

В. С. СМЕРНОВ  
К. Н. БОГОЯВЛЕНСКИЙ, Н. Н. ПАВЛОВ

# КАЛИБРОВКА ПРОКАТНЫХ ВАЛКОВ

*Металлургия* издат  
1 9 5 3

В. С. СМЕРНОВ, К. Н. БОГОЯВЛЕНСКИЙ, Н. Н. ПАВЛОВ

# КАЛИБРОВКА ПРОКАТНЫХ ВАЛКОВ ПО МЕТОДУ СООТВЕТСТВЕННОЙ ПОЛОСЫ

*Под редакцией  
профессора, доктора технических наук  
В. С. СМЕРНОВА*



ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО  
ЛИТЕРАТУРЫ ПО ЧЕРНОЙ И ЦВЕТНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

*Москва 1953*

## АННОТАЦИЯ

В книге изложен метод расчета калибровки прокатных валков, в основу которого положено представление о соответственной полосе, и поправочных коэффициентах, учитывающих влияние формы калибра на уширение прокатываемой полосы.

Обобщен опыт отечественных заводов, описаны результаты экспериментальных исследований, проведенных авторами в области калибровки, приведены примеры расчета калибровок.

Книга рассчитана на инженеров-технологов прокатных цехов и может быть полезна студентам старших курсов прокатной специальности.

Редактор Б. Л. Ланге

Технический редактор В. В. Михайлова

Сдано в производство 14/X—1952 г. Подписано к печати 5/III—1953 г.  
Бумага 60×92<sup>1</sup>/<sub>16</sub> = 10,63 бум. л. = 20,50 п. л. + 2 вкл. = 0,75 п. л. = 21, 25 п. л.

Уч. изд. л. 19,16

Зн. в 1 печ. л. 36300

Г—02706

Тираж 4500

Заказ 2253

Цена 11 руб. 10 к.

Типография Металлургиздата, Москва, Цветной бульвар, д. 30

## ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Введение . . . . .	7
<b>ГЛАВА I. Общие соображения относительно калибровки валков сортопрокатных станов . . . . .</b>	<b>15</b>
§ 1. Существующие способы расчета калибровки валков сортопрокатных станов . . . . .	15
§ 2. Критика «закона естественных длин» Тафеля . . . . .	21
§ 3. Понятие о соответственной полосе . . . . .	25
§ 4. Поправочный коэффициент уширения . . . . .	34
§ 5. Расчет уширения при прокатке на гладкой бочке . . . . .	43
§ 6. Расчет деформации полосы по заданному отношению сторон ее поперечного сечения . . . . .	46
§ 7. Общий характер зависимости между отношением осей полосы, отношением осей калибра и степенью его заполнения . . . . .	56
§ 8. Общий ход расчета калибров . . . . .	57
§ 9. Границы применимости метода расчета по соответственной полосе . . . . .	58
<b>ГЛАВА II. Системы ромбических калибров . . . . .</b>	<b>61</b>
§ 1. Особенности прокатки в ромбических калибрах и область их применения . . . . .	61
§ 2. Исследование уширения в ромбических калибрах . . . . .	64
§ 3. Зависимость между геометрическими размерами ромбической полосы, калибра и степенью заполнения последнего . . . . .	67
§ 4. Расчет ромбических калибров . . . . .	80
§ 5. Предельное отношение осей ромбической полосы . . . . .	87
§ 6. Пример расчета калибров ромбической системы . . . . .	93
<b>ГЛАВА III. Системы калибров овал—квадрат, шестиугольник—квадрат, овал—круг . . . . .</b>	<b>103</b>
§ 1. Общие сведения о калибрах систем овал—квадрат, шестиугольник—квадрат, овал—круг . . . . .	103
§ 2. Характеристика системы овал—квадрат . . . . .	104
§ 3. Исследование уширения квадратных полос в овальных калибрах . . . . .	107

	Стр.
§ 4. Исследование уширения овальных полос в квадратных калибрах	123
§ 5. Геометрические соотношения в овальном калибре	132
§ 6. Зависимость между отношением осей овального калибра, отношением осей полосы и степенью заполнения	134
§ 7. Зависимость между радиусом закругления при вертикальной диагонали квадратного калибра и степенью его заполнения	136
§ 8. Расчет овальных калибров	140
§ 9. Расчет квадратных калибров	145
§ 10. Предельное отношение осей овальных калибров	149
§ 11. Оптимальное отношение осей овальных калибров	162
§ 12. Характеристика системы шестиугольник—квадрат	167
§ 13. Геометрические соотношения в шестиугольном калибре	168
§ 14. Зависимость между отношением осей полосы, отношением осей и степенью заполнения шестиугольного калибра	171
§ 15. Поправочный коэффициент уширения при прокатке квадратных полос в шестиугольных калибрах и шестиугольных полос в квадратных калибрах	177
§ 16. Расчет калибров системы шестиугольник—квадрат	180
§ 17. Предельное и оптимальное отношение осей шестиугольного калибра	187
§ 18. Характеристика систем овал—круг	188
§ 19. Геометрические соотношения в овальном, эллиптическом и усеченном овальном калибрах	190
§ 20. Зависимость между отношением осей калибра, степенью заполнения и отношением осей полосы в системах овал—круг	192
§ 21. Поправочный коэффициент уширения при прокатке круглых полос в овальных калибрах и овальных полос в круглых калибрах	193
§ 22. Расчет калибров в системах овал—круг	203
§ 23. Предельное и оптимальное отношение осей овальных калибров в системах овал—круг	212
§ 24. Чистовые калибры при прокатке круглой стали	218
§ 25. Применение ребровых калибров при прокатке круглой стали. Универсальная калибровка В. Семкова	219
§ 26. Примеры калибровки круглого профиля по системам овал—круг и овал—квадрат	221

#### ГЛАВА IV. Калибровка полосовой стали

§ 1. Способы прокатки полосовой стали	240
§ 2. Предварительное определение размеров исходной заготовки	243
§ 3. Распределение обжатий по проходам и определение числа проходов	244
§ 4. Конструкция закрытых калибров	249

	Стр.
§ 5. Пример расчета калибровки полосовой стали при прокатке в закрытых калибрах	251
§ 6. Расчет калибровки полосовой стали при прокатке на гладких валках	255
§ 7. Калибровка профилей, относимых к полосовой стали	261

#### ГЛАВА V. Калибровка непрерывных станов

§ 1. Краткие сведения о непрерывных станах	263
§ 2. Основные особенности калибровки валков непрерывных станов и прокатки на них	265
§ 3. Калибровка непрерывного стана с жесткой кинематической связью при наличии нескольких параллельных рядов калибров	272
§ 4. Пример расчета калибров непрерывного стана в параллельных рядах	279

#### ГЛАВА VI. Калибровка угловой стали и профилей, подобных угловым, по методу соответственной полосы

§ 1. Общие сведения относительно калибровки угловой стали	289
§ 2. Геометрические соотношения в калибрах для прокатки равнобокой угловой стали	295
§ 3. Калибровка равнобокой угловой стали	302
§ 4. Геометрические соотношения в калибрах для прокатки неравнобокой угловой стали	304
§ 5. Калибровка неравнобокой угловой стали	308
§ 6. Геометрические соотношения в калибрах для прокатки зетовых профилей	310
§ 7. Калибровка зетовых профилей	314
§ 8. Калибровка профилей, подобных угловому и зетовому	314
§ 9. Пример калибровки угловой стали	317
Литература	328



# ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ, ПРИНЯТЫЕ В КНИГЕ

- $h_0$  — высота полосы до пропуска, мм;  
 $h_1$  — высота полосы после пропуска, мм;  
 $b_0$  — ширина полосы до пропуска, мм;  
 $b_1$  — ширина полосы после пропуска, мм;  
 $l_0$  — длина полосы до пропуска, мм;  
 $l_1$  — длина полосы после пропуска, мм;  
 $\Delta b$  — уширение, мм;  
 $\Delta h$  — обжатие, мм;  
 $\frac{\Delta b}{\Delta h}$  — коэффициент уширения;  
 $\frac{1}{\eta} = \frac{h_0}{h_1}$  — коэффициент относительного обжатия;  
 $\beta = \frac{b_1}{b_0}$  — коэффициент относительного уширения;  
 $\lambda = \frac{l_1}{l_0}$  — коэффициент вытяжки;  
 $\omega_0$  — площадь поперечного сечения полосы до пропуска, мм<sup>2</sup>;  
 $\omega_1$  — площадь поперечного сечения полосы после пропуска, мм<sup>2</sup>;  
 $h_{0c}$  — высота соответственной полосы до пропуска, мм;  
 $h_{1c}$  — высота соответственной полосы после пропуска, мм;  
 $b_{0c}$  — ширина соответственной полосы до пропуска, мм;  
 $b_{1c}$  — ширина соответственной полосы после пропуска, мм;  
 $\Delta b_c$  — уширение соответственной полосы, мм;  
 $\Delta h_c$  — обжатие соответственной полосы, мм;  
 $\frac{\Delta b_c}{\Delta h_c}$  — коэффициент уширения соответственной полосы;  
 $a_0$  — отношение осей полосы до пропуска;  
 $a_1$  — отношение осей полосы после пропуска;  
 $h_k$  — высота калибра, мм;  
 $b_k$  — ширина калибра, мм;  
 $a_k$  — отношение осей калибра;  
 $r_k$  — радиус закругления при вертикальной оси калибра, мм;  
 $i$  — степень заполнения калибра;  
 $k_i$  — поправочный коэффициент уширения;  
 $n$  — число пропусков;  
 $D$  — начальный диаметр валков, мм;  
 $D_p$  — рабочий диаметр валков в данном калибре, мм;  
 $\alpha$  — угол захвата, град;  
 $\mu$  — коэффициент трения;  
 $t$  — температура, °С.

## ВВЕДЕНИЕ

В своей исторической речи 9 февраля 1946 г. перед избирателями Сталинского избирательного округа города Москвы товарищ Сталин сказал:

«Нам нужно добиться того, чтобы наша промышленность могла производить ежегодно до 50 миллионов тонн чугуна, до 60 миллионов тонн стали, до 500 миллионов тонн угля, до 60 миллионов тонн нефти. Только при этом условии можно считать, что наша Родина будет гарантирована от всяких случайностей. На это уйдет, пожалуй, три новых пятилетки, если не больше. Но это дело можно сделать, и мы должны его сделать».

Это указание товарища Сталина выполняется. Строятся новые металлургические заводы и прокатные цехи, успешно внедряется в производство новая техника и прогрессивная технология. Выявляются все новые резервы прокатного производства, использование которых обеспечивает выполнение и перевыполнение производственных планов. Все это позволило добиться значительного прироста годового объема производства металла, которое характеризуется следующими цифрами.

