,55	67,5	1,42	1,29	7,7	17,0	49	+0,5	605	1,625
6	107,5	3941	4	1,285	75	0,965	1,18	10,9	22	48,5	-5,5	985	1,0
7	103,5	5056	3,5	1,675	90,5	1,65	1,5	10,5	26	54	-4	985	1,65
8	100	8472	—	—	116	—	—	17,3	39	58	—	1630	—

Обжатие ложного фланца по высоте принимаем конструктивно:  $\Delta h_{л.ф1} = 2,7$  мм. Тогда высота ложного фланца во втором калибре

$$h_{л.ф2} = 0,3 + 2,7 = 3,0 \text{ мм.}$$

Размеры действительного фланца в соответствии с коэффициентами деформации по графику (см. рис. 193)  $\eta^a = 1,083$  и  $\eta^b = 1,115$ :

$$a_2 = 1,083 \cdot 4,9 = 5,3 \text{ мм;}$$

$$b_2 = 1,115 \cdot 9,7 = 10,8 \text{ мм.}$$

Принимаем приращение высоты полки в чистовом калибре  $\Delta h_1 = 1,4$  мм. Тогда высота полок

$$h_2 = 48,9 - 1,4 = 47,5 \text{ мм.}$$

Глубину вреза конца полки в нижний валок конструктивно принимаем 7 мм, а зазор валков 6 мм.

Ширина калибра

$$B_2 = 120 - 1,5 = 118,5 \text{ мм;}$$

толщина стенки

$$d_2 = 1,1 \cdot 4,8 = 5,3 \text{ мм.}$$

Площадь сечения определяем так же, как и для первого калибра. Радиус закругления

$$R_2 = b_2 C_{\text{чист}},$$

где

$$C_{\text{чист}} = \frac{R}{b} = \frac{7,5}{9,7} = 0,775.$$

Тогда

$$R_2 = 10,8 \cdot 0,775 \approx 8,5 \text{ мм.}$$

Остальные размеры элементов контрольного калибра принимаем конструктивно.

Таблица 18

калибровки швеллера № 12

Ложный фланец								Стенка			
коэффициент деформации $\eta_{л.ф}^a$	коэффициент деформации $\eta_{л.ф}^b$	толщина на конце $a_{л.ф}$ , мм	толщина у основания $b_{л.ф}$ , мм	высота $h_{л.ф}$ , мм	утяжка $\Delta h$ , мм	площадь $F_{л.ф}$ , мм <sup>2</sup>	коэффициент вытяжки $\mu_{л.ф}$	толщина $d$ , мм	коэффициент деформации $\eta_c$	площадь $F_c$ , мм <sup>2</sup>	коэффициент вытяжки $\mu_c$
—	1,33	—	15	0,3	—2,7	2,25	13,3	4,8	1,1	576	1,09
—	1,1	—	20	3	—1,0	30	1,465	5,3	1,13	628	1,11
—	1,13	—	22	4	—3,0	44	2,0	6	1,165	700	1,14
—	1,16	—	24,8	7	—3,0	87	2,22	7	1,21	800	1,18
1,5	1,18	10	28,7	10	—5	193	1,9	8,5	1,355	945	1,31
1,38	1,2	15	34	15	—1,5	368	1,38	11,5	1,74	1235	1,675
1,275	1,0	20,7	40,8	16,5	—1,5	508	1,19	20	2,0	2070	1,93
—	—	26,4	40,8	18	—	606	—	40	—	4000	—

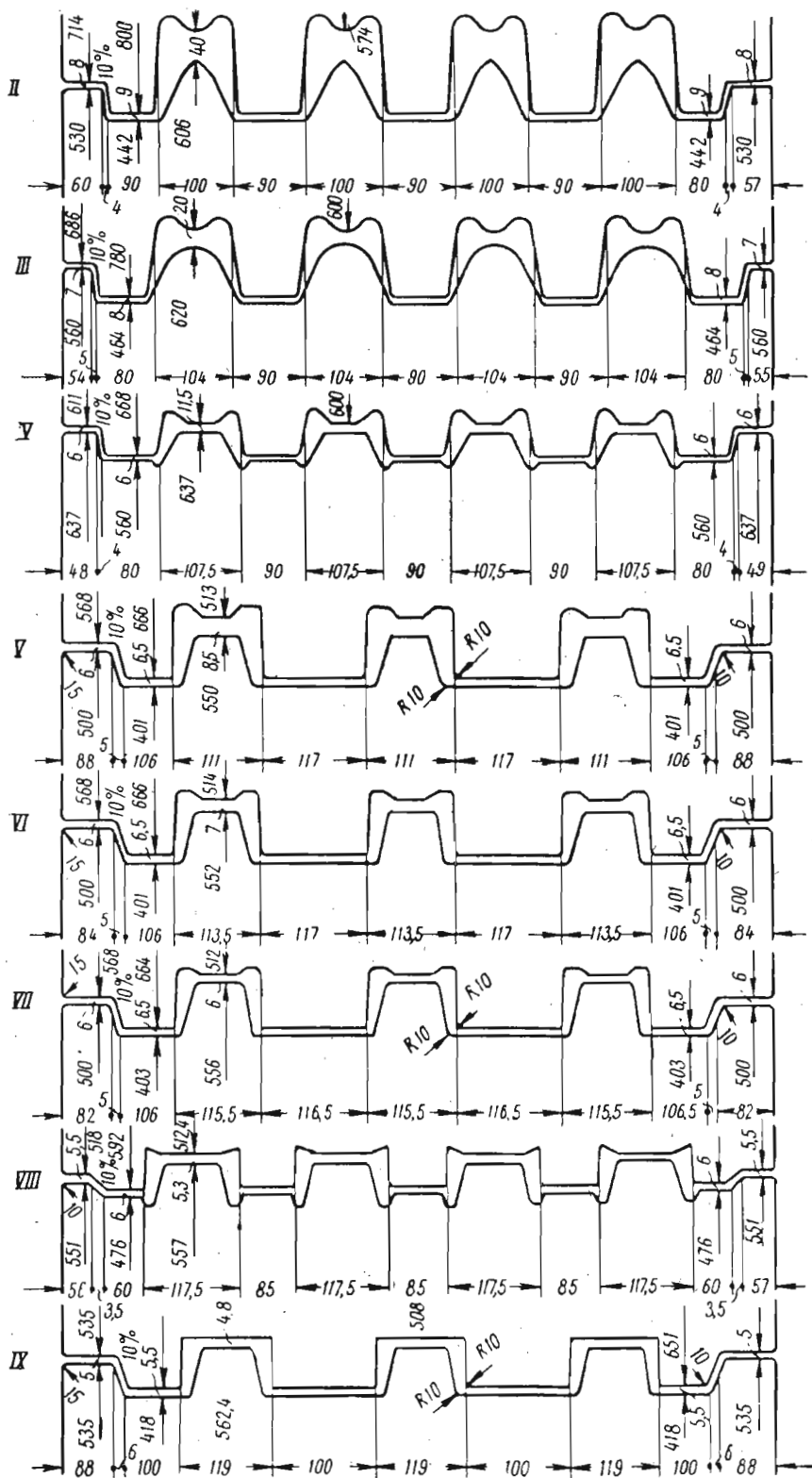


Рис. 196. Калибровка валков при прокатке швеллера № 12 на стане 500 (в валки с ящичным калибром клетки I задают разрезную заготовку):

II—IX — номера клеток

Аналогично рассчитываем и все остальные калибры. Расчетные данные сведены в табл. 18, а конструкция калибров показана на рис. 195.

С другими применяемыми на практике способами расчета калибровки швеллеров, а также с калибровкой некоторых специальных швеллерных профилей можно познакомиться по специальной литературе.

#### *Расположение калибров на валках*

Нейтральную линию калибра определяют аналитически по статическим моментам (см. гл. II) и ее совмещают с линией прокатки. Число калибров на бочке валка определяется схемой прокатки, а также размером профиля и прочностью буртов (см. гл. XIII). Расположение калибров на валках для прокатки швеллера № 12 показано на рис. 196.

В настоящее время в целях увеличения срока службы чистовых швеллерных калибров на ряде наших заводов доводят выпуск полок в этих калибрах до 6—8%. При этом предусматривают правку готового профиля в холодном состоянии на роликовых правильных машинах, при которой достигается перпендикулярность полок и стенки.

## КАЛИБРОВКА ТАВРОВОЙ СТАЛИ

Профиль тавровой стали представляет собой как бы половину профиля двутавровой балки. К группе профилей тавровой стали относится ряд профилей (рис. 197), которые отличаются друг от друга размерами отдельных элементов и их уклоном. Условимся в тавровом профиле именовать элементы полкой и стенкой. Поскольку полки профиля обжимаются не только боковым, но и прямым давлением, их уклон может быть самым незначительным. Стенке профиля обычно придают небольшой уклон, так как в чистовом калибре ее чаще всего прокатывают в вертикальном положении.



Рис. 197. Различные профили тавровой стали

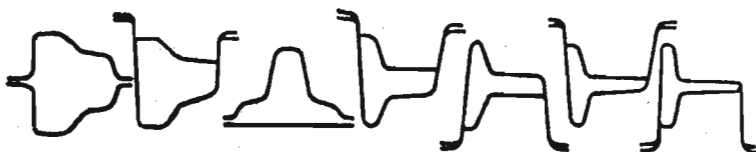


Рис. 198. Калибровка тавровой стали больших размеров в закрытых калибрах

Прокатка тавровой стали может быть осуществлена в закрытых калибрах или в открытых калибрах со свободным уширением. В закрытых калибрах калибровка и прокатка профиля (рис. 198) может осуществляться по методам, аналогичным для двутавровых балок. В частности, можно рекомендовать метод расчета калибровки профиля по коэффициентам деформации с использованием графиков (см. рис. 158—162), уравнений (110)—(113) и (116)—(123) с учетом возможности обжатия фланцев в тавровом калибре. При врезе калибров в валки также следует соблюдать чередование открытых и закрытых фланцев, чтобы обеспечить требуемую обработку элементов фланцев. При этом более равномерно и правильно будет обрабатываться стенка профиля.

Наличие «свободной» стенки у тавровой стали позволяет, несколько изменив схему прокатки, применить способ прокатки профиля в системе открытых калибров со свободным уширением (рис. 199). Это изменение сводится к тому, что профиль можно располагать в валках с последовательным чередованием положения так, чтобы высотная деформация осуществлялась как по полкам, так и по стенке. Характер такой деформации обеспечивает и меньший внутренний выпуск полкок. Если составлять

схему калибровки с применением высотной деформации по стенке, то калибры против хода прокатки будут располагаться следующим образом: чистовой — с вертикальным положением стенки; предчистовой — контрольный для окончательного получения высоты каждой полки и толщины стенки (высота стенки окончательно получается в чистовом калибре); третий — открытый для деформации полок по толщине (является определяющим толщину полок и контрольным для высоты стенки); два последующих (четвертый и пятый) — открытые, в которых деформируются все элементы профиля и, наконец, черновые фасонные, конфигурацию которых определяют расчетным путем в соответствии с принятыми коэффициентами деформации.

Так как первый фасонный калибр имеет своеобразную форму, то рекомендуется задавать в него заготовку квадратного сечения по диагонали (рис. 200). При других вариантах получения первого фасонного раската с четко обозначенными элементами — будущими стенкой и полкой — потребуются большее число калибров с последовательным приближением их формы к профилю тавровой стали.

Тавровую сталь прокатывают в условиях неравномерной деформации металла по ширине. В дополнение к этому в отдельных проходах эта неравномерность еще и несимметрична относительно вертикальной оси. Поэтому расчет уширения фланцев (полок) и стенки в системе открытых калибров практически осуществлять с высокой точностью не представляется возможным.

В связи с тем, что при неравномерной деформации раската уширение всегда больше, чем при равномерной деформации по ширине, можно примерно руководствоваться следующими рекомендациями.

Уширение можно определять по одной из ранее приведенных формул. Обжатие в формуле уширения следует принимать как разность среднеарифметических величин по элементам полки. Например, если до прокатки фланцы (полки) имели толщину: на конце  $a$ , у основания  $b$ , а после прокатки — соответственно  $a_1$  и  $b_1$ , то обжатие по полке

$$\Delta h_{\text{усл}} = \frac{a+b}{2} - \frac{a_1+b_1}{2}.$$

Увеличенное действительное уширение против расчетного будет способствовать лучшей обработке фланцев при обжатии раската в контрольных и черновых калибрах, расположенных как и калибры двутавровой балки (стенка горизонтальна). При расчете калибровки профиля с применением закрытых калибров приращение и обжатие по высоте фланцев принимают в соответствии с рекомендациями, приведенными для двутавровых балок (см. гл. XIII).

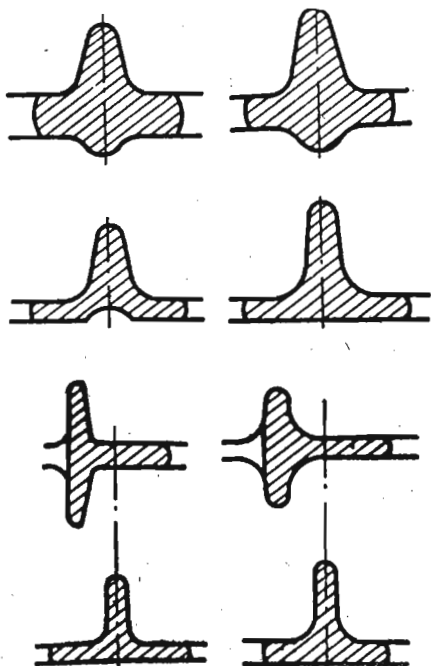


Рис. 199. Схема калибровки тавровой стали в системе открытых калибров

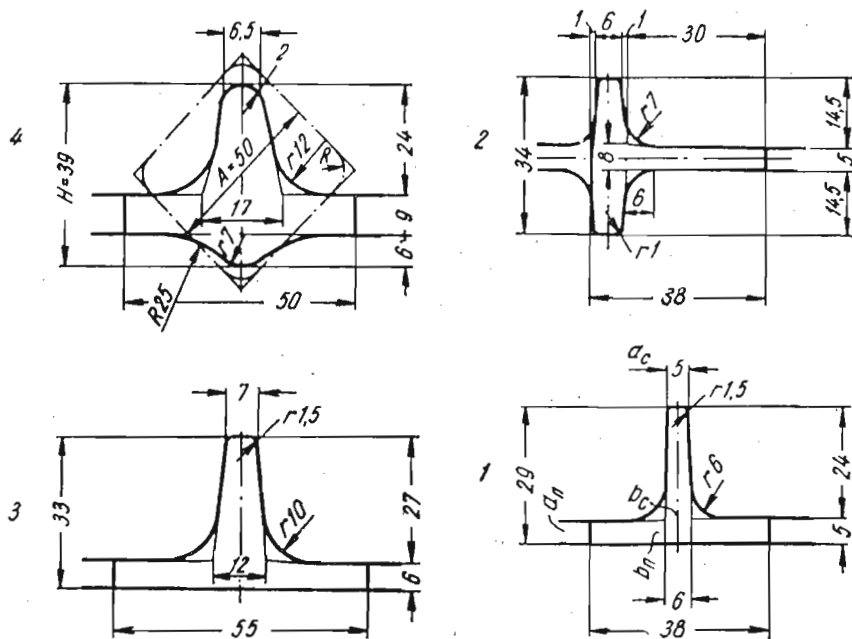


Рис. 200. Калибровка тавровой стали  $38 \times 29 \times 5$  мм:  
1—4 — номера калибров против хода прокатки

### 1. Пример расчета калибровки тавровой стали $38 \times 29 \times 5$ мм

Метод расчета калибровки тавровой стали (см. рис. 200) для системы открытых калибров сводится к следующему. Расчет ведут против хода прокатки. Принимают коэффициенты высотной деформации по элементам профиля в каждом проходе. Общее число фасонных калибров для всего сортамента тавровой стали составляет 4—6. Принимают примерную схему калибровки и прокатки.