В соответствии с Законом о четвертом пятилетнем плане восстановления и развития народного хозяйства производство черных металлов в целом должно было превысить довоенный уровень на 35%, а производство проката достичь 17,8 млн. т. Как известно, задания четвертого пятилетнего плана были перевыполнены так, что довоенный уровень производства черных металлов в 1950 г. был превзойден на 45%, а выпуск проката увеличился на 59%.

Еще большие масштабы роста производства черных металлов намечены пятым пятилетним планом.

В директивах XIX съезда партии по пятому пятилетнему плану развития СССР на 1950—1955 гг. предусматривается рост продукции черной металлургии в 1955 г. по сравнению с 1950 г.,

примерно, в следующих размерах: чугуна на 76%; стали на 62%; проката на 64%. С дальнейшим ростом производства черных металлов должен быть расширен сортамент и значительно увеличено производство дефицитных видов проката, в частности, производство мелкосортовой стали и катанки, примерно, в 2,1 раза.

В пятой пятилетке, по сравнению с четвертой пятилеткой, будет увеличен ввод в действие производственных мощностей по чугуну, примерно, на 32%, стали — на 42%, проката — не менее чем в два раза, коксу — на 80% и железной руде — в три раза. Наряду с этим будет развито производство экономичных видов и профилей проката.

Правильно спроектированная и затем внедренная в производство калибровка прокатных валков позволяет использовать до конца все резервы прокатного стана — мощность его двигателя, прочность деталей — и обеспечить высокую производительность труда и получение продукции высокого качества.

Из года в год расширяется сортамент изделий прокатного производства.

Действительно, только на протяжении истекшего пятилетия прокатное производство нашей страны освоило более 300 новых типоразмеров [1]. Новые, еще более сложные, профили требуются во все возрастающих количествах для гидротехнических сооружений и гидроэлектростанций — великих строек коммунизма, а также для многочисленных отраслей нашей бурно развивающейся промышленности.

Быстрейшее освоение производства новых профилей проката на основе достижений отечественной науки и техники является почетной и ответственной задачей деятелей науки и работников прокатного производства. Вот почему разработка рациональных, научно-обоснованных методов расчета калибровки валков представляет одну из важнейших задач технологии прокатного производства.

Ученые нашей Родины сделали многое для разрешения этой проблемы, калибровщики наших заводов пользуются заслуженной славой лучших мастеров в этой области.

Еще в начале текущего столетия проф. В. Е. Грум-Гржимайло дал теоретические основы калибровки фланцевых профилей

[2]. Он был одним из лучших калибровщиков своего времени. Двумя десятилетиями позже проф. И. М. Павлов сформулировал основные представления о неравномерной деформации [3].

В те же годы проф. А. П. Виноградов дал основы расчета калибровки тяжелых обжимных станов и непрерывных станов с жесткой кинематической связью [4]. Профессор А. П. Чекмарев разработал методику расчета калибровки валков блюминга и дал новые материалы для расчета калибровки полосовой стали [5].

Профессор А. Ф. Головин в 1936 г. разработал основы рациональной калибровки обжимных и вытяжных систем калибров для прокатки простых профилей [6]. Проф. А. Ф. Головин на Урале и проф. А. П. Чекмарев на Юге обобщили и теоретически обосновали богатейший заводской опыт и успехи стахановцев в прокатном производстве, способствовали пересмотру и улучшению калибровок прокатных станов. В последние годы инженеры Б. П. Бахтинов и М. М. Штернов, опираясь на труды В. Е. Грум-Гржимайло, разработали новый метод расчета калибровки балочных профилей [7]. Серьезный вклад в калибровку прокатных валков внесли также Д. И. Старченко и Л. Д. Соколов.

Работа наших ученых в области калибровки прокатных валков проходила в борьбе с ненаучными воззрениями и методами иностранных ученых. Была доказана несостоятельность так называемого «закона естественных длин» Тафеля и, следовательно, основанных на этом «законе» методов расчета калибровки. Были разбиты предельческие «теории» Кирхберга и Жеза, стремившихся обосновать невозможность больших вытяжек при прокатке и тем самым ставивших предел повышению производительности прокатных станов.

В настоящей книге сделана попытка дальнейшего развития и усовершенствования методов расчета калибровки прокатных валков.

Рациональной калибровкой прокатных валков авторы называют такую, при которой обеспечивается максимальная (для данных условий) производительность, высокое качество продукции, минимальный удельный расход энергии и инструмента.

Какие же принципы должны быть положены в основу рациональной калибровки для сортовых прокатных станов?

Очевидно, что для обеспечения высокой производительности, минимальных расходов энергии и инструмента обжатие по прохо-

дам необходимо назначать, исходя из максимально возможного в данных условиях угла захвата, если этому не препятствуют мощность двигателя, прочность стана и качество материала. В противном случае величина обжатий по проходам определяется указанными факторами и они кладутся в основу при выборе обжатий.

Заметим, что пластические свойства сталей большинства марок достаточно высоки и, как правило, величину обжатия по проходам не лимитируют. Отдельные отступления от этого общего правила не являются характерными. Однако величину обжатия за проход по сравнению с максимально возможным все же приходится уменьшать, особенно при прокатке качественных и легированных сталей. Указанное уменьшение обжатий по проходам обусловлено необходимостью обеспечить достаточно высокое качество продукции. Так, максимально возможная в данных условиях вытяжка за проход при прокатке в сортовых калибрах достигается при заполнении их на 100%. Но в этом случае легко образуются трещины, складки, закаты на поверхности полосы. Поэтому степень заполнения калибров приходится уменьшать, что связано с уменьшением обжатия.

Какова должна быть методика расчета калибров?

Широко распространенный в начале текущего столетия способ Жеза и Кирхберга устарел. Сущность их способа расчета калибров сводится к следующему.

На основании эмпирических формул назначаются коэффициенты вытяжек по проходам. При этом ставится условие, чтобы вытяжки за проход не превышали 1,6 (Жез) или 2 (Кирхберг), чем заранее ограничивается деформация и, следовательно, ставится предел увеличению производительности прокатного стана.

По известной площади поперечного сечения профиля определяют площадь последнего калибра. Умножая площадь последнего калибра на коэффициент вытяжки, определяют площадь предыдущего калибра. Поступая таким же образом, находят площади всего ряда калибров. Затем определяются линейные размеры калибров. Для этого задаются одним из линейных размеров калибра (обычно — высотой). Тогда второй размер (ширина) легко определяется, так как площадь калибра известна. Таким образом, метод расчета Жеза и Кирхберга сводится к простым вычисле-

ниям геометрических размеров калибра для фигур более или менее сложной формы. Деформация полосы не рассчитывается. Ни о каком расчете рациональной калибровки при этом говорить не приходится. В результате такого расчета нередко случаи незаполнения калибров, что приводит к чрезмерному увеличению числа проходов и невыполнению профиля или же, наоборот, — к переполнению калибра и браку по этой причине; в обоих случаях понижается производительность прокатного стана и ухудшается качество продукции.

Таким образом, из-за неправильно спроектированных калибровок скрытые резервы прокатного производства полностью не реализуются.

Процесс пластической деформации металлов весьма сложен и еще мало изучен, но мы в нашей практической деятельности не можем ждать, когда теория достигнет такого уровня развития, при котором на основе ее калибровка будет осуществляться чисто расчетным путем.

Промышленность уже сейчас требует от нас достаточно обоснованной и точной методики расчета калибров. Эта методика должна быть простой и в то же время должна давать технически точное решение выдвигаемых практикой задач.

Разработка особых методов расчета для каждой данной системы калибров, как это делают некоторые авторы, не может быть признана правильной, ибо количество профилей, которые требуются для промышленности, все возрастает. В этих условиях неизбежен большой разрыв между запросами практики и уровнем развития теории. При указанном подходе к решению задач калибровки валков неизбежно сильное отставание теории и, как следствие, — трудности при освоении новых профилей.

Таким образом, ощущается настоятельная потребность в разработке простой методики калибровки прокатных валков, применимой для достаточно большого числа систем калибров.

С этой точки зрения все прокатываемые профили можно разделить на следующие две основные группы.

1. Простые профили. Эти профили имеют обычно выпуклый периметр, фланцы отсутствуют. К этой группе относятся квадратные, круглые, прямоугольные, шестиугольные, овальные, треугольные и тому подобные профили.

2. Фланцевые профили. Эти профили имеют вогнутый периметр и более сложную конфигурацию. К ним относятся двутавровые балки, швеллеры, рельсы и другие, подобные им профили, состоящие обычно из трех элементов, расположенных под некоторыми углами друг к другу.

Существует еще группа профилей, занимающих промежуточное положение между простыми и фланцевыми. К ним относятся угловая, ветровая, желобчатая сталь и подобные им. Указанные профили по особенностям прокатки и характеру деформации все же более тяготеют к простым профилям.

При прокатке в калибрах обжатие полосы почти всегда неравномерно и осуществляется не только по высоте, но и по ширине полосы.

При прокатке простых профилей разъем валков делается в средней части калибра по высоте, разность окружных скоростей в разных точках калибра и боковое обжатие относительно невелики.

При прокатке фланцевых профилей разъем валков осуществляется у концов какой-либо одной пары фланцев, разность окружных скоростей в разных точках калибра достигает нескольких десятков процентов, а боковое обжатие — значительной величины.

Эти обстоятельства обуславливают совершенно различное поведение фланцев, находящихся в открытой и закрытой частях калибра. Деформация же фланцев оказывает сильное влияние на поведение всего профиля.

Таким образом, при прокатке простых профилей скоростной фактор и боковое обжатие не имеют столь большого влияния на деформацию полосы, как при прокатке фланцевых профилей.

Сообразно этому, методика расчета калибровки фланцевых профилей возможно точнее должна учитывать влияние скоростного фактора, в то время как при расчете калибровки простых профилей этот фактор можно учитывать лишь приближенно (путем правильного выбора рабочего диаметра валков).

Настоящая книга касается только простых профилей и частично освещает вопросы, относящиеся к профилям, занимающим промежуточное положение между простыми и фланцевыми. Нами сделана попытка дать общую методику расчета для доста-

точно большого типа указанных профилей с таким расчетом, чтобы читатель в случае нужды при проектировании калибровки нового профиля мог ею воспользоваться.

В 1936 г. вышла в свет книга проф. А. Ф. Головина, посвященная калибровке прокатных валков [6], в которой он изложил основы расчета ящичных, ромбических калибров, а также систем валков — квадрат и шестигульник — квадрат. В указанной книге А. Ф. Головин выдвинул новую, оригинальную идею расчета калибров. Сущность ее сводится к следующему. Профиль данной конфигурации (с выпуклым параметром) пересчитывается на равновеликий ему по площади поперечного сечения прямоугольный («соответственный») профиль с тем же отношением осей. А. Ф. Головин считал, что коэффициенты деформации по высоте, ширине и длине полос при прокатке в ромбических, овальных и квадратных калибрах будут мало отличаться от коэффициентов деформации полос, им соответственных. Следовательно, можно осуществлять расчет деформации полосы в калибрах, полагая, что соответственная полоса прокатывается на гладкой бочке. Полученные в результате расчета искомые прямоугольные сечения снова пересчитываются на полосы фасонного сечения.

А. Ф. Головин понимал, конечно, что высказанное им предположение о равенстве коэффициентов деформации соответственных полос, даже для случая прокатки в ромбических, овальных и квадратных калибрах, в действительности не имеет места, и указал, что для уточнения расчета необходимо отыскание соответствующих поправочных коэффициентов из опыта. Эти поправочные коэффициенты, которые мы назвали поправочными коэффициентами уширения, найдены нами экспериментально.

Заметим, что А. Ф. Головин в двух книгах [9,10], предшествующих упомянутому выше труду [6], посвященному калибровке прокатных валков, излагает созданную им, отличную от общепринятой, теорию прокатки. В настоящей книге указанную теорию мы не используем. Вопросы теории прокатки, когда они встречаются по ходу изложения, трактуются нами, исходя из основных положений теории напряженного состояния.

Из изложенного видно, что расчет деформации полосы в калибрах сводится к расчету деформации полосы при прокатке на



гладкой бочке. Отсюда следует, что точность расчета зависит прежде всего от того, насколько правильно будет рассчитано уширение при прокатке на гладкой бочке.

Известно, что проблема расчета уширения пока еще не может считаться получившей разрешение. В настоящей книге, конечно, не дано решения указанной проблемы. Мы ограничились тем, что воспользовались одной из наиболее удачных формул для расчета уширения, предложенной С. И. Губкиным [8], подвергли ее возможно более широкой проверке в лабораторных и заводских условиях и внесли в нее коррективы сообразно результатам опытов.

Для условий сортовой прокатки нагретого металла на стальных и чугунных валках (и только для этих условий) точность формулы составляет примерно  $\pm 10\%$ .

Конечно, указанная степень точности еще не является достаточной. Тем не менее, как будет показано ниже, она уже дает возможность производить технические расчеты и осуществлять анализ заводских данных.

По мере развития теории, методика расчета уширения будет совершенствоваться. При этом степень точности расчетов калибровки по предлагаемой методике будет повышаться.

Эта книга возникла как результат работы членов кафедры «Пластическая обработка металлов» Ленинградского политехнического института имени М. И. Калинина на ленинградских заводах в порядке выполнения социалистических договоров сотрудничества с работниками предприятий и, в первую очередь, с работниками четырехжды орденоносного Кировского завода.

Глава II написана Н. Н. Павловым, глава IV — К. Н. Богоявленским и остальные главы — В. С. Смирновым. Примеры расчетов осуществлены Н. Н. Павловым и К. Н. Богоявленским.

Авторы выражают благодарность А. С. Прохоровой и Г. И. Вечерук за помощь в техническом оформлении рукописи настоящей книги.

## ГЛАВА I

### ОБЩИЕ СООБРАЖЕНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНО КАЛИБРОВКИ ВАЛКОВ СОРТОПРОКАТНЫХ СТАНОВ

#### § 1. Существующие способы расчета калибровки валков сортопрокатных станов

Обычный путь калибровки валков сортопрокатных станов сводится к следующему.

Сначала определяют вытяжки по проходам. При этом определяют общую вытяжку, необходимую для получения заданного профиля с площадью поперечного сечения  $\omega_n$  из заготовки с площадью поперечного сечения  $\omega_0$ , величиной которой также задаются. Общая вытяжка:

$$\lambda_{\text{общ}} = \frac{\omega_0}{\omega_n}.$$

Затем, используя примеры хороших калибровок для прокатки профилей в условиях, по возможности совпадающих с проектируемыми, и принимая во внимание условия захвата, задают среднюю вытяжку и определяют число проходов.

Пусть:

$\lambda_{\text{ср}}$  — средняя вытяжка;

$n$  — число проходов.

Очевидно, что

$$\lambda_{\text{ср}} = \sqrt[n]{\lambda_{\text{общ}}}.$$

Отсюда

$$n = \frac{\lg \lambda_{\text{общ}}}{\lg \lambda_{\text{ср}}}.$$

После этого, на основании данных практики, задаются коэффициентами вытяжки по проходам так, чтобы их произведение было равно общей вытяжке:

$$\lambda_{\text{общ}} = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 \cdot \lambda_4 \cdot \dots \cdot \lambda_{n-1} \cdot \lambda_n.$$

Для определения вытяжек по проходам применяют формулы Кирхберга, Жеца или используют некоторые другие способы.

Жез [11] на основании изучения сопротивления разрыву и удлинения железа и стали при температурах горячей обработки пришел к выводу, что сопротивления разрыву возрастают по арифметической прогрессии с понижением температуры, а удлинения уменьшаются в отношениях, обратно пропорциональных сопротивлениям.

Жез считал, что поскольку удлинения обратно пропорциональны сопротивлениям, то вытяжки должны изменяться в таком же отношении. Наибольшая вытяжка будет в первом (по ходу прокатки) калибре, наименьшая — в последнем. Во избежание разрушения и появления дефектов на полосе по этой причине вытяжка не должна превосходить величины 1,6 при наивысшей температуре.

Жез нашел из опыта, что если температуру металла последовательно повышать на  $50^\circ$ , то величины его сопротивления деформации будут относиться друг к другу как члены одного общего арифметического ряда.

Члены арифметической прогрессии, определяющей изменение вытяжки по проходам, при разности ее  $q$ , составляют

$$1 + q + 2q + 3q \dots$$

Обозначим толщину полосы по проходам через  $h_1, h_2, h_3, \dots, h_n$ , полагая при этом, что  $h_3 > h_2 > h_1$ .

Тогда коэффициенты обжатия можно выразить так:

$$\frac{h_2}{h_1} = 1 + q;$$

$$\frac{h_3}{h_2} = 1 + 2q;$$

$$\dots \dots \dots \frac{h_n}{h_{n-1}} = 1 + q (n-1).$$

Наибольший коэффициент обжатия, по мнению Жеза, не должен превышать величины

$$\frac{h_n}{h_{n-1}} = 1,6.$$

При этом условии получим:

$$1,6 = 1 + q (n-1),$$

откуда

$$q = \frac{0,6}{n-1}.$$

Выводы Жеза базируются на его немногочисленных исследованиях сопротивления разрыву и удлинения только при трех температурах:  $850, 1050$  и  $1200^\circ$ .

Способ выбора обжатий по пропускам, предложенный Кирхбергом<sup>1</sup>, находится в тесной связи с методом Жеза. Кирхберг полагает, что пластичность металла прямопропорциональна толщине полосы в данном проходе. Но чем пластичнее металл, тем больше допустимое обжатие при прокатке. Поэтому, если обозначить высоту полосы в трех смежных пропусках через  $h_3, h_2$  и  $h_1$  и предположить, что  $h_3 > h_2 > h_1$ , можно написать следующую зависимость:

$$\frac{\frac{h_3 - h_2}{h_2}}{\frac{h_2 - h_1}{h_1}} = \frac{h_2}{h_1}.$$

Или

$$\frac{h_2}{h_1} = \frac{h_2 - h_1}{h_1} + 1.$$

Принимая во внимание последнее соотношение и умножая обе части предыдущего равенства на величину  $\frac{h_2 - h_1}{h_1}$ , получим:

$$\frac{h_2 - h_1}{h_1} \cdot \frac{\frac{h_3 - h_2}{h_2}}{\frac{h_2 - h_1}{h_1}} = \frac{h_2 - h_1}{h_1} \left( \frac{h_2 - h_1}{h_1} + 1 \right).$$

Отсюда

$$\frac{h_3 - h_2}{h_2} = \left( \frac{h_2 - h_1}{h_1} \right)^2 + \left( \frac{h_2 - h_1}{h_1} \right).$$

Обозначая каждое из выражений, входящих в последнее равенство, через  $f$ , получим:

$$f_n = f_{n-1}^2 + f_{n-1}.$$

Если, например, обжатие в последнем проходе равно 30%, то

$$f_2 = 0,3^2 + 0,3 = 0,39, \text{ т. е. } 39\%$$

и

$$f_3 = 0,39^2 + 0,39 = 0,544, \text{ т. е. } 54,4\%.$$

На основании неправильного анализа сил, приложенных к полосе в очаге деформации, Кирхберг, подобно Жезу, предлагает

<sup>1</sup> Иг. М. Павлов. Теория прокатки и основы пластической деформации металла. М., ГОНТИ, 1938.

выбирать обжатие в последнем проходе так, чтобы вытяжка в первом проходе не превышала двукратной, иначе произойдет разрыв полосы под действием растягивающих напряжений, имеющих место в поясе деформации.

В отличие от Кирхберга Жез считает предельным коэффициентом обжатия величину 1,6, назначая ее без каких-либо особых обоснований, а Кирхберг величину двукратной вытяжки пытается обосновать «теоретическими» соображениями. Кирхберг замечает, что такая вытяжка может быть допущена только в том случае, если вследствие этого не будет превзойдено сопротивление металла разрыву.

Кирхберг и Жез механически переносят процесс растяжения в разрывной машине на процесс прокатки. Несостоятельность этого выявляется уже в результате следующего простого рассуждения.

При испытаниях на растяжение на образце образуется шейка. Начиная с этого момента деформация сосредоточивается преимущественно в шейке, по которой и происходит разрыв. При прокатке же деформация осуществляется во всем объеме металла, заключенного между валками и, следовательно, ввиду отсутствия шейки и высокой пластичности металла разрушение его при относительно небольшой двукратной вытяжке произойти не может. В самом деле, в процессе растяжения стальных образцов при температурах, соответствующих температуре прокатки, относительное удлинение в зоне шейки, при котором происходит разрушение, много больше того относительного удлинения, которое соответствует двукратной, а тем более 1,6-кратной вытяжке при прокатке.

Необоснованность предельческой двукратной вытяжки была экспериментально доказана русскими и советскими учеными. Как уже упоминалось, работы В. Е. Грум-Гржимайло [2], Кушакевича [12] и других авторов [13, 14, 15] показали, что при прокатке сталей подавляющего большинства марок металл выдерживает без появления каких-либо дефектов значительно большие деформации. Предлагая ограничивать деформацию полосы двукратной вытяжкой, Кирхберг тем самым необоснованно лимитировал производительность прокатного стана. Получившая широкое распространение среди калибровщиков предельческая установка Кирхберга несомненно сыграла отрицательную роль в борьбе за повышение производительности прокатных станов.