В соответствии с принятыми исходными условиями рассчитывают элементы каждого переходного сечения и строят соответствующие калибры.

Рассмотрим пример расчета для профиля указанного размера на стане 300.

**Чистовой калибр.** Размеры чистового калибра определяют по ГОСТу. Поэтому никаких дополнительных построений не требуется. На чистовом калибре даны обозначения элементов стенки и полки (фланцев).

**Предчистовой калибр.** Этот калибр должен быть контрольным. В нем фиксируются ширина профиля по полкам и толщина стенки. Поэтому конструируют данный калибр так, чтобы полки (фланцы) располагались вертикально, а стенка — горизонтально. Полки деформируются в «ребровой» части калибра, стенка — на гладкой бочке. В связи с тем что в чистовом проходе окончательно определяется высота стенки, толщина ее в предчистовом проходе должна быть равной толщине этого элемента в готовом профиле. Для качественного формирования конца стенки принимаем обжатие стенки в чистовом калибре по ее длине

$$\Delta l_1 = 8 \div 10 \text{ мм.}$$

Для нашего расчета принимаем  $\Delta l_1 = 9$  мм.

Тогда общая длина стенки в предчистовом проходе

$$l_2 = l_1 + \Delta l_1 = 29 + 9 = 38 \text{ мм.}$$

Принимаем коэффициенты деформации в чистовом проходе на конце полки  $\eta_{a_1} = 1,20$  и у основания  $\eta_{b_1} = 1,33$ . Тогда в предчистовом калибре размеры фланцев

$$a_2 = \eta_{a_1} \cdot a_1 = 1,20 \cdot 5 = 6 \text{ мм.}$$

$$b_2 = \eta_{b_1} \cdot b_1 = 1,33 \cdot 6 \approx 8 \text{ мм.}$$

Далее необходимо определить высоту предчистового калибра по полкам, чтобы получалась необходимая ширина готового профиля. Однако обычным расчетом уширение полок (фланцев) в чистовом калибре определить не представляется возможным. Если определить уширение по одной из формул, то оно будет примерно равным 1 мм. Между тем практически за счет неравномерной деформации это уширение достигает величины 4 мм.

Следовательно, общая высота калибра

$$H_2 = B_1 - \Delta b_1 = 38 - 4 = 34 \text{ мм.}$$

Радиус закругления в месте разъема калибра и радиусы закругления на конце фланцев конструктивно принимаем соответственно 7 и 1 мм.

*Третий калибр.* Принимаем коэффициент деформации на конце стенки во втором калибре  $\eta_{a_2} = 1,4$ , у основания стенки  $\eta_{b_2} = 1,5$ . Полки в третьем калибре по толщине принимаем равными размерам полок, выходящих из калибра предчистовой клетки.

Тогда размеры стенки и полок будут:

$$a_{c3} = \eta_{a_2} \cdot a_{c2} = 1,4 \cdot 5 = 7 \text{ мм;}$$

$$b_{c3} = \eta_{b_2} \cdot b_{c2} = 1,5 \cdot 8 = 12 \text{ мм;}$$

$$h_{\text{пол}3} = h_{\text{пол}2} = 6 \text{ мм.}$$

Ширину полок (суммарную ширину профиля) определим исходя из обжатия в контрольном предчистовом калибре. Чтобы качественно обработать полки, обжатие их по высоте в предчистовой клетке принимаем

$$\Delta l_{\text{пол}} = 20 \div 22 \text{ мм.}$$

Для расчета примем  $\Delta l_{\text{пол}} = 21 \text{ мм.}$

Тогда общая ширина профиля по полкам

$$B_3 = H_2 + \Delta l_{\text{пол}} = 34 + 21 = 55 \text{ мм}$$

Радиусы закругления принимаем конструктивно или определяем по рекомендованным уравнениям для двутавровых балок.

*Четвертый калибр.* Калибр рассчитываем аналогично предшествующему. Но конфигурация его может быть или такой же, как предчистового, или аналогичной третьему с некоторым видоизменением.

Если по условиям технологического процесса возможно ограничиться четырьмя фасонными калибрами, то расположение и форма четвертого калибра могут быть приняты, как в третьем калибре. Но основание его видоизменяется: делают углубление по определенному радиусу. Это необходимо для придания устойчивости деформируемому квадратному раскату, задаваемому по диагонали. Таким образом, если в качестве исходной заготовки, задаваемой в первый по ходу прокатки фасонный калибр, служит раскат квадратного сечения, то на этом расчет фасонных калибров заканчивается, и числа их, равного четырем, для данного профиля вполне достаточно. По элементу  $b_c$  может быть

принят несколько завышенный коэффициент деформации в третьем калибре. Тогда ширина этого элемента в четвертом калибре будет большей, что улучшит заполнение металлом стенки в этом калибре.

*Размер квадратной заготовки*, задаваемой в первый фасонный калибр, определяют исходя из следующего. Будущая стенка профиля может быть получена в том случае, если диагональ задаваемого квадрата будет больше высоты калибра  $H$ :

$$1,41 A - 0,83 R = (1,20 \div 1,3) H$$

или

$$A = (0,85 \div 0,92) H + 0,59 R,$$

где  $A$  — сторона квадрата, задаваемого в первый фасонный калибр;  
 $H$  — общая высота калибра;  
 $R$  — радиус закругления углов квадратной заготовки.

Кроме того, необходимо, чтобы диагональ задаваемого квадрата была примерно равна ширине калибра. Форма и размеры калибров приведены на рис. 200.

## 2. Калибровка тавровой стали с большой длиной стенки и широкими полками

Если необходимо получить профиль с большой длиной стенки и широкими полками, то общее число фасонных калибров, несомненно, должно быть больше четырех (рис. 201) из-за необходимости иметь исходный квадрат большего сечения. Длинная стенка может быть получена



Рис. 201. Примерная схема прокатки тавровой стали с большой длиной стенки и широкими полками

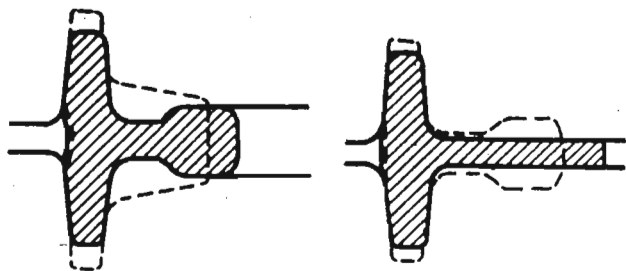
при неравномерной деформации на ее конце, которую можно обеспечить применением промежуточного калибра специальной формы (рис. 202). Тогда при прокатке стенки с утолщением на конце возникнет в последующем калибре большое уширение, и цель получения стенки большой длины будет достигнута.

Дальнейшее формирование стенки может быть осуществлено в калибре, который расположен так, что обжатие приходится в направлении уменьшения длины стенки, например, в третьем калибре против хода прокатки (см. рис. 201).

Из других способов прокатки тавровой стали можно отметить способ, связанный с прокаткой двутавровых балок со стенкой, имеющей длину, равную двум длинам стенки таврового профиля. При этом высота полков такой балки также должна соответствовать размерам полков тавровой стали. Прокатанную таким образом двутавровую балку разрезают по стенке на две части и получают два тавровых профиля.

В последнее время двутавровые балки и тавровую сталь изготавливают также способом непрерывной автоматической сварки из листов (полос). Преимущество такого способа состоит в том, что при этом можно получать профили любых размеров и любых соотношений ширины полков и длины стенки. Однако производительность соответствующих сва-

рочных агрегатов пока еще недостаточна и поэтому этот способ может быть применен лишь при производстве двутавровых балок и тавровой стали больших и особых размеров, когда их невыгодно получать горячей прокаткой.

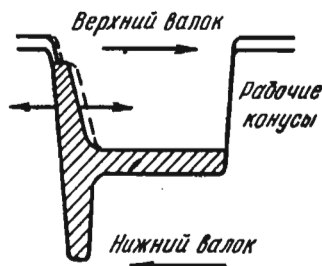


Р и с. 202. Применение разрезного калибра для создания условий неравномерной деформации в целях получения стенки большой длины

### *Расположение калибров на валках*

Если калибровка тавровой стали рассчитана для способа прокатки ее в закрытых калибрах с чередованием раздела калибров, то необходимо иметь в виду, что в открытых фланцах калибра возникают большие осевые силы, которые стремятся сместить валки в противоположные стороны (рис. 203). Эти силы тем больше, чем больше боковое обжатие в открытом фланце. Поэтому для предотвращения осевого смещения валков делают на них рабочие конусы, поверхности которых

Р и с. 203. Схема действия осевых сил в закрытом тавровом калибре



притирают «на масло». Следует отметить, что при калибровке необходимо строго учитывать возможность осевого смещения валков и при врезе калибров толщину открытого фланца целесообразно уменьшать на 0,2—0,25 мм, чтобы компенсировать износ открытого фланца и некоторое осевое смещение валков при прокатке.

При калибровке профиля в системе открытых калибров, когда обе полки подвергаются одновременно прямому обжатию, а стенка — по длине, затем (в последующем калибре) полки обжимаются по высоте, а стенка — по толщине, осевого смещения валков нет, так как условия деформации полок получаются одинаковыми.

Таким образом, с точки зрения устойчивости положения валков более целесообразным следует считать способ калибровки профиля в системе открытых калибров, хотя и в этом случае требуется принятие известных мер против осевого смещения валков.

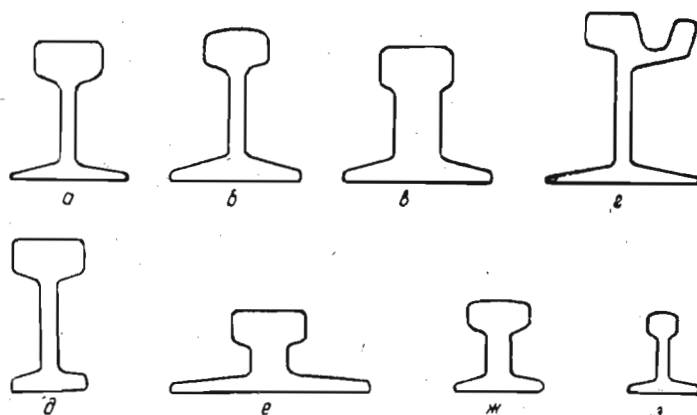
Необходимо обращать внимание на жесткость крепления вводной и особенно выводной арматуры клетей. В связи с тем что процесс прокатки тавровой стали сопровождается весьма неравномерной деформацией

цией металла по ширине, по выходе из валков раскат будет изгибаться в горизонтальной плоскости в сторону меньшего обжатия. Поэтому необходимо устанавливать выводную арматуру с жестким креплением, а длина ее должна быть намного больше, чем длина обычных выводных линеек, так как выводная арматура должна выпрямлять раскат по выходе из валков. При этом с точки зрения качества поверхности профилей целесообразно устанавливать вводную и выводную арматуры роликового типа. Этим предотвращается образование царапин, рисков и других дефектов на поверхности металла.

# Глава XVI

## КАЛИБРОВКА РЕЛЬСОВ

В настоящее время на транспорте и в промышленности применяют рельсы различных типов (рис. 204). Наибольшую долю производства составляют железнодорожные рельсы. В этой главе рассмотрим их калибровку.



Р и с. 204. Типы рельсов:

а, б — нормальные железнодорожные: а — для стрелочных ост-  
ряков; б — трамвайный желобчатый; в — контррельс; г, ж — под-  
крановые рельсы; з — узкой колеи

Таблица 19

Характеристика железнодорожных рельсов широкой колеи

Показатели	Типы рельсов				
	Р-38	Р-43	Р-50	Р-65	Р-75
Высота рельса, мм . . . . .	135	140	152	180	192
Ширина головки, мм . . . . .	68	70	70	75	75
Ширина подошвы, мм . . . . .	114	114	132	150	160
Площадь поперечного сечения, мм <sup>2</sup> . . . . .	4906	5700	6580	8292	9580
Вес 1 пог. м, кг . . . . .	38,416	44,653	51,514	64,93	73,7
Распределение металла по элементам профи- ля, %:					
головка . . . . .	45,4	42,83	38,68	34,5	36,4
шейка . . . . .	19,8	21,31	23,77	28,3	26,9
подошва . . . . .	34,8	35,86	37,55	37,2	36,7
Момент сопротивления, см <sup>3</sup> :					
по верху головки . . . . .	181,95	208,3	251,3	363,0	426
по низу подошвы . . . . .	180,29	217,3	287,2	437,0	547

## 1. Профиль и его характеристика

Отечественные металлургические заводы производят железнодорожные рельсы нормальной и узкой колеи. Важными характеристиками рельса являются масса (вес) 1 пог. м и распределение металла по элементам профиля (табл. 19). Принятое распределение металла между элементами профиля обеспечивает благоприятные условия службы рельсов в пути. К рельсам предъявляют жесткие требования как по точности профиля, так и по качеству поверхности.

## 2. Общая схема калибровки железнодорожных рельсов

Железнодорожные рельсы относят к группе фланцевых профилей: одна из схем их прокатки показана на рис. 205. Прокатка рельсов усложняется тем, что при размещении в валках рельсовый калибр является несимметричным относительно вертикальной оси. Вследствие этого как при прямом (рис. 206, а), так и при косом (рис. 206, б) расположении калибров получается значительное боковое давление. Последнее приводит к преждевременному износу рабочих конусов валков, предусматриваемых для предотвращения смещения валков в процессе прокатки. Несимметричность профиля рельса и различные условия деформации металла в головке и подошве усложняют калибровку профиля.

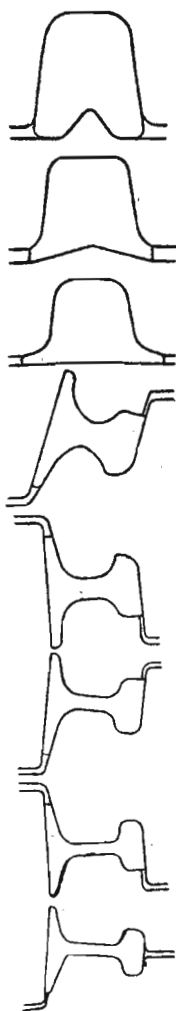


Рис. 205. Схема прокатки рельсов

Практикой работы отечественных заводов установлено, что для формирования профиля из заготовки прямоугольного сечения необходимо девять—одиннадцать проходов. Из них первые три—четыре прохода по ходу прокатки осуществляют в тавровых калибрах, а последующие пять—семь—в рельсовых.

В тавровых калибрах осуществляется глубокое разрезание заготовки по подошве с последующим ее разворачиванием. При этом происходит разрушение первичной столбчатой структуры металла, из которого будет формироваться средняя треть подошвы рельса, что значительно улучшает качество рельса. Кроме того, в тавровых калибрах происходит значительная деформация металла головки рельса. В последнем по ходу прокатки тавровом калибре оформляется подошва профиля и получается черновой профиль для прокатки в последующем разрезном рельсовом калибре.

Форма таврового калибра играет существенную роль в системе калибровки. Многими исследованиями доказано, что форма таврового калибра определяет структуру раската. Это весьма важно при калибровке рельсов, так как в значительной мере определяет срок их службы. В собственно рельсовых калибрах производится окончательное формирование профиля. При этом шейка профиля обжимается прямым давлением, подошва — главным образом боковым, а головка — и прямым, и боковым.

Возможные схемы калибровки показаны на рис. 207. Из приведенных на этом рисунке схем наиболее современным требованиям отвечают две последние. Каждая

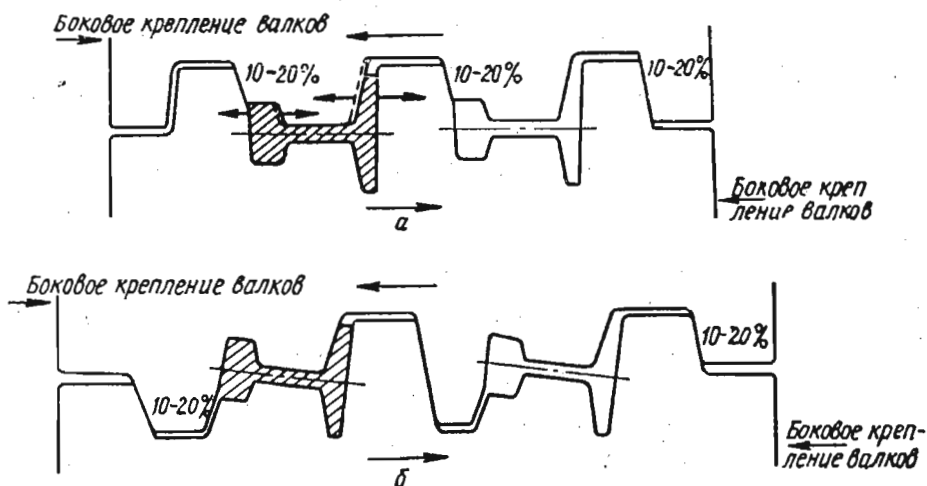


Рис. 206. Расположение рельсовых калибров в валках и схема возможного осевого смещения валков:

а — прямое положение калибров; б — косое положение калибров

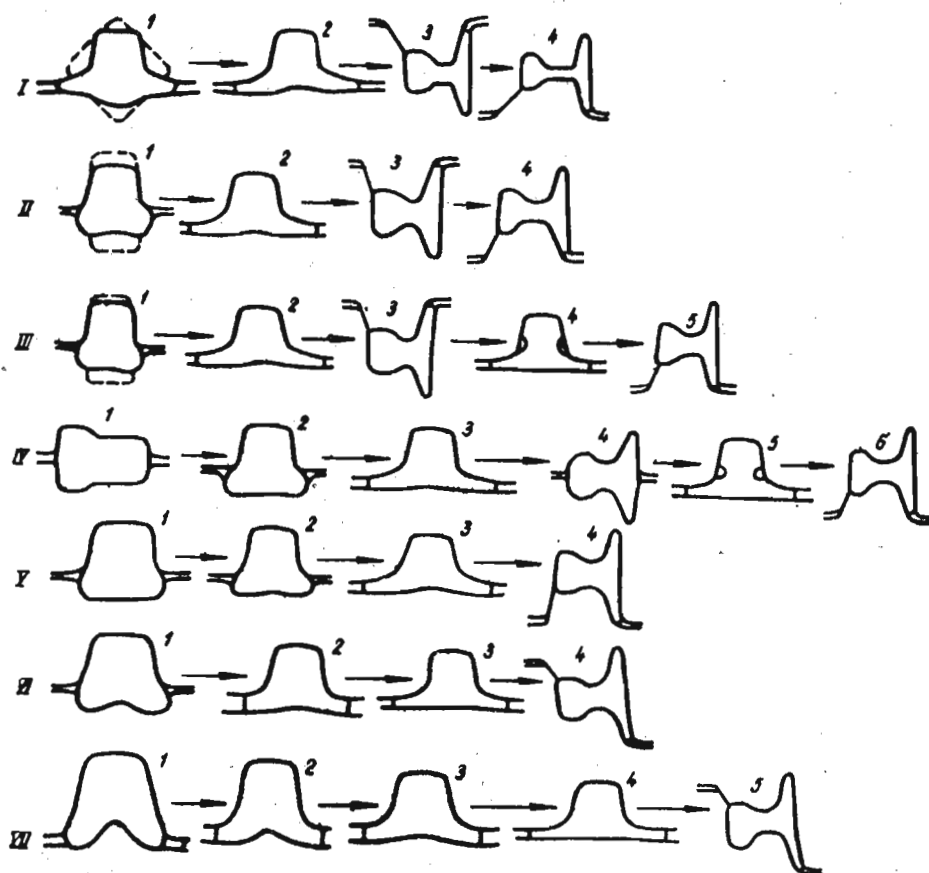


Рис. 207. Различные схемы калибровок рельсов:

I—VII — номера схем; 1—6 — номера калибров

схема имеет свои специфические особенности, преимущества и недостатки. Применение любой схемы обуславливается типом стана, размерами и формой исходной заготовки, размерами конечного профиля.

### *Выбор размеров исходной заготовки*

Исходную заготовку, задаваемую в первый тавровый калибр, принимают обычно прямоугольной формы. Площадь ее поперечного сечения может быть определена по значению среднего коэффициента вытяжки и общему числу проходов. Для предварительного определения площади поперечного сечения исходной заготовки прямоугольной формы, учитывая условия деформации, можно принимать  $\mu_{\text{ср}} = 1,19 \div 1,22$ .

Соотношение размеров прямоугольной заготовки принимают исходя из условий деформации в тавровых калибрах. На основании исследований и практических данных рекомендуются следующие соотношения:

$$B_{\text{заг}} = (2 \div 2,3) B_{\text{г}}; \quad (130)$$

$$H_{\text{заг}} = (1,5 \div 1,8) H, \quad (131)$$

где  $B_{\text{г}}$  — ширина головки готового профиля;  
 $H$  — высота готового профиля.

Приведенные рекомендации определяют отношение размеров исходной заготовки (с учетом отношения  $\frac{H}{B}$  готового профиля):

$$\frac{H_{\text{заг}}}{B_{\text{заг}}} = 1,5 \div 2,10.$$

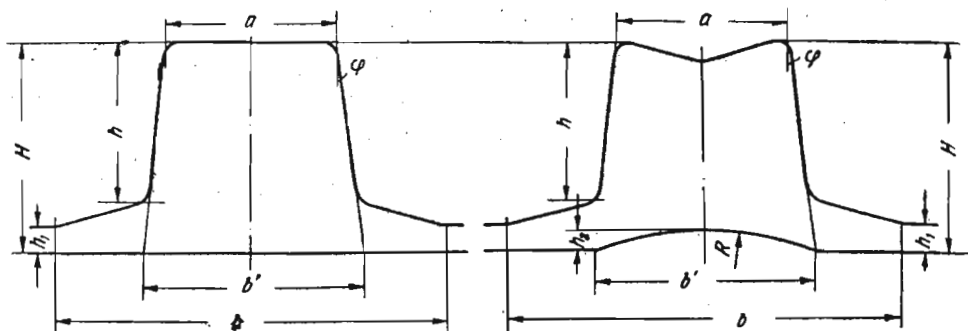
Большую высоту заготовки следует принимать при прокатке профиля в четырех тавровых калибрах, меньшую — при прокатке в трех тавровых калибрах. Кроме того, соотношение высоты и ширины заготовки, задаваемой в первый тавровый калибр, зависит от выбора формы таврового калибра.

### *Построение тавровых (ребровых) калибров*

Тавровые (иногда их называют ребровые) рельсовые калибры имеют двойное назначение: они обеспечивают формирование подошвы профиля в черновом виде при обжатии прямоугольной заготовки и создают необходимые условия для разрушения литой структуры металла в будущей подошве. При обжатии прямоугольной заготовки в тавровых калибрах наряду с образованием подошвы соответственно регулируется высота раската перед подачей его в первый разрезной рельсовый калибр.

Структура металла в головке и подошве рельса играет весьма существенную роль для получения износостойкости рельсов. В связи с этим имеет большое значение конфигурация калибра в той части, в которой деформируется металл будущей головки. Применение тавровых калибров с небольшим разрезающим гребнем со стороны будущей головки улучшает качество рельсов.

Рассмотрим конструктивные соображения, относящиеся к построению тавровых калибров. Число тавровых калибров в современных калибровках обычно три-четыре. Расположение их может быть следующим: два-три в первых проходах (при общем числе тавровых калибров менее четырех) или до трех тавровых калибров в первых проходах, а затем один калибр после одного из черновых рельсовых калибров. По-



Р и с. 208. Форма и элементы тавровых калибров

следнюю схему применяют в том случае, когда размеры подошвы в черновых калибрах получаются недостаточными.

В большинстве случаев тавровые калибры строят конструктивно на основании принятых коэффициентов деформации и с учетом распределения металла по элементам профиля.

Исходя из исследований и практических данных рекомендуются следующие соотношения размеров элементов таврового калибра (рис. 208) при условии, что исходная заготовка имеет прямоугольное сечение:

- 1)  $a \approx B_{\text{заг}}$ ;

- 2)  $b'$  зависит от уклона (20—35% на сторону) или определяют её конструктивно с учетом образования подошвы:

$$b' = a + (0,4 \div 0,7) H;$$

- 3)  $H$  определяют в зависимости от условий высотной деформации заготовки в данном тавровом калибре и в соответствии с условиями деформации раската в последующем калибре;

- 4)  $(H-h)$  принимают исходя из условий деформации раската в последующем калибре, а также на основании практических данных:

$$H - h = (0,2 \div 0,25) H,$$

откуда

$$h = (0,75 \div 0,8) H;$$

- 5)  $b$  зависит от формы и размеров последующего по ходу прокатки разрезного рельсового калибра и этот размер принимают равным или несколько большим ширины подошвы;

- 6)  $h_1$  также принимают в соответствии с размерами подошвы последующего калибра так, чтобы при подаче раската в рельсовый калибр не происходило заклинивание при входе в закрытую часть калибра;

- 7)  $h_2$  — конструктивный размер, зависящий от степени принятой деформации данного элемента профиля; радиус закругления в нем может быть определен по уравнению для очертаний овалов.

Если раскат, выходящий из данного таврового калибра, задают в последующий тавровый калибр, то размеры последнего по подошве принимают такими, чтобы деформация металла в нем осуществлялась при свободном или даже вынужденном уширении; деформация по головке происходит в условиях стесненного уширения.

### Построение черновых рельсовых калибров

Форма и размеры калибра должны быть такими, чтобы обеспечивалось наиболее благоприятное формирование всех расчетных элементов профиля при минимальном расходе энергии, высокой стойкости калибра и качестве профиля. Уклон фланцев подошвы и головки черновых рельсовых калибров должен быть оптимальным с точки зрения условий деформации металла и облегчения выхода раската из калибра.

При построении калибра определяют размеры фланцев по принятым для данной калибровки коэффициентам деформации; соответственно определяют и размеры шейки. По полученным размерам строят калибр. Раздел в первом рельсовом калибре принимают по любому фланцу, а далее должно соблюдаться чередование в его положении.

Формирование открытого фланца подошвы в калибре должно быть предусмотрено со свободным уширением. Любое несоответствие высоты открытого фланца нормальной высоте компенсируется затем деформацией металла в закрытом фланце следующего калибра. Однако для открытых фланцев головки это не допускается, так как условие деформации промежуточного раската в этом элементе имеет свою специфику, определяемую размерами головки калибра. Поэтому раздел в открытом фланце головки предусматривают по углу фланца при минимально возможном зазоре. Проникновение металла в раздел предотвращают закруглением угла головки в предшествующем калибре (см. рис. 205).