Кроме того, следует иметь в виду, что приведенные выше зависимости Кирхберга и Жеза теоретически несостоятельны, даже если отбросить их положение о предельной вытяжке. Действительно, пластичность металла и связанная с ней величина обжатия при прокатке являются функцией температуры, а не толщины полосы, как полагает Кирхберг. Таким образом, зависимости

Жеза и Кирхберга можно рассматривать в лучшем случае как эмпирические.

Подобного же рода необоснованными эмпирическими зависимостями являются формулы Кирхберга для определения коэффициентов приращения вытяжки при прокатке в овальных и квадратных калибрах.

По Кирхбергу коэффициент приращения вытяжки  $\delta_n$  при переходе от квадрата к ближайшему овалу

$$\delta_n = 0,7 \sqrt{160 \sqrt{Q_n}}$$

и коэффициент приращения вытяжки при переходе от овала к ближайшему большему квадрату

$$\delta_{n+1} = \sqrt{160 \sqrt{Q_{n+1}}}$$

В этих формулах:

$Q_n$  — площадь квадрата;

$Q_{n+1}$  — площадь овала.

Мец [16] рекомендует такой способ расчета вытяжек по проходам.

Линейные обжатия от одного калибра к другому распределяют пропорционально обжатиям некоторой уже известной, «образцовой», калибровки.

Мец указывает, что необходимо «...просто использовать разницу площадей между калибрами какой-либо системы, уже испытанной на практике и дающей хорошие результаты».

Таким образом по Мецу расчет калибровки сводится к простому использованию коэффициентов вытяжки уже известных систем, которые не могут дать удовлетворительных результатов, если калибровка рассчитана для прокатки иного профиля и переносится на стан, имеющий иной диаметр валков.

Когда коэффициенты вытяжек по проходам тем или иным способом определены, то, исходя из поперечного сечения готового профиля, которое всегда является заданным, подсчитывают площади поперечного сечения всего ряда калибров и площадь поперечного сечения заготовки. Такой способ расчета называют расчетом «против хода» прокатки.

Площади поперечного сечения калибров можно рассчитать, принимая за основу площадь поперечного сечения заготовки и постепенно переходя к площади поперечного сечения готового профиля. Такой способ расчета называют расчетом «по ходу» прокатки.

Пусть, например, площадь поперечного сечения готового профиля равна  $\omega_1$  и вытяжки по проходам от последнего калибра к первому составляют  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_n$ . Тогда площади поперечного

сечения всего ряда калибров определяются из следующих очевидных равенств:

$$\begin{aligned}\omega_1 & \text{— I калибр — готовый профиль;} \\ \omega_2 & = \omega_1 \lambda_1 \text{— II калибр;} \\ \omega_3 & = \omega_2 \lambda_2 \text{— III калибр;} \\ \omega_4 & = \omega_3 \lambda_3 \text{— IV калибр;} \\ & \dots \dots \dots \\ \omega_n & = \omega_{n-1} \lambda_{n-1} \text{— } n \text{ калибр;} \\ \omega_{n+1} & = \omega_n \lambda_n \text{— заготовка.}\end{aligned}$$

Когда площади поперечного сечения калибров и заготовки найдены, определяют их линейные размеры. Для этого пользуются геометрическими зависимостями, связывающими линейные размеры данного калибра с его площадью и различными эмпирическими коэффициентами и формулами. Для иллюстрации приведем пример.

Допустим, что требуется определить линейные размеры ромбического калибра по его площади. Для ромба существуют такие геометрические зависимости:

$$\begin{aligned}\omega & = \frac{1}{2} b h; \\ b & = h \operatorname{tg} \alpha,\end{aligned}$$

где  $\omega$  — площадь поперечного сечения ромба;

$b$  — ширина ромба;

$h$  — высота ромба;

$\alpha$  — угол между наклонной образующей калибра и его вертикальной диагональю, величиной которого калибровщик задается по своему усмотрению.

Решая совместно эти два уравнения, получим, что

$$h = \sqrt{\frac{2\omega}{\operatorname{tg} \alpha}},$$

после чего по предыдущему равенству легко определяется горизонтальная диагональ калибра  $b$ .

Во многих случаях уширением пренебрегают. Тогда на этом расчет калибра заканчивается. Однако, если желают учесть уширение, то подсчитывают его и затем притупляют каждый угол при вертикальной диагонали калибра на величину, равную половине уширения.

В ряде случаев для определения линейных размеров калибра пользуются чисто эмпирическими формулами.

Приведенные данные показывают, что существующие способы расчета калибров сортопрокатных станов базируются на теоретически необоснованных, чисто эмпирических способах для определения вытяжек по проходам, а определение линейных элементов калибра сводится к простым вычислениям его размеров по обычным геометрическим равенствам. Деформация полосы фактически не рассчитывается.

Таким образом, расчет калибровки производится весьма примитивно.

## § 2. Критика «закона естественных длин» Тафеля

В литературе по калибровке прокатных валков для анализа процесса неравномерной деформации в калибрах широко применяют «диаграммы вытяжек», подобные изображенным на рис. 1. Такие диаграммы базируются на так называемом «законе естественных длин» Тафеля и строятся, исходя из следующих соображений.

Разделим профиль на  $n$  равных частей по ширине, будем рассматривать вытяжку каждой части, пренебрегая воздействием на нее соседних частей и полагая уширение каждой из этих частей равным нулю. В таком случае для каждой полосы коэффициент вытяжки численно равен коэффициенту обжатия, т. е. отношению ее высот до и после пропуска. Если поделить высоту каждой полосы до пропуска на ее высоту после пропуска, то и получим диаграмму «естественных» или «натуральных» вытяжек, изображенную на рис. 1. Но в действительных условиях полосы между собой связаны условием сплошности и, следовательно, воздействуют друг на друга. Возникает вопрос о том, какова будет действительная вытяжка полосы.

Табель полагает, что действительная длина полосы после прокатки будет равна средней арифметической «естественных» длин:

$$\begin{aligned}L_{\text{ср}} & = \frac{L_1 + L_2 + L_3 + \dots + L_n}{n} = \\ & = \frac{\lambda_1 L_0 + \lambda_2 L_0 + \lambda_3 L_0 + \dots + \lambda_n L_0}{n},\end{aligned}$$

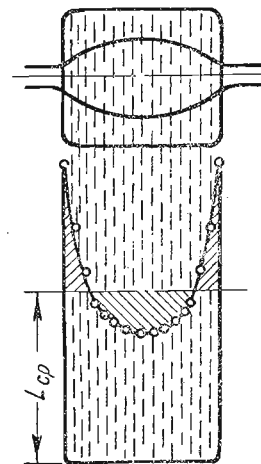


Рис. 1. «Диаграмма вытяжек» для случая прокатки квадратной заготовки в овальном калибре



где  $L_1, L_2, L_3, \dots, L_n$  — «естественные» длины элементарных частей;  
 $L_0$  — длины полосы до прокатки;  
 $L_c$  — длина полосы после прокатки;  
 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_n$  — «естественные» вытяжки элементарных частей;  
 $n$  — число элементарных частей.

Поделив обе части равенства на  $L_0$ , получим действительную вытяжку полосы:

$$\lambda_p = \frac{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \dots + \lambda_n}{n} \quad (1-I)$$

Таким путем Тафель решает вопрос не только о величине вытяжки полосы в данном калибре, но также и о его заполнении.

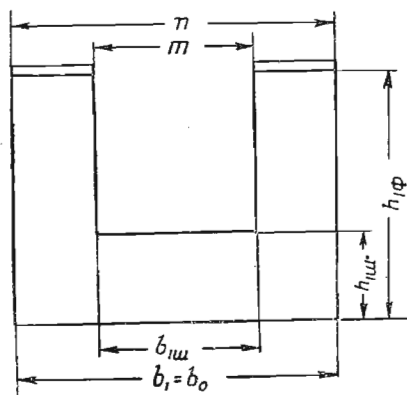


Рис. 2. Форма калибра, применявшаяся Тафелем при опытной прокатке

На рис. 2 приведена схема калибра, в котором Тафель проводил свои опыты, и соответствующие обозначения его. Под величиной  $m$  подразумевается число частей, на которое разделена шейка профиля. Величина  $n-m$  обозначает число частей, на которое разделены фланцы.

Уширением Тафель пренебрегает. Поэтому «естественная» вытяжка любой  $i$ -той части полосы равна:

$$\frac{L_i}{L_0} = \frac{h_0}{h_i}$$

Учитывая это обстоятельство и обозначения на чертеже, можем написать:

$$\lambda_{cp} = \frac{m \lambda_{ш} + (n-m) \lambda_{ф}}{n} \quad (2-I)$$

где  $\lambda_{ш}$  — «естественная» вытяжка шейки;  
 $\lambda_{ф}$  — «естественная» вытяжка фланца.

Если принять во внимание условие постоянства объема, то вытяжка, которую должна иметь полоса:

$$\lambda_n = \frac{\omega_0}{\omega_1}$$

где  $\omega_0$  — площадь поперечного сечения полосы до пропуска  
 $\omega_1$  — » » » » после ».

На этом основании для полосы, изображенной на рис. 2, будем иметь:

$$\lambda_n = \frac{h_0 b_0}{h_{1ф} b_0 - (h_{1ф} - h_{1ш}) b_{1ш}}$$

Разделив числитель и знаменатель правой части этого равенства на  $h_{1ф} b_0$ , получим:

$$\lambda_n = \frac{\frac{h_0}{h_{1ф}}}{1 - \left(1 - \frac{h_{1ш}}{h_{1ф}}\right) \frac{b_{1ш}}{b_0}}$$

Для нашего случая:

$$\frac{b_{1ш}}{b_0} = \frac{m}{n} \text{ и } \frac{h_{1ш}}{h_{1ф}} = \frac{h_0 h_{1ш}}{h_{1ф} h_0}$$

Если, подобно Тафелю, полагать, что уширение равно нулю, то будут справедливы следующие соотношения:

$$\frac{h_0}{h_{1ш}} = \lambda_{ш}; \quad \frac{h_0}{h_{1ф}} = \lambda_{ф}; \quad \frac{h_{1ш}}{h_{1ф}} = \frac{\lambda_{ф}}{\lambda_{ш}}$$

Таким образом:

$$\lambda_n = \frac{\lambda_{ф}}{1 - \left(1 - \frac{\lambda_{ф}}{\lambda_{ш}}\right) \frac{m}{n}} \quad (3-I)$$

Если правило Тафеля не противоречит условию постоянства объема, то

$$\lambda_{cp} = \lambda_n$$

Принимая во внимание равенства (2-I) и (3-I) имеем:

$$\frac{\lambda_{ф}}{1 - \left(1 - \frac{\lambda_{ф}}{\lambda_{ш}}\right) \frac{m}{n}} = \frac{m \lambda_{ш} + (n-m) \lambda_{ф}}{n}$$

После простых преобразований получим:

$$\left(1 - \frac{\lambda_{ф}}{\lambda_{ш}}\right) \left(1 - \frac{\lambda_{ф}}{\lambda_{ш}}\right) \left(1 - \frac{m}{n}\right) = 0$$

Это уравнение имеет два решения:

$$\left. \begin{array}{l} 1) \frac{\lambda_{\phi}}{\lambda_{ш}} = 1 \text{ или } \lambda_{\phi} = \lambda_{ш} \\ \text{и} \\ 2) \frac{m}{n} = 1 \text{ или } m = n. \end{array} \right\} (4-I)$$

Таким образом равенство (1—I) справедливо и, следовательно, «закон естественных длин» Тафеля не противоречит условию постоянства объема только в двух случаях, аналитически выражаемых равенствами (4—I). Рассмотрим их более подробно.