### Построение чистового калибра

Построение чистового калибра отличается от построения черновых рельсовых калибров. Готовый профиль должен иметь головку с вполне четким и определенным очертанием. Поэтому разъем валков в чистовом калибре обязательно должен находиться посередине головки (рис. 209). В этом случае имеется гарантия точного получения конфигу-

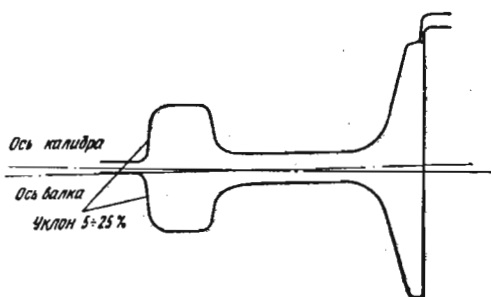


Рис. 209. Положение чистового рельсового калибра в валках

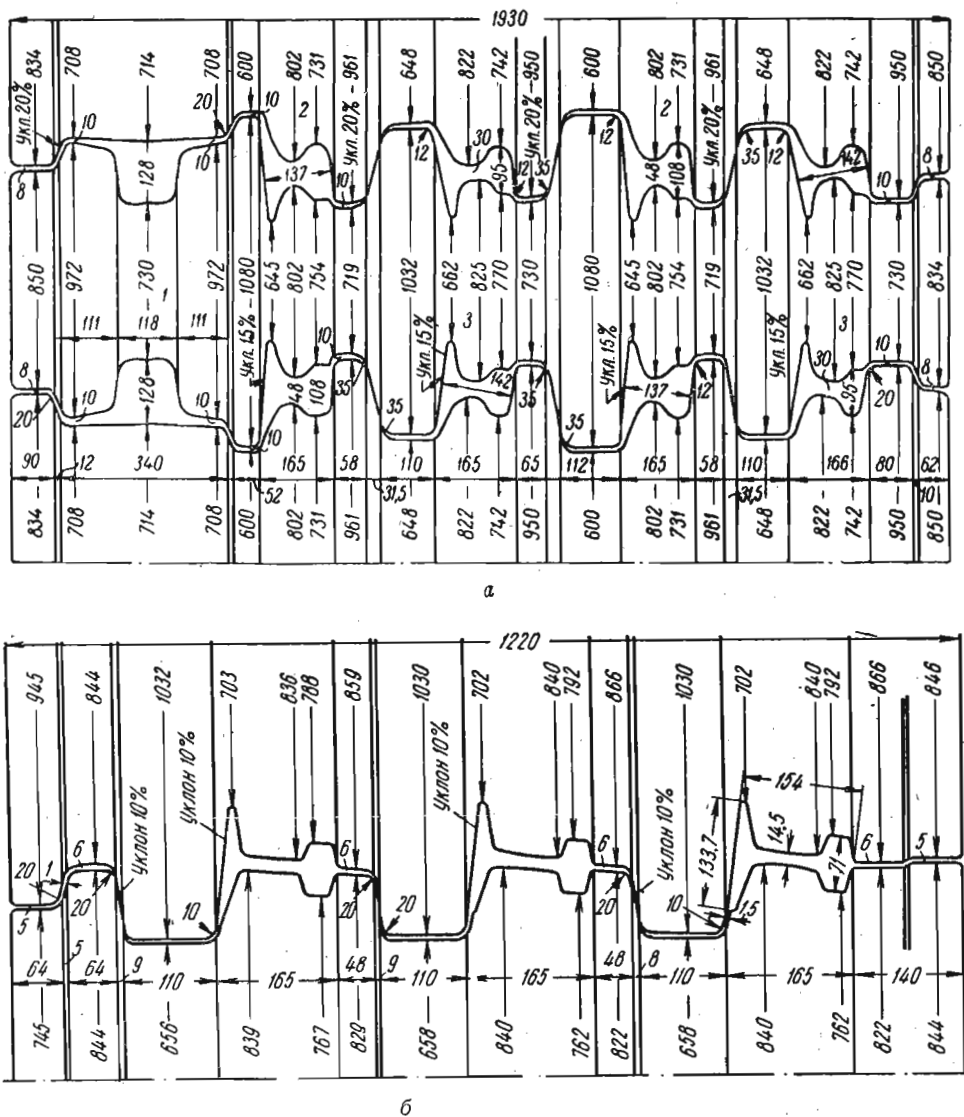
рации головки, что очень важно с точки зрения ее износостойкости. Малый зазор в разьеме по головке калибра и уклон верхней рабочей части головки в пределах 5—25% обеспечивают достаточно точное формирование головки в целом.

Чтобы предотвратить возможное защемление раската в калибре, последний располагают с некоторым наклоном к горизонтальной оси валков (рис. 209); угол наклона несколько больше  $1^\circ$ , что соответствует примерно 2%.

Расположение калибров на валках

Рельсовые калибры в валках могут быть расположены следующим образом: горизонтальные оси калибров и валков параллельны (прямое положение калибров); ось калибра составляет с горизонтальной осью валков угол  $\alpha$  (косое положение калибров). Прямое положение калибров применяют при прокатке рельсов узкой колеи, имеющих сравнительно небольшие и хорошо прорабатываемые объемы металла. Проработка основных элементов профиля (главным образом шейки и головки) осуществляется прямой высотной деформацией.

Для рельсов широкой колеи применяют косое положение калибров, поскольку в этом случае, что очень важно, обеспечивается объемная проработка металла. При косом положении калибра можно принимать повышенные коэффициенты деформации, создавать условия стесненного



Р и с. 210. Калибровка валков для прокатки рельса Р-50 на рельсоблочном стане:

а — черновая клеть; б — чистовая клеть

уширения для усиления объемной проработки металла без опасения заземления раската в калибре, восстанавливать первоначальные размеры калибра при меньшем съеме металла. Для рельсобалочных станов это имеет существенное значение. Косое положение рельсовых калибров в валках рационально вообще для всех рельсовых профилей, в том числе и для рельсов узкой колеи.

Наклон осей черновых калибров допускается в пределах 10—25% и более, а предчистовых калибров до 10—12%. Расположение черновых и чистовых калибров в валках показано на рис. 210.

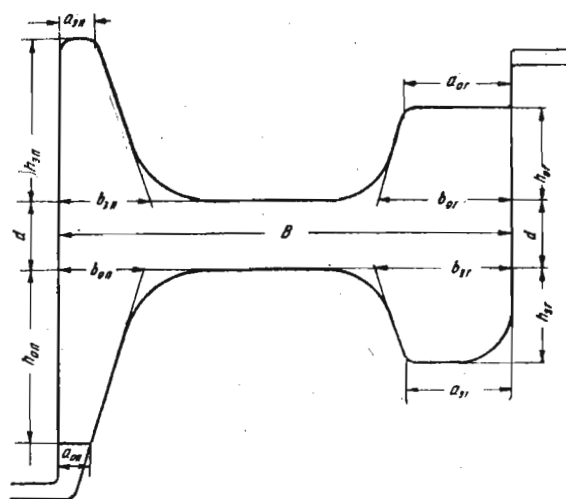
## Уширение при калибровке рельсов

Уширение в калибрах обуславливается особенностями деформации металла в каждом из них. Для тавровых калибров уширение принимают конструктивно при построении калибра.

В рельсовых калибрах условия деформации металла аналогичны условиям деформации в балочных калибрах. Поэтому уширение можно рассчитывать по уравнениям, рекомендованным для балок и швеллеров.

### Характер деформации металла в рельсовых калибрах

При определении размеров рельсового калибра делят его на элементы по характеру деформации металла в них. При этом каждый элемент характеризуется определенными размерами (рис. 211).



Р и с. 211. Рельсовый калибр с обозначением размеров его элементов

Суммарная вытяжка в рельсовых калибрах за 5—6 проходов обычно составляет  $\mu_{\text{общ}} = 2,7 \div 3,2$ , чему соответствует средний коэффициент вытяжки  $\mu_{\text{ср}} = 1,19 \div 1,22$ . Частные вытяжки по проходам распределяют так, чтобы в чистовом проходе была  $\mu \leq 1,06 \div 1,08$ . В остальных проходах против хода прокатки вытяжку увеличивают; в разрезном рельсовом калибре  $\mu = 1,3 \div 1,42$ . Вытяжку шейки принимают больше вытяжки профиля в черновых проходах и несколько меньше в чистовом и предчистовом.

В рельсовом профиле шейка развита меньше, чем в таких фланцевых профилях, как швеллер или двутавровая балка; кроме того, шейка значительно толще, поэтому энергичная деформация ее не вызывает опасения утяжки фланцев подошвы или головки.

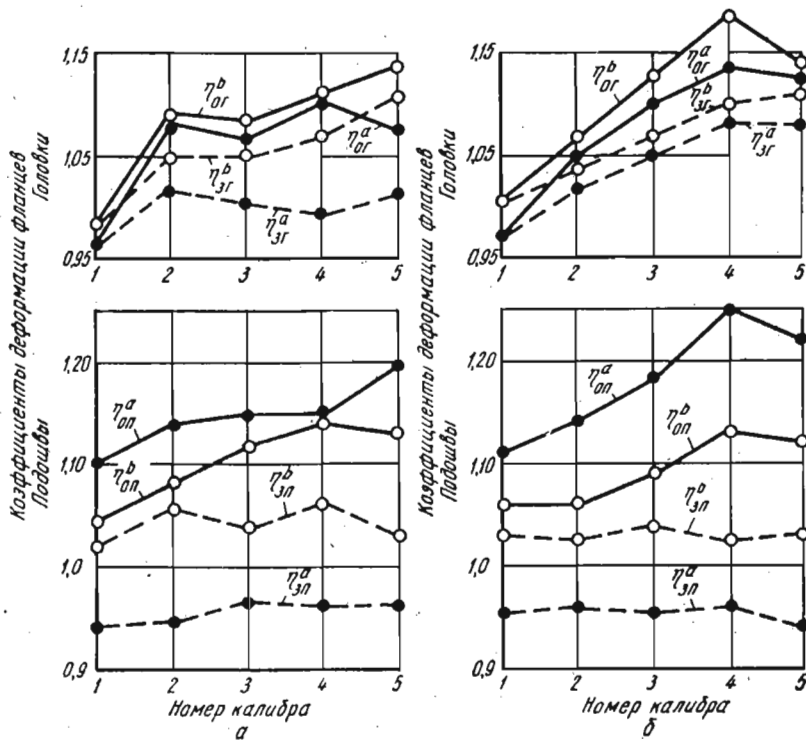


Рис. 212. Изменение коэффициентов деформации в калибрах при прокатке рельсов Р-43 по двум вариантам (а и б) калибровки

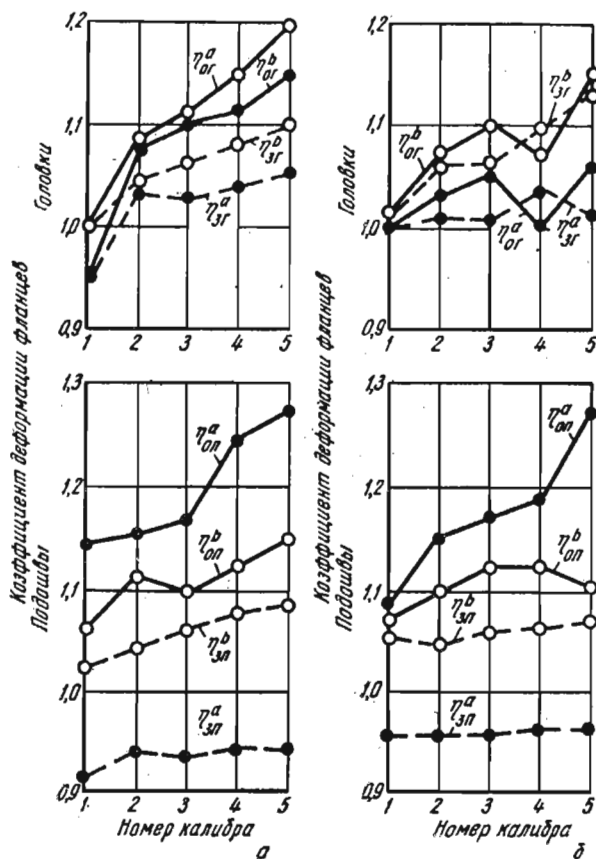
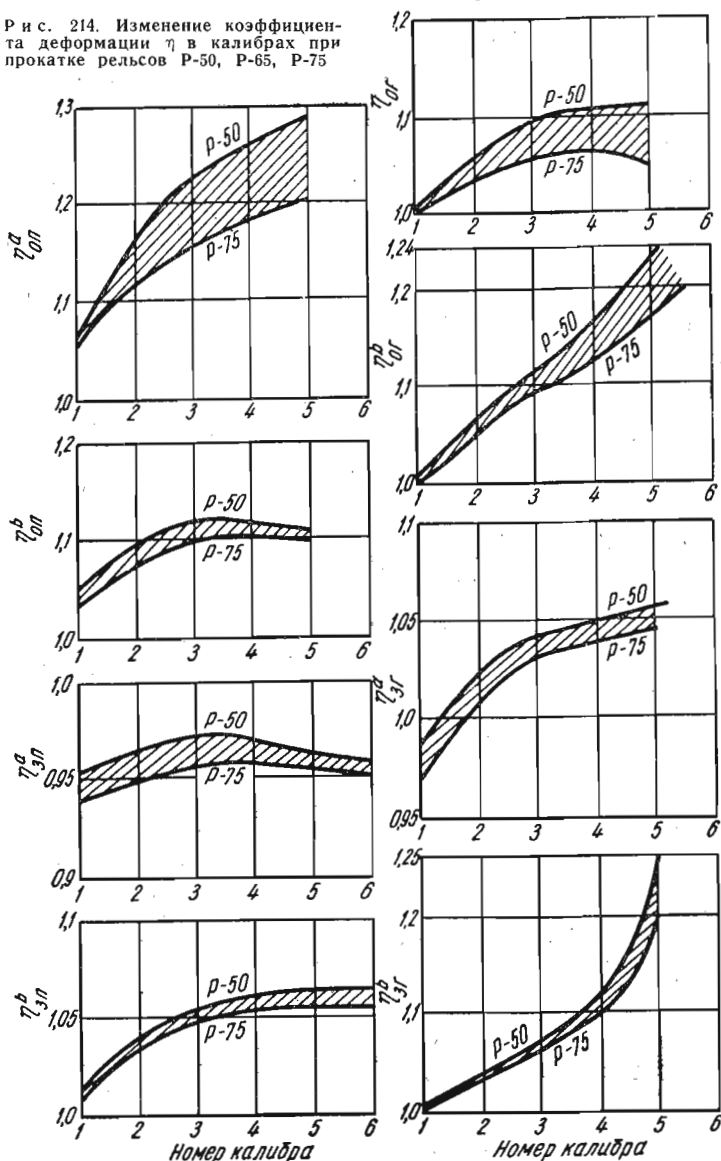


Рис. 213. Изменение коэффициентов деформации в калибрах при прокатке рельсов Р-65 по двум вариантам (а и б) калибровки. Кoeffициенты приемлемы и для рельсов Р-75

Более четко характер деформации в рельсовых калибрах можно представить через коэффициенты бокового обжатия фланцев головки и подошвы профиля (коэффициенты деформации). Все коэффициенты деформации фланцев головки и подошвы плавно возрастают от чистового прохода к черновому разрезному (рис. 212 и 213). В открытом фланце подошвы металл обжимается более энергично, чем в закрытом. При этом в открытом фланце обжатие на конце больше, чем у основания, тогда как в закрытом фланце наблюдается более энергичная деформация у основания. Это необходимо для того, чтобы облегчить проникновение металла в закрытую часть калибра.

Более массивная головка профиля деформируется несколько иначе (см. рис. 213); в открытой и закрытой частях калибра более энергично деформируются фланцы головки у основания. Это необходимо для предотвращения переполнения головки калибра ввиду того, что наряду с боковым обжатием головка получает некоторое обжатие по высоте.