И с л у ч а й.  $\lambda_{\phi} = \lambda_{ш}$ ; это возможно лишь при одинаковом относительном обжатии по всей ширине полосы, т. е. при прокатке прямоугольной полосы в гладких валках.

И с л у ч а й.  $m = n$ , это означает, что фланцы или шейка отсутствуют, что опять-таки соответствует случаю прокатки прямоугольной полосы в гладких валках.

Из изложенного следует, как справедливо указывает И. Я. Тарновский, что правило Тафеля неверно именно в том случае, для которого оно предназначено, т. е. для случая неравномерной деформации полосы в калибрах. При равномерной же деформации «закон естественных длин» Тафеля обращается в общеизвестное и притом элементарное положение, согласно которому при прокатке без уширения в гладких валках вытяжка равна относительному обжатию. В этом последнем случае применение правила Тафеля, разумеется, лишено смысла.

Указанные теоретические выводы И. Я. Тарновского полностью подтверждаются его экспериментами и опытными данными других авторов.

Таким образом, неправильность «закона естественных длин» Тафеля доказана работами советских ученых с полной очевидностью. В этой связи приходится лишь удивляться, что он еще используется в работах по калибровке и даже в некоторых учебниках для суждения о заполнении калибра и характере деформации при прокатке в калибрах — вытяжке полосы и ее уширении. Особенно парадоксальными и неожиданными являются рассуждения, связанные с рассмотрением явления уширения на основе диаграммы вытяжек Тафеля, поскольку эти диаграммы, как уже упоминалось, строятся в предположении, что уширение при прокатке в калибрах равно нулю. При этом рассуждения в конечном итоге всегда ведутся в такой последовательности: «пренебрежем уширением и посмотрим, каково оно». Понятно, что такая постановка вопроса не выдерживает никакой критики.

В настоящей книге на основании изложенных выше соображений «закон средней арифметической» Тафеля применяться, разумеется, не будет.

### § 3. Понятие о соответственной полосе

Понятие о соответственных сечениях применительно к частному случаю ромбических полос ввел А. Ф. Головин.

«Прямоугольное и ромбическое сечения будем называть соответственными тогда, когда площади их равны и отношение сторон прямоугольного сечения равно отношению сходственных диагоналей ромбического сечения» [6, стр. 122].

Аналогичные представления о соответственной полосе А. Ф. Головин вводит применительно к овальным и шестиугольным калибрам, хотя и не дает в этом случае соответствующих определений.

Обобщим определение А. Ф. Головина следующим образом.

Полоса данного сечения и полоса с прямоугольным поперечным сечением называются соответственными, если площади и отношение сходственных осей (сторон) их поперечного сечения равны.

Введем следующие обозначения:

$\omega$  — площадь поперечного сечения данной полосы;

$h$  — характеристическая высота данной полосы;

$b$  — характеристическая ширина данной полосы;

$a = \frac{b}{h}$  — отношение характеристических осей данной полосы;

$\omega_c$  — площадь поперечного сечения соответственной прямоугольной полосы;

$h$  — высота соответственной прямоугольной полосы;

$b$  — ширина соответственной прямоугольной полосы;

$a_c = \frac{b_c}{h_c}$  — отношение осей (сторон) соответственной прямоугольной полосы.

Для соответственных полос, согласно определению, имеем:

$$\left. \begin{array}{l} \omega = \omega_c = h_c \cdot b_c, \quad a = a_c \\ \text{или} \\ \frac{b}{h} = \frac{b_c}{h_c} \end{array} \right\} (5-I)$$

На рис. 3 изображены полосы различного фасонного сечения и соответственные им. На этом же рисунке даны обозначения размеров.

Из рис. 3 видно, что характеристическими высотой и шириной профиля называются такие избранные калибровщиком гео-

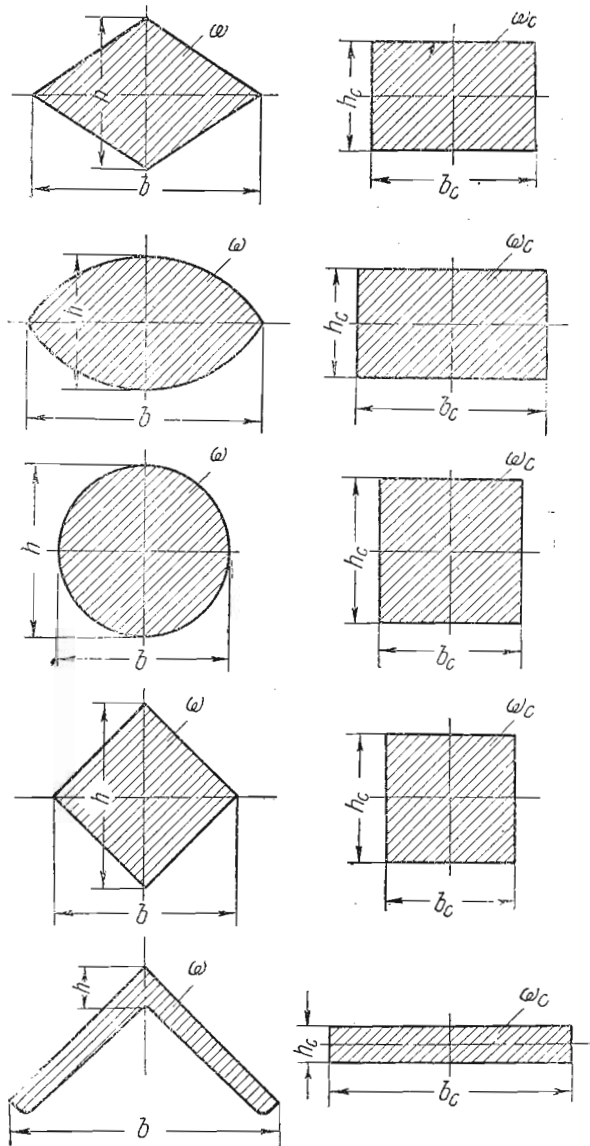


Рис. 3. Поперечные сечения соответственных полос.

Для всех полос

$$\omega = \omega_c \text{ и } \frac{b}{h} = \frac{b_c}{h_c}$$

метрические размеры полосы данного сечения, по которым вычисляется отношение ее осей.

Понятие о соответственной полосе позволяет правильно учесть действительные коэффициенты деформации (коэффициент обжатия, уширения и вытяжки) полос фасонного сечения, так как здесь все они являются средними коэффициентами, вычисленными по площади, распределенной сообразно конфигурации профиля.

Последнее хорошо иллюстрирует рис. 4.

Размеры полос, соответственных прокатываемым в калибрах, определяются по формулам, вытекающим из их определения.

На основании формул (5—I) можем написать:

$$b_c = ah_c,$$

$$\omega = h_c b_c.$$

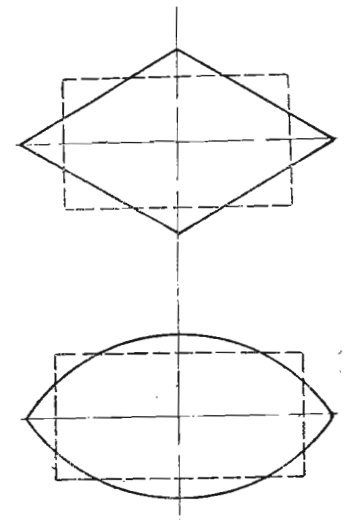


Рис. 4. Соответственные полосы наложены друг на друга

Подставляя значение  $b_c$  из первого уравнения во второе, получим:

$$ah_c^2 = \omega,$$

откуда

$$h_c = \sqrt{\frac{\omega}{a}}.$$

Определив по этой формуле высоту соответственной полосы, вычисляют ее ширину.

Итак

$$\left. \begin{aligned} h_c &= \sqrt{\frac{\omega}{a}}, \\ b_c &= ah_c. \end{aligned} \right\} \quad (6-I)$$

В дальнейшем отношение осей полосы будет выбирать так, чтобы оно было больше или равно единице:

$$a \geq 1. \quad (7-I)$$

Поясним это примером. На рис. 5 изображена ромбическая полоса в двух положениях. Первое положение (а) соответствует случаю, когда полоса выходит из ромбического калибра, второе (б), когда полоса скантована на  $90^\circ$  с тем, чтобы быть заданной в последующий ромбический калибр.

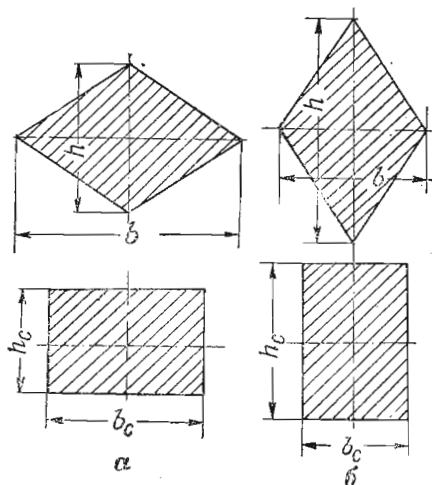


Рис. 5. Ромбическая полоса и соответственная ей прямоугольная в двух различных положениях

На рис. 5 показано соответственное прямоугольное сечение для двух указанных выше положений ромбической полосы.

Очевидно, что для первого положения размеры соответственной полосы можно определить по формулам (6—I). Для второго же положения, принимая во внимание условие (7—I), получим, что

$$a = \frac{h}{b}.$$

Поэтому:

$$h_c = ab_c;$$

$$\omega = h_c b_c;$$

$$\omega = ab_c^2$$

и

$$\left. \begin{aligned} b_c &= \sqrt{\frac{\omega}{a}}; \\ h_c &= ab_c. \end{aligned} \right\} \quad (8-I)$$

Таким образом, формулы (6—I) и (8—I) для вычисления размеров соответственной полосы до прокатки будут иметь такой вид:

$$\text{При } a_0 = \frac{b_0}{h_0} \geq 1:$$

$$\left. \begin{aligned} h_{oc} &= \sqrt{\frac{\omega_0}{a_0}}; \\ b_{oc} &= a_0 h_{oc}. \end{aligned} \right\} \quad (9-I)$$

$$\text{При } a_0 = \frac{h_0}{b_0} \geq 1:$$

$$\left. \begin{aligned} b_{oc} &= \sqrt{\frac{\omega_0}{a_0}}; \\ h_{oc} &= a_0 b_{oc}. \end{aligned} \right\} \quad (10-I)$$

Для вычисления же размеров соответственной полосы после прокатки формулы (6—I) и (8—I) будут иметь такой вид:

$$\text{При } a_1 = \frac{b_1}{h_1} \geq 1:$$

$$\left. \begin{aligned} h_{1c} &= \sqrt{\frac{\omega_1}{a_1}}; \\ b_{1c} &= a_1 h_{1c}. \end{aligned} \right\} \quad (11-I)$$

$$\text{При } a_1 = \frac{h_1}{b_1} \geq 1:$$

$$\left. \begin{aligned} b_{1c} &= \sqrt{\frac{\omega_1}{a_1}}; \\ h_{1c} &= a_1 b_{1c}. \end{aligned} \right\} \quad (12-I)$$

Использование условия (7—I) и вытекающих из него соотношений (9—I) — (12—I), как будет показано в дальнейшем, весьма удобно при осуществлении расчетов и обработке экспериментальных данных.

Формулы (9—I) — (12—I) являются общими для калибров любой конфигурации.

Попутно заметим, что для решения обратной задачи — определения геометрических размеров фасонной полосы по размерам соответственной полосы — общих формул, подобных (9—I) — (12—I), справедливых для калибров любой формы, написать нельзя. В этом случае для калибров данной геометрической формы всякий раз приходится составлять свои конкретные зависимости, принимая во внимание особенности конфигурации и технологии прокатки данного профиля. Однако во всех случаях методика составления таких формул остается общей, что сильно облегчает решение конкретных задач. В общих чертах эта методика заключается в том, что, исходя из геометрической формы калибра, составляют геометрические соотношения, выражающие зависимость между его линейными размерами, отношением осей и площадью.



Отношение осей и площадь поперечного сечения калибра известны, поскольку у соответственной и фасонной полосы они одинаковы по условию. Все размеры фасонного калибра геометрически связаны с его характеристическими размерами.

Таким образом, определение характеристических размеров, а по ним и всех остальных геометрических элементов фасонного калибра, по площади и отношению осей соответственной прямоугольной полосы оказывается всегда осуществимым.

Конкретные примеры составления таких зависимостей, которые служат для определения размеров и формы полосы фасонного сечения по размерам соответственной ей прямоугольной полосы, будут даны в следующих главах.

Введем некоторые другие понятия, касающиеся соответственной полосы, которые необходимы нам в дальнейшем.

Линейное обжатие соответственной полосы:

$$\Delta h_c = h_{oc} - h_{1c}.$$

Линейное уширение соответственной полосы:

$$\Delta b_c = b_{1c} - b_{oc}.$$

Коэффициент уширения (отношение уширения к обжатию):

$$\frac{\Delta b_c}{\Delta h_c} = \frac{b_{1c} - b_{oc}}{h_{oc} - h_{1c}}.$$

Коэффициент относительного обжатия соответственной полосы:

$$\frac{1}{\eta_c} = \frac{h_{oc}}{h_{1c}}.$$

Коэффициент относительного уширения соответственной полосы:

$$\beta_c = \frac{b_{1c}}{b_{oc}}.$$

Коэффициент вытяжки соответственной полосы:

$$\lambda_c = \frac{\omega_{oc}}{\omega_{1c}} = \frac{\omega_0}{\omega_1} = \frac{h_{oc} b_{oc}}{h_{1c} b_{1c}} = \frac{l_{1c}}{l_{oc}} = \frac{l_1}{l_0}.$$

А. Ф. Головин предложил метод расчета по соответственной полосе, сущность которого сводится к следующему.

Полоса данного (фасонного) сечения пересчитывается на соответственную по формулам (9—I) — (12—I). Затем рассчитывается уширение соответственной полосы так, как если бы она прокатывалась на гладкой бочке. После этого легко определяются размеры искомой соответственной полосы. По найденным в результате расчета размерам поперечного сечения соответственной полосы определяются размеры искомой фасонной полосы.

А. Ф. Головин исходил из предположения, что при одинаковых коэффициентах деформации по высоте коэффициенты вытяжки

и уширения соответственных полос будут мало отличаться друг от друга. Покажем, в какой мере это предположение А. Ф. Головина соответствует действительности.

При прокатке в калибрах со стороны валков к полосе приложена сложная система сил, под влиянием которых осуществляется деформация полосы. Взаимная связь между коэффициентами деформации полосы определяется условием постоянства объема и усилиями, приложенными к полосе — их величиной и направлением. Величина и направление усилий определяется в свою очередь формой калибра и формой полосы, прокатываемой в этом калибре.

Рассмотрим сначала взаимную связь между коэффициентами деформации соответственных полос, вытекающую из условия постоянства объема, не принимая во внимание специфического характера действующих усилий, приложенных со стороны стенок фасонного калибра, а затем учтем и это обстоятельство.

Пусть имеем полосу с выпуклым или вогнутым периметром поперечного сечения, которая прокатывается в полосу меньшего сечения.

В качестве примера на рис. 6 приведены полосы фасонного

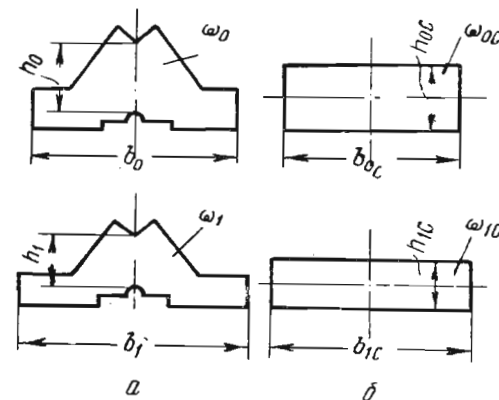


Рис. 6. Полосы данного сечения до и после прокатки (а) и соответственные им (б)

сечения до и после пропуска и соответственные им прямоугольные полосы, а также обозначения размеров.

Для полос фасонного сечения имеем:

$$\frac{a_1}{a_0} = \frac{\frac{b_1}{h_1}}{\frac{b_0}{h_0}} = \frac{b_1}{b_0} \cdot \frac{h_0}{h_1} = \frac{\beta}{\eta}. \quad (13-I)$$

Для соответственных прямоугольных полос:

$$\frac{a_{1c}}{a_{0c}} = \frac{\frac{b_{1c}}{h_{0c}}}{\frac{b_{0c}}{h_{0c}}} = \frac{b_{1c}}{b_{0c}} \cdot \frac{h_{0c}}{h_{1c}} = \frac{\beta_c}{\eta_c} \quad (14-I)$$

Введем следующие обозначения:

$$\left. \begin{aligned} \frac{a_1}{a_0} &= m; \\ \frac{a_{1c}}{a_{0c}} &= m_c, \end{aligned} \right\} \quad (15-I)$$

где  $m$  и  $m_c$  — постоянные числа.

По определению соответственных полос:

$$a_1 = a_{1c} \text{ и } a_0 = a_{0c}.$$

Следовательно, принимая во внимание равенства (15—I), имеем:

$$\frac{a_1}{a_0} = \frac{a_{1c}}{a_{0c}}$$

или

$$m = m_c, \quad (16-I)$$

Равенства (13—I) и (14—I) можно переписать на основании соотношений (15—I) так:

$$m = \frac{\beta}{\eta}.$$

и

$$m_c = \frac{\beta_c}{\eta_c},$$

или

и

$$\left. \begin{aligned} \beta &= m \eta \\ \beta_c &= m_c \eta_c. \end{aligned} \right\} \quad (17-I)$$

Учитывая равенство (15—I), получаем:

$$\frac{\beta}{\eta} = \frac{\beta_c}{\eta_c}.$$

Отсюда следует, что у соответственных полос соотношения между относительными коэффициентами уширения и обжатия одинаковы и определяются отношением осей полос до и после прокатки.

Далее, по определению соответственных полос:

$$\omega_0 = \omega_{0c}$$

и

$$\omega_1 = \omega_{1c}.$$

Следовательно,

$$\frac{\omega_0}{\omega_1} = \frac{\omega_{0c}}{\omega_{1c}}$$

или

$$\lambda = \lambda_c, \quad (18-I)$$

т. е. вытяжки у соответственных полос одинаковы.

Так как объем металла в процессе прокатки остается практически постоянным, то

$$\frac{h_{1c}}{h_{0c}} \cdot \frac{b_{1c}}{b_{0c}} \cdot \frac{l_{1c}}{l_{0c}} = 1$$

или

$$\eta_c \beta_c \lambda_c = 1.$$

Таким же путем для полос фасонного сечения получим:

$$\eta \beta \lambda = 1.$$

Подставляя значения  $\beta$  и  $\beta_c$  (см. 17—I) в выражения для условия постоянства объема, получим:

$$m \eta^2 \lambda = 1;$$

$$m_c \eta_c^2 \lambda_c = 1$$

или

$$\eta = \frac{1}{\sqrt{m \lambda}}$$

и

$$\eta_c = \frac{1}{\sqrt{m_c \lambda_c}}.$$

Но согласно равенствам (16—I) и (18—I)

$$m = m_c$$

и

$$\lambda = \lambda_c.$$

Поэтому

$$\eta = \eta_c$$

или

$$\frac{1}{\eta} = \frac{1}{\eta_c}, \quad (19-I)$$

т. е. коэффициенты относительного обжатия соответственных полос одинаковы.

Но если коэффициенты вытяжки и обжатия у соответственных полос одинаковы, то из условия постоянства объема следует, что и коэффициенты уширения их тоже одинаковы. Действительно, перепишем выражения для условия постоянства объема соответственных полос в таком виде:

$$\beta = \frac{1}{\eta \lambda};$$

$$\beta_c = \frac{1}{\eta_c \lambda_c}.$$

Принимая во внимание равенства (18-I) и (19-I), приходим к выводу, что

$$\beta = \beta_c.$$

Таким образом, предположение А. Ф. Головина о равенстве коэффициентов деформации соответственных полос было бы справедливо лишь при условии, если не принимать во внимание усилий, приложенных со стороны стенок калибра к прокатываемой полосе в очаге деформации. Но прокатка, разумеется, не может осуществляться, если со стороны валков отсутствует силовое воздействие на металл. Отсюда следует, что коэффициенты деформации соответственных полос равны быть не могут.

А. Ф. Головин указывает:

«Мы не можем утверждать, что приведенный выше расчет уширения, по соответственным размерам будет достаточно точен... Для уточнения расчета по вышеприведенному способу необходимо более широкое опытное исследование, которое может дать нам соответствующие поправочные коэффициенты»<sup>1</sup>.