Рис. 214. Изменение коэффициента деформации  $\eta$  в калибрах при прокатке рельсов Р-50, Р-65, Р-75



Для расчетов калибровки рельсов тяжелого типа Р-50, Р-65 и Р-75 могут быть рекомендованы графики изменения коэффициентов деформации, полученные в результате исследований в последние годы (рис. 214).

*Методика расчета рельсовых калибров по коэффициентам деформации элементов профиля*

Для расчета рельсовых калибров принимаем следующие обозначения (см. рис. 214).

$\eta_{ш} = \frac{d'}{d}$  — коэффициент высотной деформации шейки;

$\eta_{о.п}^a = \frac{a'_{зп}}{a_{оп}}$  — коэффициент деформации открытого фланца подошвы на конце;

$\eta_{о.п}^b = \frac{b'_{зп}}{b_{оп}}$  — коэффициент деформации открытого фланца подошвы у основания;

$\eta_{з.п}^b = \frac{b'_{оп}}{b_{зп}}$  — коэффициент деформации закрытого фланца подошвы у основания;

$\eta_{з.п}^a = \frac{a'_{оп}}{a_{зп}}$  — коэффициент деформации закрытого фланца подошвы на конце;

$\eta_{о.г}^a = \frac{a'_{зг}}{a_{ог}}$  — коэффициент деформации открытого фланца головки на конце;

$\eta_{о.г}^b = \frac{b'_{зг}}{b_{ог}}$  — коэффициент деформации открытого фланца головки у основания;

$\eta_{з.г}^a = \frac{a'_{ог}}{a_{зг}}$  — коэффициент деформации закрытого фланца головки на конце;

$\eta_{з.г}^b = \frac{b'_{ог}}{b_{зг}}$  — коэффициент деформации закрытого фланца головки у основания;

$\Delta h_{зп} = h'_{оп} - h_{зп}$  — обжатие в закрытом фланце подошвы;

$\Delta h_{оп} = h'_{зп} - h_{оп}$  — приращение в открытом фланце подошвы по высоте;

$\Delta h_{зг} = h'_{ог} - h_{зг}$  — утяжка (обжатие) в закрытом фланце головки;

$\Delta h_{ог} = h'_{зг} - h_{ог}$  — приращение в открытом фланце головки по высоте.

Коэффициенты деформации фланцев, обжатие (утяжку) и приращение рекомендуется принимать по соответствующим таблицам для двутавровых балок.

*Порядок расчета рельсовых калибров*

1. Принимаем на основании теоретических и практических данных среднее значение коэффициента высотной деформации шейки  $\eta_{шср} = 1,25 \div 1,32$ . Меньшие значения  $\eta_{шср}$  соответствуют рельсам более тяжелого типа (Р-65 и Р-75), а большие — рельсам легкого типа (Р-38).

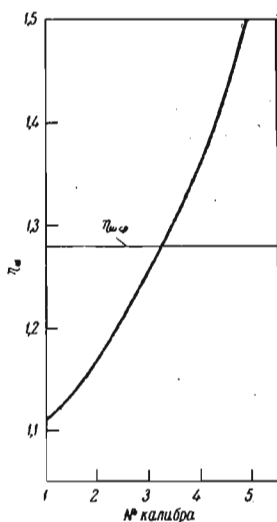


Рис. 215. Изменение коэффициентов деформации по проходам по шейке рельса

2. По величине  $\eta_{ш.ср}$  предварительно принимаем ряд частных коэффициентов с постепенным увеличением их от чистового калибра к черновому разрезному (рис. 215). Так как в рельсовом калибре нет опасности утяжки фланцев при энергичной деформации шейки, то можно и нужно предусматривать большие коэффициенты высотной деформации шейки в первых черновых рельсовых калибрах.

3. Уширение в чистовом калибре принимаем 1,5—3,0 мм с увеличением в каждом последующем проходе (против хода прокатки) на 0,5—1,0 мм. При очень большом просторе в калибре для уширения появляется опасность получения подошвы неправильного очертания.

4. Для расчета элементов подошвы профиля принимаем коэффициенты деформации из условия, что

$$\eta_0^a > \eta_0^b > \eta_3^b > \eta_3^a.$$

Все без исключения коэффициенты деформации возрастают от чистового калибра к черновому (рис. 216).

Принимаем график изменения обжатия (утяжки) и приращения фланцев по проходам (рис. 217). Зная эти величины, можно определить размеры основных элементов профиля. Радиусы закруглений элементов рельсового калибра следует принимать по рекомендациям применительно к калибрам двутавровых балок и швеллеров. Поэтому дополнительных расчетов не производим.

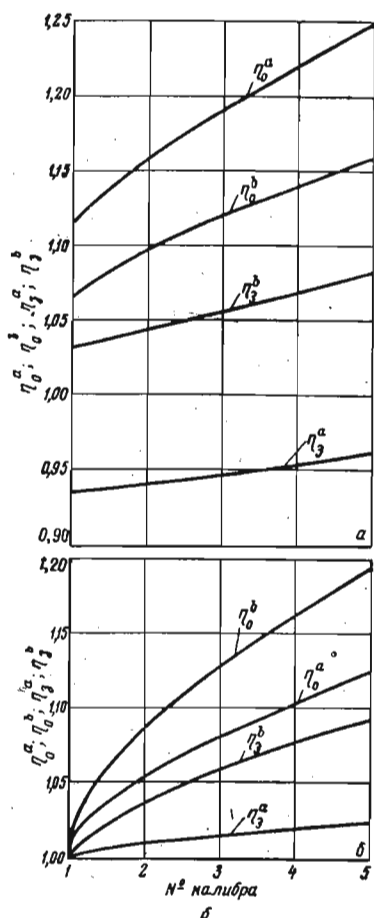


Рис. 216. Изменение коэффициентов деформации фланцев по проходам: а — фланцев подошвы; б — фланцев головки

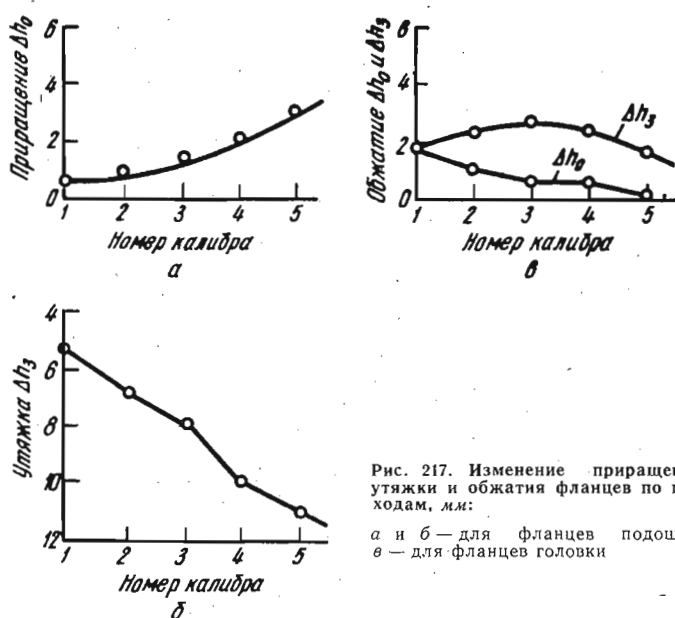


Рис. 217. Изменение приращения, утяжки и обжатия фланцев по проходам, мм:

а и б — для фланцев подошвы;  
в — для фланцев головки

### 3. Расчет калибровки рельса Р-50

Рассчитаем калибровку рельса Р-50 по коэффициентам деформации для прокатки на типовом рельсобалочном стане. Размеры профиля в холодном состоянии по ГОСТ 7174—63 приведены на рис. 218. Площадь профиля  $F=6580 \text{ мм}^2$ .

На основании условий деформации и анализа практических данных принимаем девять фасонных калибров. В первых трех проходах по ходу прокатки деформация осуществляется в тавровых калибрах с глубоким разрезанием ее для улучшения структуры металла. В последующих шести проходах металл деформируется в рельсовых калибрах.

Определяем размеры заготовки. Высота заготовки по уравнению (131)

$$H_{\text{заг}} = (1,5 \div 1,8) 152 = 228 \div 274 \text{ мм.}$$

Принимаем  $H_{\text{заг}} = 260 \text{ мм.}$

Ширина заготовки по уравнению (130)

$$B_{\text{заг}} = (2 \div 2,3) 70 = 140 \div 162 \text{ мм.}$$

Принимаем  $B_{\text{заг}} = 160 \text{ мм.}$

Отношение  $\frac{H_{\text{заг}}}{B_{\text{заг}}} = \frac{260}{160} = 1,62$  находит-

ся в допустимых пределах.

Общий коэффициент вытяжки профиля в фасонных калибрах

$$\mu_{\text{общ}} = \frac{0,965 \cdot 260 \cdot 160}{6580} = 6,1,$$

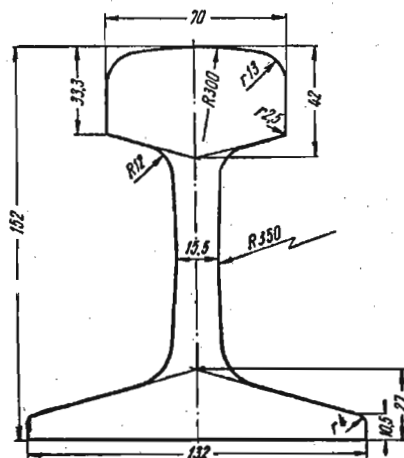


Рис. 218. Профиль рельса Р-50

где 0,965 — коэффициент, учитывающий уменьшение площади поперечного сечения заготовки за счет закруглений углов.

Средний коэффициент вытяжки при прокатке

$$\mu_{\text{ср}} = \sqrt[9]{6,1} = 1,22.$$

Расчет размеров калибров ведем против хода прокатки. При расчете будут использованы графики, представленные на рис. 215, 216 и 217.

#### Чистовой калибр

Размеры чистового калибра определяем по размерам готового профиля в горячем состоянии.

Ширина калибра

$$B_1 = 1,013 \cdot 152 = 154 \text{ мм};$$

толщина шейки

$$d_1 = 1,013 \cdot 15,5 = 15,7 \text{ мм}.$$

С учетом минусового допуска по толщине шейки принимаем  $d_1 = 15,5 \text{ мм}$ .

Площадь шейки

$$F_{\text{ш1}} = 15,5 \cdot 154 = 2387 \text{ мм}^2.$$

Определяем высоту фланцев подошвы:

$$h_{\text{оп1}} = h_{\text{зн1}} = \frac{132 - 15,5}{2} = 58,25 \text{ мм}.$$

Толщину фланцев подошвы у основания и у конца с учетом характера выработки рельсовых калибров принимаем по размерам профиля в холодном состоянии:

$$a_{\text{оп1}} = a_{\text{зн1}} = 10,5 \text{ мм}; \quad b_{\text{оп1}} = b_{\text{зн1}} = 25,1 \text{ мм}.$$

Площадь фланцев подошвы

$$F_{\text{оп1}} = F_{\text{зн1}} = 58,25 \cdot \frac{10,5 + 25,1}{2} = 1030 \text{ мм}^2.$$

Аналогично определяем размеры открытого и закрытого фланцев головки:

$$h_{\text{ог1}} = h_{\text{зг1}} = \frac{70 - 15,5}{2} = 27,25 \text{ мм};$$

$$a_{\text{ог1}} = a_{\text{зг1}} = 33,3 \text{ мм}; \quad b_{\text{ог1}} = b_{\text{зг1}} = 40,2 \text{ мм}.$$

Площадь фланцев головки без учета радиусов закругления

$$F_{\text{ог1}} = F_{\text{зг1}} = 27,25 \cdot \frac{33,3 + 40,2}{2} = 1000 \text{ мм}^2.$$

Общая площадь профиля без учета радиусов закруглений

$$F_1 = 2387 + 2 \cdot 1030 + 2 \cdot 1000 = 6447 \text{ мм}^2.$$

#### Второй калибр (предчистовой)

Шейка. Толщина шейки

$$d_2 = 15,5 \cdot 1,11 = 17,2 \text{ мм},$$

где 1,11 — коэффициент обжатия шейки профиля принимается по графику (см. рис. 215).

Уширение в чистовом калибре принимаем  $\Delta b_1 = 2$  мм. Тогда

$$B_2 = 154 - 2 = 152 \text{ мм.}$$

Площадь шейки

$$F_{ш2} = 17,2 \cdot 152 = 2620 \text{ мм}^2.$$

Открытый фланец подошвы. Принимаем по графику обжатие (утяжку) в закрытом фланце чистового калибра  $\Delta h_{зп1} = 5,5$  мм.

Тогда высота открытого фланца

$$h_{оп2} = 58,25 + 5,5 = 63,75 \text{ мм.}$$

Коэффициент бокового обжатия в закрытом фланце чистового калибра (см. рис. 216) находим по графику, тогда размеры открытого фланца предчистового калибра будут:

$$a_{оп2} = 10,5 \cdot 0,935 = 9,8 \text{ мм; } b_{оп2} = 25,1 \cdot 1,03 = 25,9 \text{ мм.}$$

Площадь фланца

$$F_{оп2} = 63,75 \cdot \frac{9,8 + 25,9}{2} = 1140 \text{ мм}^2.$$

Закрытый фланец подошвы. Принимаем по графику (рис. 217) приращение высоты в открытом фланце чистового калибра  $\Delta h_{он1} = 0,5$  мм. Тогда высота закрытого фланца

$$h_{зп2} = 58,25 - 0,5 = 57,75 \text{ мм.}$$

Толщина фланца на конце

$$a_{зп2} = 10,5 \cdot 1,115 = 11,7 \text{ мм.}$$

Толщина фланца у основания

$$b_{зп2} = 25,1 \cdot 1,065 = 26,8 \text{ мм.}$$

Площадь фланца

$$F_{зп2} = 57,75 \cdot \frac{11,7 + 26,8}{2} = 1110 \text{ мм}^2.$$

Открытый фланец головки. Учитывая характер деформации головки в чистовом калибре, принимаем по графику утяжку (обжатие) головки в закрытом и открытом фланцах одинаковой (одинаковым):

$$\Delta h_{ог1} = \Delta h_{зг1} = 1,75 \text{ мм.}$$

Тогда высота головки

$$h_{ог2} = 27,25 + 1,75 = 29 \text{ мм.}$$

Толщина фланца на конце

$$a_{ог2} = 33,3 \cdot 1,0 = 33,3 \text{ мм.}$$

Толщина фланца у основания

$$b_{ог2} = 40,2 \cdot 1,0 = 40,2 \text{ мм.}$$

Площадь фланца

$$F_{ог2} = 29 \cdot \frac{33,3 + 40,2}{2} = 1050 \text{ мм}^2.$$

Закрытый фланец головки. Учитывая одинаковый характер деформации головки по фланцам в чистовом калибре, размеры закрытого фланца головки во втором проходе принимаем равными размерам открытого фланца.

Общая площадь калибра

$$F_2 = 2620 + 1140 + 1110 + 2 \cdot 1050 = 6970 \text{ мм}^2.$$

Коэффициент вытяжки в чистовом калибре

$$\mu_1 = \frac{6970}{6447} = 1,08.$$

Остальные рельсовые калибры — третий, четвертый, пятый и шестой рассчитываются аналогично.

### Седьмой калибр (тавровый)

Размеры таврового калибра принимаем по размерам профиля, получаемого в разрезном рельсовом калибре, а также с учетом характера деформации металла в тавровом калибре.

Высота таврового калибра  $H$  зависит от ширины разрезного рельсового калибра и принимаемого в нем уширения. Учитывая неравномерность деформации металла в разрезном калибре, уширение в этом калибре следует принимать несколько больше, чем в последующих рельсовых калибрах. Принимаем  $\Delta b_6 = 6$  мм.

Следовательно, высота таврового калибра (см. рис. 219)

$$H_7 = B_6 - \Delta b_6 = 139 - 6 = 133 \text{ мм.}$$

Ширину  $a_7$  калибра по головке определяем по выражению (см. рис. 219):

$$a_7 = d_6 + h_{0..r6} + h_{3..r6} = 52,5 + 34,5 + 34,0 = 121,0 \text{ мм.}$$

Общую ширину таврового калибра  $b_7$  у основания принимаем на 30—40 мм больше, чем высота подошвы в разрезном рельсовом калибре:

$$b_7 = d_6 + h_{0..п6} + h_{3..п6} + (30 \div 40) = 52,5 + 80 + 70,5 + (30 \div 40) = 233 \div 243 \text{ мм.}$$

Принимаем  $b_7 = 240$  мм.

Ширину  $b'_7$  определяем исходя из уклона боковых стенок калибра, который для этого калибра принимаем в пределах 6—15%. Принимаем уклон боковых стенок таврового калибра равным 12%. Тогда

$$b'_7 = a_7 + 2H \cdot 0,12 = 121,0 + 2 \cdot 133 \cdot 0,12 = 152,8 \text{ мм.}$$

Толщину подошвы на конце  $h'_7$  принимаем с учетом свободного проникновения металла в закрытый фланец подошвы рельсового калибра, уменьшая толщину его на 0,5—1,0 мм против соответствующего размера в разрезном рельсовом калибре. Тогда

$$h'_7 = a_{3..п6} - (0,5 \div 1,0) = 15,6 - (0,5 \div 1,0) = 14,6 \div 15,1 \text{ мм.}$$

Принимаем  $h'_7 = 15$  мм.

Размер  $h''_7$  принимаем исходя из величины уклона внутренней грани закрытых фланцев подошвы в разрезном рельсовом калибре:

$$h''_7 = h'_7 + \frac{b_7 - b'_7}{2} \cdot 0,32 = 15 + \frac{240 - 152,8}{2} \cdot 0,32 = 29 \text{ мм,}$$

где 0,32 — коэффициент, равный тангенсу угла наклона внутренней грани закрытого фланца подошвы в разрезном рельсовом калибре.

Площадь калибра без учета радиусов закругления

$$F_7 = \frac{a_7 + b'_7}{2} \cdot H_7 + 2 \frac{h'_7 + h''_7}{2} \cdot \frac{b_7 - b'_7}{2} = \\ = \frac{121,0 + 152,8}{2} \cdot 133 + \frac{1}{2} (15 + 29) \cdot (240 - 152,8) = 20100 \text{ мм}^2.$$



Коэффициент вытяжки в шестом калибре

$$\mu_6 = \frac{20\,100}{14\,650} = 1,37,$$

где  $F_6 = 14650 \text{ мм}^2$  (расчет опущен).

Далее тавровые калибры рассчитываем в зависимости от выбранной схемы прокатки и числа принятых тавровых калибров. При этом могут быть различные варианты решения, поэтому расчет заканчиваем на первом тавровом калибре. По данным расчета на рис. 219 показаны чертежи калибров.

\* \* \*

Установленный объем книги не позволяет рассмотреть калибровку таких сложных несимметричных профилей, широко применяемых в народном хозяйстве, как лемешная сталь, автообод, рельсовая подкладка и многие другие.

Расчет калибровки этих профилей и определение режимов обжатий сопряжены с рядом трудностей, подчас исключающих возможность применения аналитических методов. Часто приходится прибегать в этих случаях к инженерным методам — принимать отдельные размеры конструктивно. Однако всегда следует руководствоваться принципами расчета, основанными на законах формоизменения металлов, максимально использовать пластичность металла при данных условиях прокатки.

При калибровке профиля, не имеющего осей симметрии, может быть рекомендован следующий порядок расчета.

Определяют такое положение профиля в валках, чтобы можно было с известным приближением разделить его на расчетные элементы. К расчетным элементам относятся части профиля, по которым можно принимать значения коэффициентов деформации, рассчитывать обжатие, уширение, среднюю вытяжку и другие величины деформации.

Определяют чередование места разъема валков по проходам с расчетом минимальной глубины вреза ручьев в валки.

Принимают коэффициенты деформации по расчетным элементам профиля. При выборе коэффициентов деформации следует руководствоваться их величинами при прокатке профилей, к которым приближаются по своей форме данные расчетные элементы профиля. Если, например, расчетный элемент близко напоминает угловую сталь, то надо принимать коэффициенты деформации, примерно соответствующие рекомендованным для угловой стали, и т. д.

Если профиль имеет элементы, получение которых связано с постоянством некоторых размеров в переходных сечениях, то при конструировании калибров необходимо выдерживать эти размеры постоянными по проходам.

При выборе коэффициентов высотной деформации или вытяжек по расчетным элементам профиля необходимо стремиться к тому, чтобы неравномерная деформация по ширине профиля была максимальной в первых проходах по ходу прокатки, когда металл имеет высокую температуру. В направлении к чистовому проходу неравномерность деформации должна уменьшаться.

При выборе коэффициентов деформации также следует учитывать возможность перетекания металла из одних элементов профиля в другие с тем, чтобы получить требуемые размеры готового профиля по всем его элементам.

## Часть шестая

# ВАЛКОВАЯ АРМАТУРА. ВАЛЬЦЕТОКАРНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

---

## Глава XVII

### ВАЛКОВАЯ АРМАТУРА

#### 1. Назначение и классификация арматуры

Прокатка любого профиля высокого качества невозможна без применения валковой арматуры. Назначение валковой арматуры сводится к направлению прокатываемого металла при входе в валки, выходе из валков, удержанию его в калибре при обжати и кантовке раската на определенный угол. В то же время валковая арматура может служить причиной появления поверхностных дефектов на готовом профиле. Поэтому вопросам расчета, проектирования, изготовления, установки и службы валковой арматуры на стане должно уделяться очень серьезное внимание.

В настоящее время валковую арматуру подразделяют на: вводную, выводную и кантовочную.

На современных прокатных станах всех типов устанавливают главным образом арматуру качения (роликовую арматуру). Это относится ко всем группам арматуры.

Роликовая арматура имеет ряд существенных преимуществ, по сравнению с арматурой скольжения, широко применявшейся ранее. Эти преимущества сводятся к следующему.

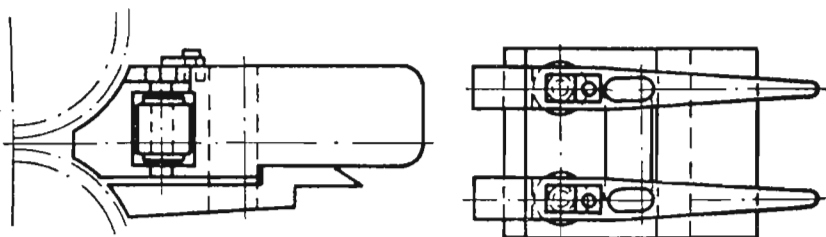
Обеспечивается высокое качество поверхности прокатанного металла, так как между соприкасающимися поверхностями раската и вращающихся роликов отсутствуют относительные смещения. Следовательно, основные причины, способствующие образованию на прокатанном металле царапин, рисок, подрезов и других поверхностных дефектов, исключаются.

Уменьшается расход энергии на кантовку раската по выходе из валков.

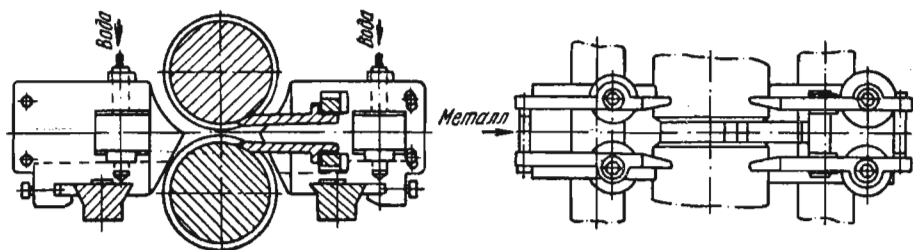
Облегчается подача прокатываемого металла в валки.

Упрощается процесс настройки и сокращается время настройки как отдельных клетей, так и в целом всего стана, что способствует увеличению его производительности. Повышается и точность размеров прокатываемых профилей.

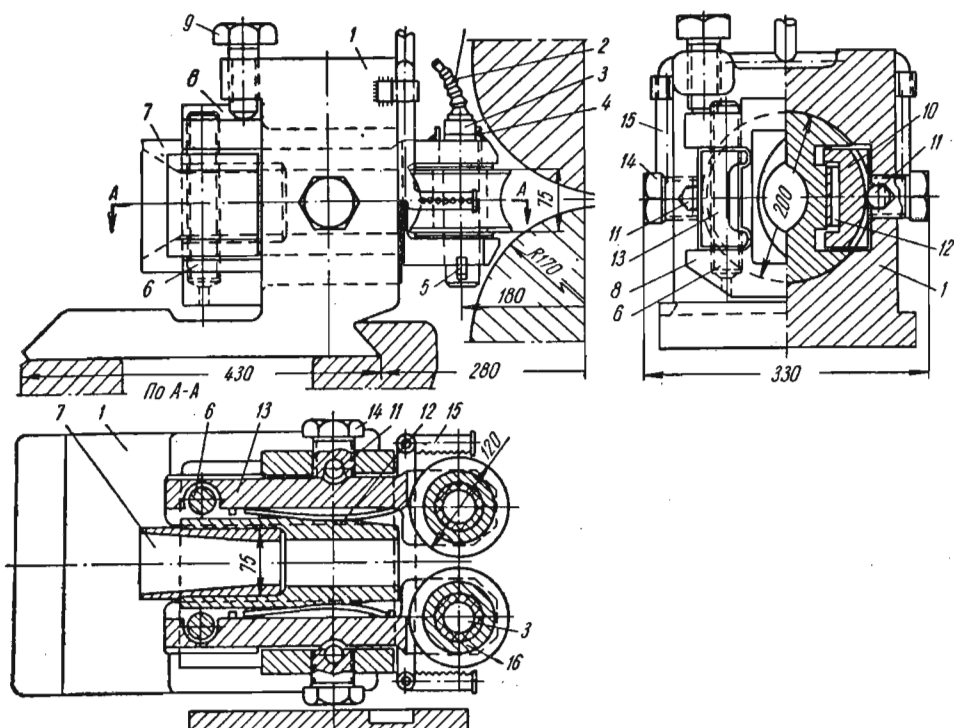
Стойкость арматуры качения в десятки раз выше, чем арматуры скольжения, и это значительно снижает число комплектов роликовой арматуры. Кроме того, при этом обеспечивается большая устойчивость процесса прокатки.



Р и с. 220. Роликовые вводные линейки



Р и с. 221. Роликовая арматура черновых клетей стана 300



Р и с. 222. Вводная проводка Магнитогорского металлургического комбината (ММК):

1 — корпус проводки; 2 — штуцер для подвода смазки; 3 — ось ролика; 4 — фиксатор оси; 5 — клин для крепления оси; 6 — палец; 7 — направляющий вкладыш; 8 — поворотная втулка; 9 — стопорные болты; 10, 13 — правый и левый роликодержатели; 11 — шарик; 12 — возвратная пружина; 14 — регулировочные болты; 15 — трубка с брызгалами для подачи воды на ролики; 16 — удерживающие ролики

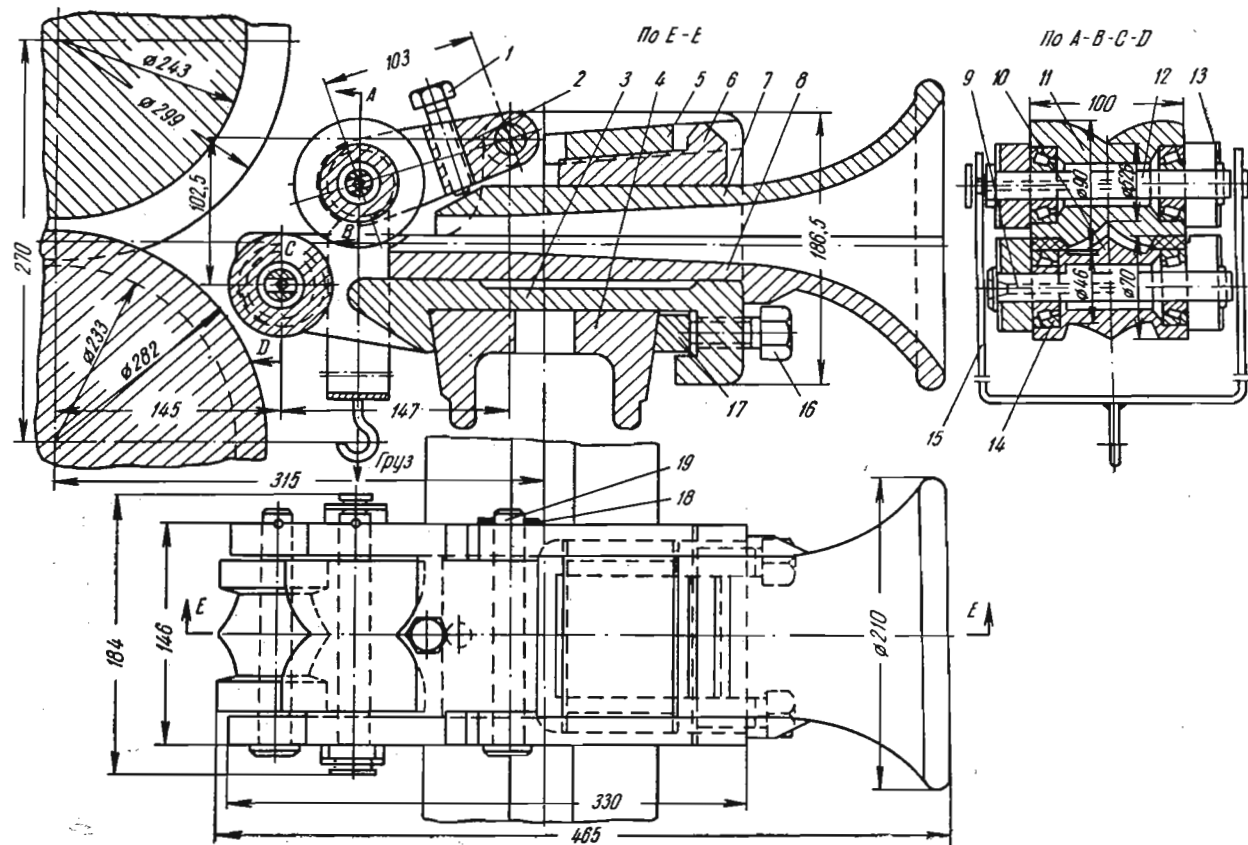


Рис. 223. Вводная роликовая проводка для фасонных профилей (угловой стали):

- 1 — регулировочный болт; 2 — серьга;  
 3 — корпус проводки; 4 — проводковый брус;  
 5 — брус; 6 — клин; 7, 8 — верхний и нижний направляющие пропуски;  
 9, 12 — оси роликов; 10, 11 — нижний и верхний удерживающие ролики;  
 13 — фиксатор оси; 14 — роликоподшипник;  
 15 — скоба; 16 — болт; 17 — сухарь;  
 18 — штифт; 19 — ось

При замене арматуры качения или ее ремонте сменяют лишь ролики, а остальные детали используют весьма продолжительное время. Таким образом, стоимость комплекта роликовой арматуры за весь срок его службы получается незначительной по сравнению с комплектом арматуры скольжения.