В следующем параграфе мы изложим соображения, на основании которых путем проведения несложных опытов можно определить указанные поправочные коэффициенты.

#### § 4. Поправочный коэффициент уширения

Как уже было указано, при прокатке в калибрах со стороны валков к полосе приложена система усилий, под влиянием которых осуществляется деформация полосы. Взаимная связь между коэффициентами, характеризующими деформацию полосы по ее высоте, ширине и длине, определяется условием постоянства объ-

ема и усилиями, приложенными к полосе — их величиной и направлением. Величина и направление усилий, приложенных к полосе, определяются, в свою очередь, формой калибра и формой полосы, прокатываемой в этом калибре.

Рассмотрим два калибра с выпуклым и вогнутым относительно их осей периметром, формы которых изображены на рис. 7. а

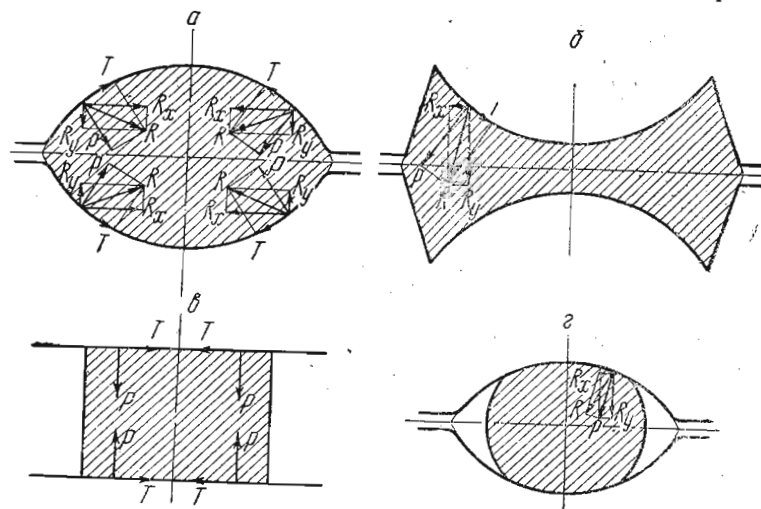


Рис. 7. Схема усилий, приложенных со стороны валков к полосе: а — калибр с выпуклым периметром; б — калибр с вогнутым периметром; в — гладкая бочка; г — калибр с выпуклым периметром (калибр не полностью заполнен металлом)

и б, и сравним условия деформации при прокатке в них с деформацией полосы при прокатке на гладкой бочке (рис. 7, в).

Со стороны валков к полосе приложены нормальные силы  $P$  и силы трения  $T$ . Их равнодействующую обозначим через  $R$ . Силы  $R$  можно разложить на две составляющие: вертикальные  $R_y$  и горизонтальные  $R_x$ .

При прокатке на гладкой бочке уширению препятствуют горизонтальные проекции равнодействующих  $R$ , равные  $R_x = T$ .

При прокатке в калибре с выпуклым периметром уширению препятствуют силы  $R_x$ , величина которых при прочих равных условиях всегда больше соответствующих им сил, возникающих при прокатке на гладкой бочке. Поэтому уширение в калибрах с выпуклым периметром оказывается меньше, чем при прокатке на гладкой бочке.

При прокатке в калибре с вогнутым периметром силы  $R_x$  способствуют уширению и оно здесь оказывается больше, чем при прокатке на гладкой бочке.

3\*

Чем больше отношение осей калибра, тем меньше по величине горизонтальные силы  $R_x$ . Поэтому с увеличением отношения осей уширение в калибре с выпуклым периметром увеличивается, а в калибре с вогнутым периметром — уменьшается. В обоих случаях горизонтальные силы  $R_x$  стремятся к их предельному значению  $R_x = T$  для случая прокатки на гладкой бочке. Поэтому уширение в рассматриваемых калибрах с ростом отношения осей приближается по величине к уширению на гладкой бочке.

На величину уширения оказывает влияние не только отношение осей калибра, но также и степень заполнения его.

Степенью заполнения калибра назовем отношение площади поперечного сечения полосы к площади поперечного сечения калибра в вертикальной плоскости, проходящей через оси валков:

$$i = \frac{\omega}{\omega_k} \quad (20-1)$$

Чем меньше степень заполнения калибра, тем ближе к вертикали расположены силы  $P$  и ближе к горизонтали силы  $T$ . По этой причине с уменьшением степени заполнения калибра горизонтальные составляющие  $R_x$  равнодействующих  $R$  приближаются к их предельным значениям для случая прокатки на гладкой бочке. Таким образом, с уменьшением степени заполнения уширение в калибрах приближается по величине к уширению на гладкой бочке.

При анализе условий деформации в калибрах, изображенных на рис. 7, предполагалось, что форма калибров, характеризуемая отношением его осей, изменялась, а форма задаваемой в калибр полосы оставалась неизменной. Изменялись лишь линейные размеры задаваемых в калибры полос с тем, чтобы получить ту или иную степень заполнения. Например, в калибры могли задаваться квадратные полосы различных размеров или прямоугольные полосы различных размеров, но с одинаковым отношением сторон их поперечного сечения. Этим было исключено из рассмотрения влияние формы задаваемой полосы.

Для выяснения влияния формы задаваемой полосы на уширение рассмотрим прокатку овальных полос в квадратных калибрах (рис. 8). Здесь в одинаковых по форме (в данном случае — квадратных) калибрах производится прокатка различных по форме полос (в данном случае — овальных полос с различным отношением осей). Этим исключается из рассмотрения влияние формы калибра на деформацию.

Сравним деформацию полосы при прокатке в рассматриваемых калибрах с деформацией полосы при прокатке на гладкой бочке.

Легко понять, что при прокатке в калибрах, благодаря стесняющему действию усилий  $R_x$  (рис. 8), уширение будет при прочих равных условиях меньше, чем при прокатке на гладкой бочке.

Понятно также, что с ростом отношения осей исходной полосы уширение в калибре будет приближаться по величине к уширению на гладкой бочке. Действительно, чем больше отношение осей исходной полосы, тем меньше кривизна ее периметра и тем ближе в средней своей части она приближается по форме к прямоугольной полосе. Затем, чем больше отношение осей, тем меньше сказывается стесняющее действие стенок калибра. В самом деле, углы между образующей калибра и касательными, проведенными к различным точкам периметра полосы, увеличиваются с ростом отношения ее осей.

При прокатке полос с очень большим отношением осей калибр представляет собою в первом приближении как бы проводку, которая поддерживает полосу в вертикальном положении при прокатке, но в то же время и деформирует ее по высоте. Соприкосновение полосы с наклонными стенками калибра осуществляется по небольшой поверхности у сечения выхода полосы из валков, где обжатие и соответствующее ему стеснение уже невелико.

Схема усилий, действующих со стороны валков на полосу в калибре (рис. 8), показывает, что соотношение между горизонтальными и вертикальными силами остается постоянным по всей образующей каждого из прямолинейных элементов калибра, поскольку наклонные стенки калибра не имеют кривизны. По этой причине при изменении степени заполнения стесняющее действие стенок калибра не изменяется и соотношение между уширением в калибре и на гладкой бочке, повидимому, должно не зависеть от степени заполнения.

Мы проанализировали сначала влияние формы калибра, а затем — формы полосы на уширение при прокатке в калибрах путем сравнения его с уширением на гладкой бочке.

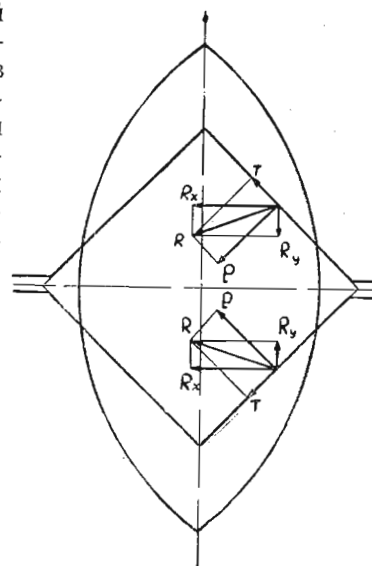


Рис. 8. Схема усилий, приложенных со стороны валков к овальной полосе в квадратном калибре



Понятно, что действие обоих факторов проявляется одновременно, что должно учитываться соответствующим образом при расчете каждой конкретной системы калибров.

Высказанные положения легко поддаются количественному учету путем простого по технике исполнения эксперимента.

Данная серия полос фасонного сечения прокатывается в калибрах с различным отношением осей при данной степени заполнения. Размеры полос до и после прокатки пересчитываются на соответственные по формулам (9—I) — (12—I). Затем вычисляется отношение уширения к обжатию и строится кривая, выражающая зависимость этого отношения от отношения осей валов.

После этого берется серия прямоугольных полос, исходные размеры которых являются соответственными исходным размерам полос фасонного сечения. Эти полосы прокатываются на гладкой бочке с обжатием, равным обжатию в калибрах, при условии, что оно вычислено по соответственным размерам. Иными словами, прямоугольные полосы прокатываются на гладкой бочке с обжатием

$$\Delta h = \Delta h_c,$$

где

$$\Delta h = h_0 - h_1$$

и

$$\Delta h_c = h_{0c} - h_{1c}.$$

Если поделить значения  $\frac{\Delta b_c}{\Delta h_c}$  (отношение уширения к обжатию в калибрах, вычисленное по соответственным размерам) на значение  $\frac{\Delta b}{\Delta h}$  (отношение уширения к обжатию при прокатке на гладкой бочке) при одинаковых отношениях осей, то получим ряд коэффициентов:

$$k_i = \frac{\frac{\Delta b_c}{\Delta h_c}}{\frac{\Delta b}{\Delta h}} \quad (21 - I)$$

Коэффициенты  $k_i$  учитывают различие в уширении при прокатке в калибрах и на гладкой бочке, т. е. влияние формы калибра на уширение, его «стесняющее» или «разгонное» действие.

Аналогичные опыты проводятся при различной степени заполнения калибра.

Таким путем получается семейство кривых, характеризующих зависимость коэффициента  $k_i$  от отношения осей калибра  $a$  и его степени заполнения  $i$ :

$$k = f(a, i).$$

Указанные коэффициенты назовем «поправочными коэффициентами уширения».

Понятие о поправочных коэффициентах уширения было введено нами<sup>1</sup> под названием «поправочные коэффициенты на стеснение», поскольку в большинстве случаев калибры для прокатки простых сортовых профилей имеют выпуклый периметр.

Это понятие позднее было использовано И. Я. Тарновским [20] и для калибров с вогнутым периметром и названо им «коэффициент формы инструмента».

На основании изложенных выше соображений понятно, что для калибров с выпуклым периметром поправочный коэффициент уширения  $k_i \leq 1$ , а для калибров с вогнутым периметром  $k_i \geq 1$ .