### *Требования, предъявляемые к валковой арматуре*

В связи с различным назначением арматуры, устанавливаемой на стане, и требования, предъявляемые к ней, различны. Вводная и выводная арматура, в том числе и кантовальная, должна удовлетворять следующим основным требованиям:

- 1) обеспечивать получение качественного профиля;
- 2) обеспечивать быструю настройку стана и быструю регулировку положения полосы в арматуре и калибре;
- 3) иметь простое, но в то же время жесткое крепление;
- 4) иметь минимальные габаритные размеры, чтобы можно было максимально использовать длину бочки валков.

Конструкция арматуры должна быть по возможности универсальной и простой, обеспечивающей быструю смену изношенных деталей и изготовление их на месте, в цехе.

## **2. Вводная валковая арматура**

Задачами вводной арматуры являются:

- 1) центрирование прокатываемого металла по всей длине относительно оси калибра;
- 2) удержание раската в процессе прокатки в определенном положении, предупреждение его «сваливания» или скручивания относительно продольной оси.

По своей конструкции вводная арматура может быть либо в виде направляющих линеек с роликами (прокатка узкополосной стали, швеллеров, балок, рельсов), либо в виде коробок с вмонтированными в них роликовыми пропусками. Последние применяют при прокатке некоторых простых и фасонных профилей (угловая, квадратная, круглая сталь, периодический профиль арматурной стали).

Вводная роликовая арматура различных типов конструктивного исполнения показана на рис. 220—222.

Так как роликовые пропуска служат не только для направления раската, но и удержания его, то ролики арматуры должны монтироваться в упругих опорах, представляющих собой пружины. Такое конструирование роликовых пропусков необходимо в связи с тем, что в процессе прокатки возможно отклонение толщины раската от номинальной, в соответствии с которой и установлены эти пропуска. Обычно так конструируют пропуска для прокатки круглой и квадратной стали, периодического профиля арматурной стали и других профилей.

Несколько иную конструкцию имеет вводная арматура для угловой стали. В связи с тем что в этом случае она выполняет главным образом роль направляющей, то и ролики в коробке арматуры расположены горизонтально (рис. 223). Калибровка роликов (их профилировка) определяется конфигурацией входящего раската. Подобная конструкция вводной коробки с роликовыми пропусками может быть применена и при прокатке зетовой стали.

### 3. Выводная валковая арматура

На всех клетях сортовых станов, как правило, применяют верхнее давление валков. При этом раскат отгибается книзу. Поэтому выводные проводки устанавливают на нижний валок.

Часто требуется и установка выводных линеек, предотвращающих боковое перемещение раската (рис. 224). На современных станах считают рациональнее устанавливать специальные выводные коробки (рис. 225). В таких коробках более жестко крепятся и легче регулируются линейки с роликами.

Рис. 224. Роликовая выводная линейка

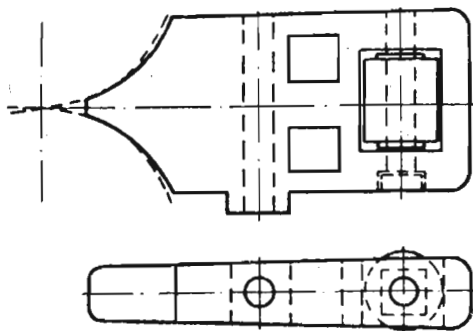
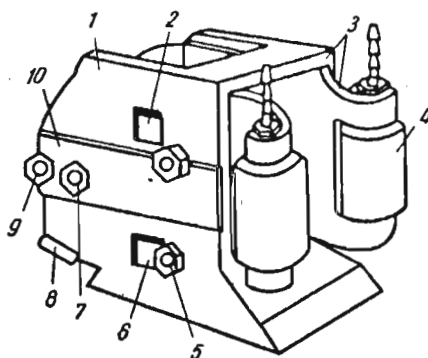


Рис. 225. Выводная арматура среднесортного стана 300 ММК:

1 — корпус; 2, 6 — отверстия для размещения опор проводок; 3 — роликовые линейки; 4 — ролик; 5, 9 — регулировочные болты; 7 — соединительный болт; 8 — брусок; 10 — плоская пружина



Если же прокатывают профиль более сложного сечения, например угловую сталь, и требуется на выходе удерживать раскат в определенном положении, то возможно применение верхней и нижней выводных проводок роликового типа.

### 4. Выводная кантующая арматура

Более сложной по конструкции и настройке является выводная кантующая арматура роликового типа. Эта арматура по своей конструкции может быть разделена на типы: с одним калибром и с расположением нескольких калибров на бочке кантующих роликов (валков). Роликовую арматуру с одним калибром применяют большей частью на



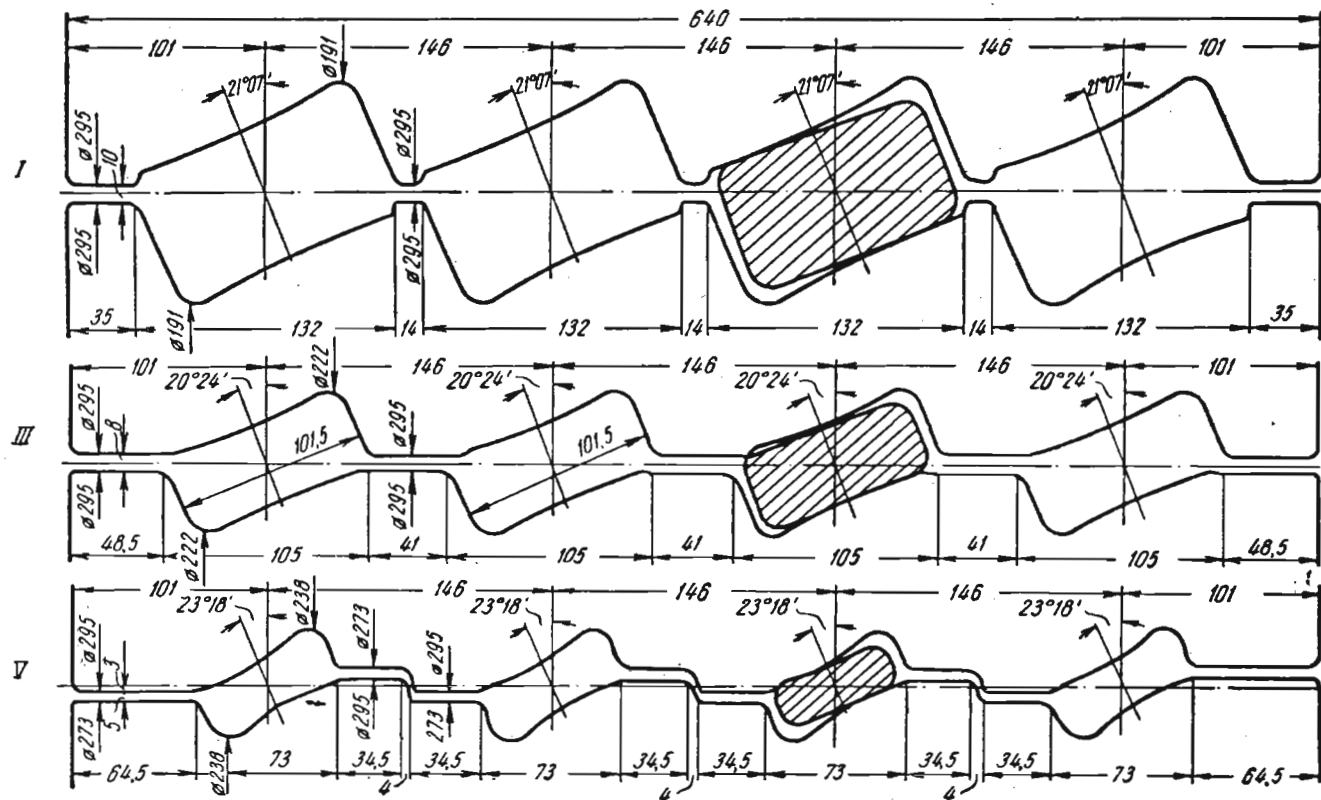


Рис. 227. Кантующие валки I, III и V  
клетей стана 250

вия прокатываемого металла выводная кантующая арматура. Таким образом выводная кантующая арматура будет работать под полным усилием скручивания раската только до момента, когда передний конец будет захвачен прокатными валками последующей клетки.

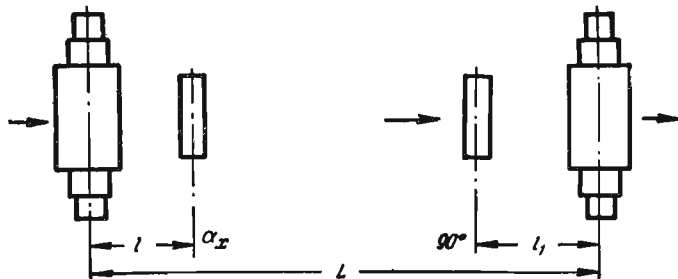


Рис. 228. Схема кантовки при наличии вводной арматуры в последующей клетке

### Определение размеров калибров кантующих роликов (валков)

Методика определения размеров калибров кантующих роликов (валков) сводится к следующему (рис. 229).

Определив угол  $\alpha_x$ , проводят взаимно перпендикулярные оси  $x—x$  и  $y—y$ .

Под углом  $\alpha_x$  в точке пересечения осей проводят «оси кантовки»  $x'—x'$  и  $y'—y'$  и относительно их вычерчивают сечение кантуемого

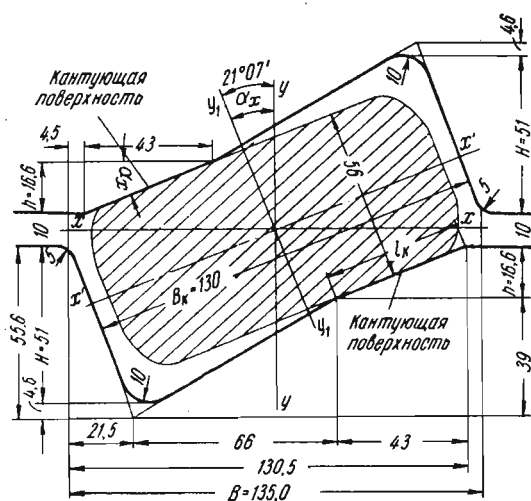


Рис. 229. Калибр кантующих роликов (валков) и положение в нем раската

раската в соответствии с размерами того калибра, где этот раскат прокатывался.

Длину рабочей (кантующей) части калибра, по которой металл соприкасается с кантующими роликами (валками), принимают равной  $l_k = (0,3 \div 0,35) B_p$ , где  $B_p$  — ширина кантуемого раската.

Принимают зазор в кантующем калибре, равный зазору между прокатными валками в данной клетке.

По оси  $x'—x'$  откладывают точки, определяющие общую ширину кантующего калибра

$$B_k = B_p + (8 \div 10) \text{ мм.}$$

Через отложенные точки на оси  $x' - x'$  проводят линии, перпендикулярные оси  $x' - x'$  и параллельные оси  $y' - y'$ .

Высоту ручья кантующего калибра  $H$  принимают конструктивно, но с расчетом, чтобы после закругления угла в ручье расстояние между раскатом и дном ручья составляло примерно 8—10 мм. Радиусы закругления углов кантующего калибра принимают такими же, как и у калибра прокатной клетки. Все остальные размеры кантующего калибра принимают конструктивно.

Горизонтальная проекция общей ширины кантующего калибра  $B$  должна быть больше горизонтальной проекции кантуемого раската также на величину 8—10 мм.

По построенному кантующему калибру вычерчивают и изготавливают шаблон, необходимый для расточки кантующих роликов (валков).

Приведенная методика является общей для разнообразных форм переходных сечений.

### *Калибровка кантующих роликов (валков)*

Калибровка одноручьевых роликов сводится к врезу ручья на каждом из них (см. рис. 226). Диаметр роликов обычно принимают конструктивно с расчетом максимального приближения роликов к рабочим валкам, чтобы раскат точно попадал в кантующий калибр. Длину бочки кантующих роликов принимают также конструктивно. При калибровке многоручьевых кантующих роликов (их чаще называют кантующими валками) необходимо учитывать следующие особенности.

Расстояния между вертикальными осями кантующих калибров должны быть в строгом соответствии с калибровкой прокатных валков. Шаг между калибрами кантующих и прокатных валков должен быть одинаков.

Размеры и форму промежуточных и крайних буртов определяют конструктивно в соответствии с размерами рабочих валков. Диаметры по элементам бочки кантующих валков определяют после их калибровки.

Число калибров на кантующих валках должно быть равным числу калибров, расположенных на прокатных валках. Это необходимо для того чтобы не перемещать кантующее приспособление, если производится переход на прокатку в других калибрах на рабочих валках.

В соответствии с этими положениями на рис. 227 показана калибровка кантующих валков *I, III, V* клеток одного из непрерывных проволочных станов 250.

## ВАЛЬЦЕТОКАРНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

## 1. Шаблоны и контршаблоны, применяемые при расточке валков

Расчет калибровки любого профиля заканчивается вычерчиванием калибров по проходам, вычерчиванием калибровки прокатных валков, а при установке кантующей арматуры — дополнительным вычерчиванием калибров кантующих роликов или кантующих валков. Конечной стадией калибровки является расточка прокатных валков, кантующих роликов и валков.

Расточка прокатных валков, равно как и кантующих роликов и валков, возможна только при изготовлении шаблонов: одинарных, парных и шаговых. Одинарные шаблоны соответствуют конфигурации верхнего или нижнего ручьев данного калибра. В ряде случаев шаблоны изготовляют по форме всего калибра (рис. 230). В связи с тем что в процессе использования шаблонов они изнашиваются, для проверки их размеров к каждому из них обязательно изготавливается контршаблон. Контршаблоны служат и для заточки резцов. Ручьевые (половинные) шаблоны применяют для контроля расточки всех открытых калибров.

Цельные шаблоны, конфигурация которых соответствует расчетной форме всего переходного сечения раската, применяют для контроля расточки всех закрытых калибров, а также тех открытых калибров, положение ручьев которых строго фиксируется. Одинарные шаблоны и контршаблоны к ним являются основным контролирующим инструментом для измерения правильности вреза верхнего и нижнего ручьев на валках.

Врез ручьев на бочке каждого валка начинается с вреза первого крайнего калибра. Поэтому в зависимости от формы крайнего ручья, в

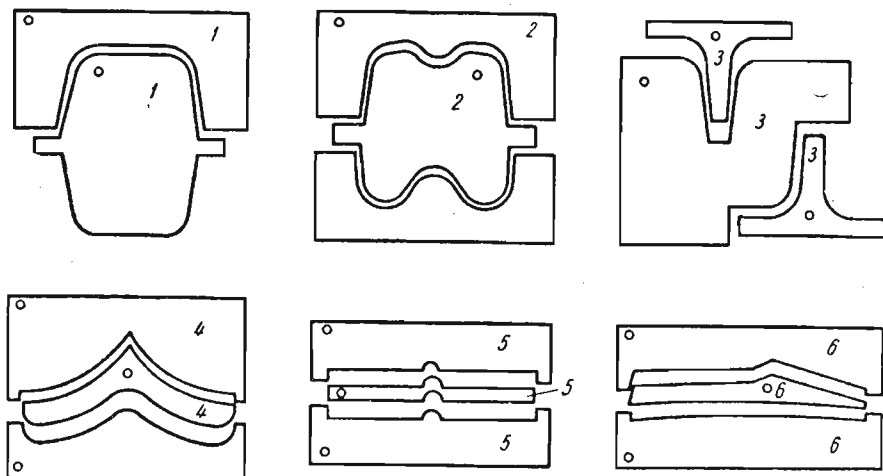
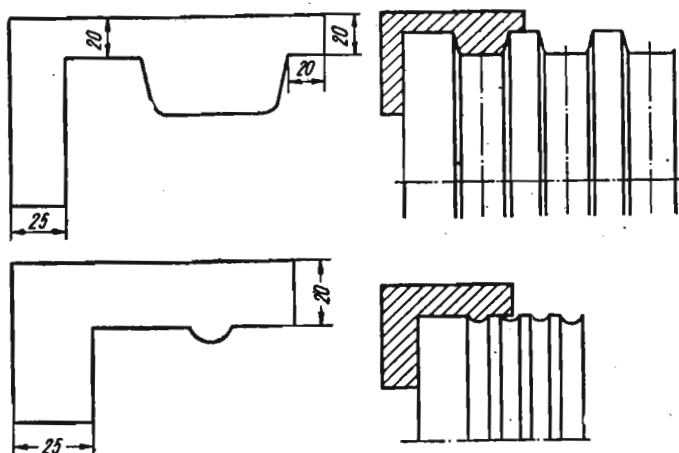
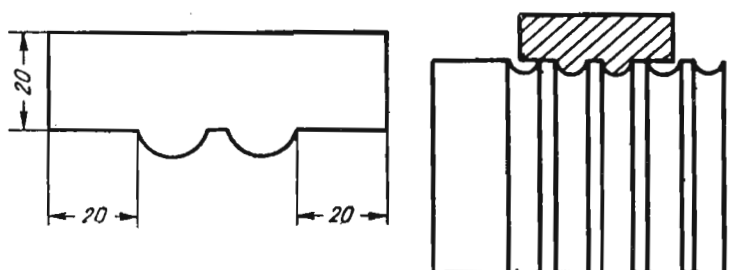


Рис. 230. Цельные шаблоны и контршаблоны:

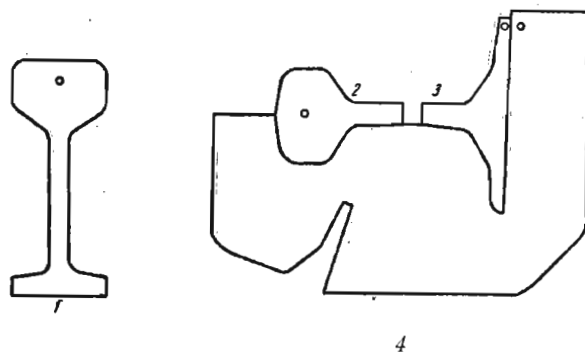
1 — ящичного калибра; 2 — швеллерного калибра; 3 — таврового калибра; 4 — калибра угловой стали; 5 — калибра рессоры; 6 — калибра лемешной стали



Р и с. 231. Шаблоны для крайних ручьев, врезаемых в валки



Р и с. 232. Шаговые шаблоны для точного вреза ручьев на бочке валков



Р и с. 233. Комплект шаблонов чистового рельсового калибра:

1 — шаблон для контроля расточки ширины калибра; 2 — шаблон для контроля расточки головки калибра; 3 — шаблон для контроля расточки подошвы калибра; 4 — контршаблон

соответствии с калибровкой валков изготовляют шаблоны для крайнего калибра. На рис. 231 показаны шаблоны для различных ручьев крайнего калибра. При изготовлении шаблонов необходимо точно соблюдать расчетные размеры, определенные при калибровке валков. После крайнего ручья врез остальных ручьев на бочке валка осуществляется с применением шаговых шаблонов (рис. 232).

Весьма ответственным является врез ручьев в чистовые валки. Поэтому для чистовых валков в зависимости от сложности профиля изготовляют несколько шаблонов. Так, для рельсов изготовляют шаблоны для контроля ширины калибра при расточке, для контроля размера го-

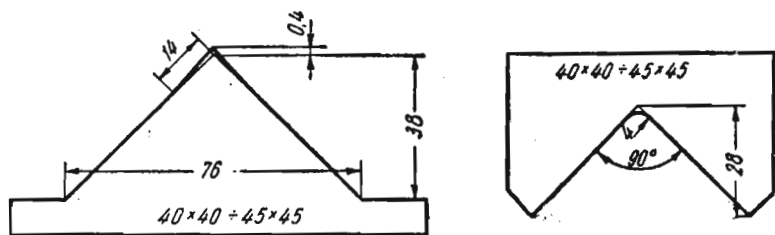


Рис. 234. Шаблоны для верхнего и нижнего ручьев угловой стали (чистовая клеть)

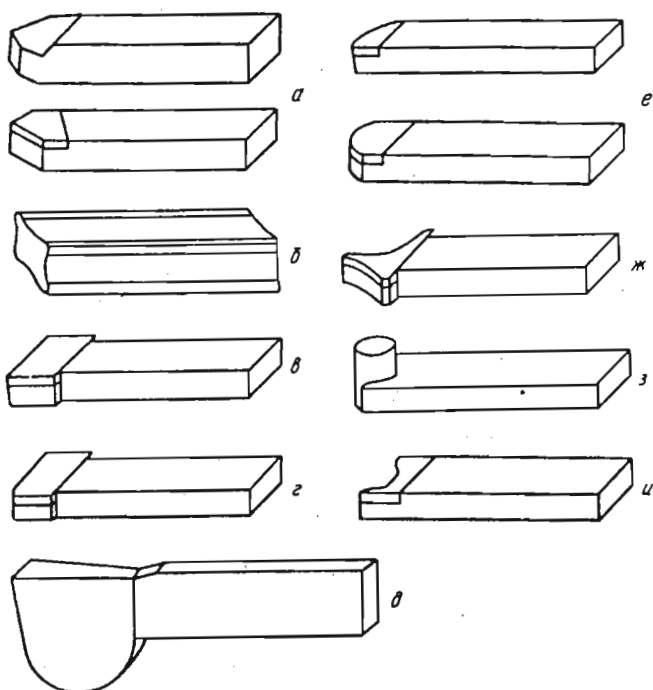
ловки и подошвы профиля; соответственно изготовляют и контршаблоны к ним (рис. 233).

На рис. 234 показаны шаблоны для вреза верхнего и нижнего ручьев для угловой стали на чистовой клетю.

## 2. Инструменты, применяемые в вальцетокарном производстве

В качестве инструментов, применяемых в вальцетокарном производстве, используют резцы (рис. 235). Форма резцов определяется как конфигурацией элемента калибра, который врезают в валок, так и их назначением. Если резец выполняет определенную роль в самом формировании ручья, то его затачивают по соответствующему контршаблону. Перед врезанием ручьев вначале производят полную подготовку валков, заключающуюся в обточке их бочки и шеек. Для этой цели применяют проходные резцы *а*, у которых режущее лезвие располагается под определенным углом к обрабатываемой поверхности. Обычно такие резцы используют при механической подаче суппорта. В случае ручной подачи при обточке валков, имеющих высокую твердость, применяют проходные «крестообразные» резцы *б*. Обработку бочки, шеек и тrefов, а также черновую обработку ручьев при ручной подаче осуществляют проходными резцами *в* с державкой прямоугольного сечения. Разновидностью этих резцов являются прорезные *г*, предназначенные для прорезания тела валка в направлении, перпендикулярном его оси до определенного диаметра. Для удаления литейных прибылей, уменьшения длины бочки и шеек валков, формирования буртов применяют отрезные резцы *д* специальной формы.

Обработку внутренних галтелей — мест перехода между цилиндрическими элементами валка (шейками и бочкой) — выполняют галтельными резцами *е*, у которых режущее лезвие имеет строго определенный радиус закругления. Для обработки внешних галтелей также применяют галтельный резец *ж*, у которого режущая кромка имеет обратный



Р и с. 235. Резцы, применяемые в вальцетокарном производстве:

а — проходные для обработки бочки и шеек валков; б — проходной «крестообразный»; в — проходной прямоугольный; г — прорезной; д — отрезной; е — галтельный для получения внутренних галтелей; ж — галтельный для получения внешних галтелей; з — для врезки ручьев круглого калибра (пробка); и — фасонный для врезки ручьев рельсов узкой колеи

радиус закругления по сравнению с предыдущим резцом. При расточке круглых и квадратных калибров могут применяться специальные резцы з.

В настоящее время нашли широкое применение резцы, оснащенные пластинами твердого сплава. Пластина фасонной формы может быть получена при спекании порошков или заточена после припаивания ее к резцу.

Наиболее широкий класс по разновидности форм представляют собой резцы для расточки фасонных калибров. Например, на рис. 235, и показан резец для врезки ручьев рельсов узкой колеи.

В последние годы в вальцетокарном производстве в качестве заключительной операции все чаще применяют обработку калибров абразивными кругами. При этом значительно увеличивается стойкость калибров против износа.

## ЛИТЕРАТУРА

- Бахтинов Б. П. и Штернов М. М. Калибровка прокатных валков. Металлургиздат, 1953.
- Бейнон Р. Е. Калибровка валков и расположение прокатных станов. Металлургиздат, 1961.
- Бояршинов М. И., Шулаев И. П. Сталь, 1959, № 2, с. 137.
- Виноградов А. П. и Виноградов Г. А. Калибровка прокатных валков. Металлургиздат, 1950.
- Громов Н. П. Теория обработки металлов давлением. Изд-во «Металлургия», 1967.
- Грум-Гржимайло В. Е. Прокатка и калибровка. Кубуч, 1933.
- Губкин С. И. Теория обработки металлов давлением. Металлургиздат, 1947.
- Диомидов Б. Б. и др. Резервы прокатного производства. Изд-во «Металлургия», 1965.
- Королев А. А. Механическое оборудование прокатных цехов. Изд-во «Металлургия», 1965.
- Литовченко Н. В. Горячая прокатка толстых и средних листов. Металлургиздат, 1955.
- Литовченко Н. В., Диомидов Б. Б. Повышение производительности прокатных станов. Металлургиздат, 1958.
- Литовченко Н. В., Диомидов Б. Б., Курдюмова В. А. Калибровка валков сортовых станов. Металлургиздат, 1963-64.
- Мерекин Б. В. Некоторые вопросы калибровки прокатных валков. Изд-во «Металлургия», 1964.
- Мутьев М. С. Калибровка черновых валков. Изд-во «Металлургия», 1964.
- Павлов И. М. Теория прокатки и основы пластической деформации металлов. ГОНТИ, 1938.
- Полухин П. И. Прокатка и калибровка двутавровых балок. Металлургиздат, 1956.
- Полухин П. И. и др. Прокатное производство. Изд-во «Металлургия», 1968.
- Северденко В. П. Теория обработки металлов давлением. Изд-во «Высшая школа», Минск, 1966.
- Смирнов В. С. Теория прокатки. Изд-во «Металлургия», 1967.
- Смирнов В. С., Богоявленский К. Н., Павлов Н. Н. Калибровка валков. Металлургиздат, 1953.
- Смирнов В. С., Григорьев А. К., Давильбеков Н. Х. Деформация металла в ромбических и овальных калибрах. Изд-во «Металлургия», 1967.
- Старченко Д. И. Развернутая калибровка фасонных профилей. Металлургиздат, 1952.
- Тарновский И. Я. Формоизменение при пластической обработке металлов. Металлургиздат, 1954.
- Федин В. П. и Грицук Н. Ф. Современная валковая арматура сортовых и заготовочных станов. Информация института «Черметинформация», 1965, серия 6, № 5.
- Хофф Х., Даль Т. Прокатка и калибровка. Металлургиздат, 1957.
- Целиков А. И., Федосов Н. М., Соколов А. А. Прокатка стали. Металлургиздат, 1943.
- Целиков А. И. Основы теории прокатки. Изд-во «Металлургия», 1965.
- Чекмарев А. П. и др. Производство облегченных профилей проката. Изд-во «Металлургия», 1965.
- Чекмарев А. П., Побегайло Г. Г. Точная прокатка сортовых профилей. Изд-во «Металлургия», 1968.
- Чекмарев А. П., Чернобривенко Ю. С. Роликовая арматура прокатных станов. Изд-во «Металлургия», 1964.
- Чижиков Ю. М. Прокатное производство. Металлургиздат, 1958.