Значение  $k_i = 1$  является тем пределом, к которому стремится поправочный коэффициент уширения при стремлении отношения осей к бесконечности и степени заполнения — к нулю, т. е.

$$\lim_{\substack{a \rightarrow \infty \\ i \rightarrow 0}} k_i = 1.$$

$$a \rightarrow \infty$$

$$i \rightarrow 0$$

Следовательно, зависимость поправочного коэффициента уширения от отношения осей и степени заполнения в общем случае должна выражаться семейством кривых, асимптотами которых являются прямые.

$$k_i = 1$$

Изложенные общие соображения полностью подтверждаются опытами. В качестве примера на рис. 9 показаны кривые, выражающие зависимость поправочного коэффициента уширения от отношения осей и степени заполнения при прокатке квадратных полос из свинца и нагретой до температуры 1000° стали в овальных калибрах.

Кривые, изображенные на рис. 9, показывают, что при прокатке свинцовых и стальных полос получаются практически одинаковые значения поправочного коэффициента уширения. Материал полосы при прочих равных условиях определяет величину коэффициента трения. Известно, что коэффициент трения при прокатке свинца в холодном состоянии при прочих равных условиях всегда

<sup>1</sup> В. С. Смирнов. Рациональная калибровка овальных и квадратных ручьев. — Сборник «Труды Уральского индустриального института им. С. М. Кирова». Вып. XIX. Металлургиздат, 1944, стр. 22—32.

меньше, чем при прокатке нагретой стали. В условиях описываемого опыта коэффициент трения при прокатке свинца составлял примерно 0,10—0,15, а при прокатке стали — 0,30. Отсюда сле-

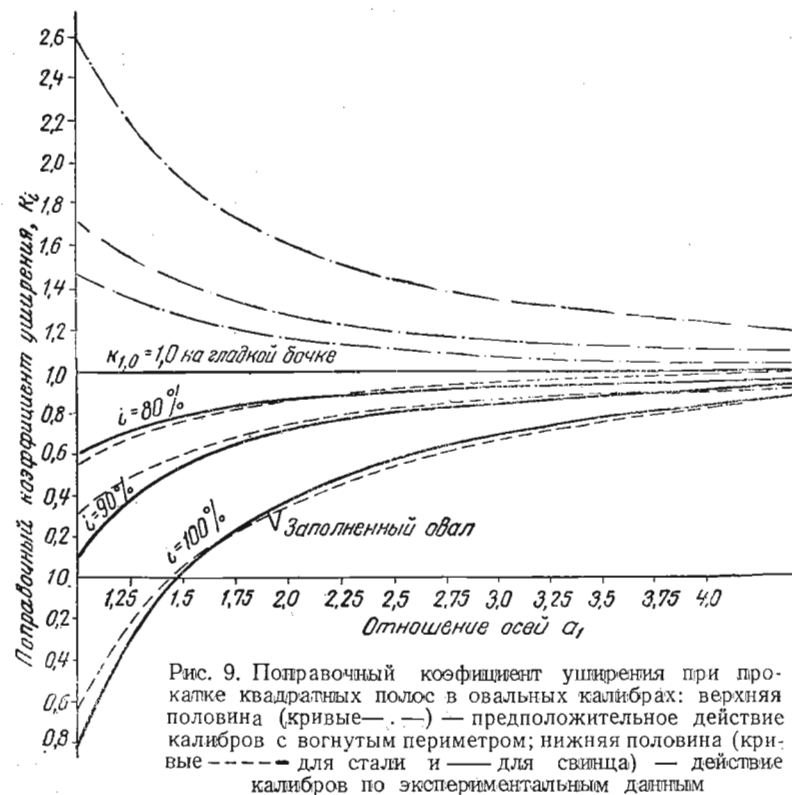


Рис. 9. Поправочный коэффициент уширения при прокатке квадратных полос в овальных калибрах: верхняя половина (кривые —) — предположительное действие калибров с вогнутым периметром; нижняя половина (кривые — — — — — для стали и — — — — — для свинца) — действие калибров по экспериментальным данным

дует, что при изменении коэффициента трения в указанных пределах влияние его на поправочный коэффициент уширения, повидимому, настолько незначительно, что оказывается в пределах точности эксперимента и выявить зависимость между указанными величинами не удастся.

На рис. 10 показана зависимость поправочного коэффициента уширения при прокатке овальных полос в квадратных калибрах от отношения осей задаваемой в калибр полосы и степени заполнения калибра. Опыты полностью подтверждают изложенные выше соображения о влиянии формы исходной полосы на величину уширения и поправочный коэффициент уширения.

Опыты далее показывают, что поправочный коэффициент уширения практически не зависит от степени заполнения. Влия-

ние степени заполнения, как видно из рисунка, находится в пределах точности опыта.

Слабая зависимость поправочного коэффициента уширения от степени заполнения, как уже упоминалось, повидимому, является результатом того, что образующие наклонных стенок калибра

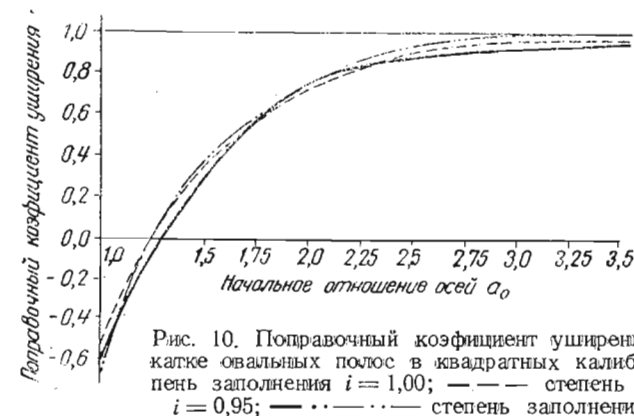


Рис. 10. Поправочный коэффициент уширения при прокатке овальных полос в квадратных калибрах: — степень заполнения  $i=1,00$ ; — — — — — степень заполнения  $i=0,95$ ; — · — · — — степень заполнения  $i=0,90$

не имеют кривизны, благодаря чему соотношение между вертикальными и горизонтальными усилиями при изменении степени заполнения остается постоянным. По этой причине не изменяется и стесняющее действие калибра.

Если принять это объяснение, то на основании приведенных опытов можно сделать следующее заключение: в калибрах, ограниченных прямолинейными элементами (квадрат, ромб и подобные им), поправочный коэффициент уширения мало зависит от степени заполнения.

С ростом отношения осей овальных (квадратных) полос величина уширения в калибрах приближается к величине уширения на гладкой бочке. Это следует из закона подобия, сформулированного еще академиком М. В. Кирпичевым. Согласно этому закону, «в случае подобных условий пластической деформации двух тел, имеющих различные размеры и получающих одну и ту же величину максимальной главной деформации, удельные давления течения равны между собой, отношение деформирующих усилий равно квадрату, а отношение затрачиваемых на изменение формы работ равно кубу отношения линейных размеров» [8].

Из этого закона вытекает, что вследствие динамического подобия равны между собой величины главных деформаций. Если прокатка ведется при подобных условиях деформации, то равны не только удельные давления, но и коэффициенты обжатия, а также определяемые ими коэффициенты уширения и вытяжки.

Действительно, с увеличением отношения осей овальной (квадратной) полосы форма ее сечения приближается к прямоугольной. При бесконечно большом отношении осей условия ее деформации в калибре ничем не отличаются от условий деформации прямоугольной полосы на гладкой бочке. В этом случае закон подобия М. В. Кирпичева бесспорно выполняется, так как, по существу, происходит деформация двух одинаковых полос на гладкой бочке: «модель» и «натура» совпадают и, следовательно, никаких отступлений от закона подобия быть не может.

Во всех остальных случаях, когда отношение осей конечно, подобные условия деформации не соблюдаются и поэтому величина уширения в калибре отличается от величины уширения на гладкой бочке.

Приведенные экспериментальные данные показывают, что основной причиной, вызывающей нарушение равенства коэффициентов деформации соответственных полос, является стесняющее (или разгонное) действие стенок калибра, обусловленное специфической формой этого калибра, его конфигурацией. Указанное действие стенок калибра, вызывающее различие в уширении полосы данного сечения, прокатываемой в калибре, и полосы, ей соответственной, прокатываемой на гладкой бочке, легко учитывается поправочным коэффициентом уширения.

Отсюда следует, что расчет калибровки валков для профилей сложной формы, подвергающихся прямому и частичному боковому обжатию, можно свести к простейшему расчету прямоугольных полос при прокатке их на гладкой бочке.

Такой расчет можно осуществить и для случая прокатки в ряде калибров, геометрическая форма которых одинакова для случаев прокатки в калибрах, не имеющих геометрического подобия, с кантовками между пропусками и без нее.

При расчете необходимо полосу данного сечения пересчитать на соответственную и рассчитать ее уширение при прокатке на гладкой бочке. Затем нужно учесть влияние формы калибра и полосы на уширение, для чего следует рассчитанную величину уширения в гладких валках умножить на поправочный коэффициент уширения. В результате получим уширение в калибре, рассчитанное по соответственной полосе:

$$\frac{\Delta b_c}{\Delta h_c} = k_i \frac{\Delta b}{\Delta h}$$

Затем без труда определяются соответственные высота, ширина и площадь полосы, прокатанной в калибре, и по ним геометрические размеры самого калибра.

На основании изложенных выше общих соображений и опытов можно сделать также некоторые дополнительные выводы.

Во-первых, если образующая калибра представляет собой сочетание выпуклых и вогнутых элементов (рис. 11), то при соответствующем сочетании этих элементов поправочные коэффициенты уширения могут быть больше единицы, меньше единицы или равны единице и даже не зависеть от отношения осей.

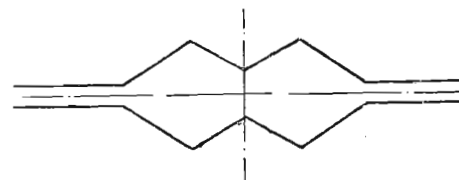


Рис. 11. Схема калибра, состоящего из выпуклых и вогнутых элементов

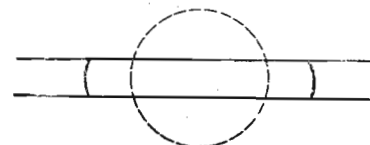


Рис. 12. Схема прокатки круглой полосы на гладкой бочке

Во-вторых, если на гладкой бочке прокатываются полосы, отличающиеся по своей форме от прямоугольных — например, проволока круглого сечения (рис. 12), — то поверхности гладких цилиндрических валков образуют своеобразный калибр, и в этом случае можно с полным основанием говорить о поправочном коэффициенте уширения.

В частности, как показывают опыты, при прокатке круглых полос на гладкой бочке поправочный коэффициент уширения больше единицы и с ростом отношения осей полосы, выкатанной из круглого сечения, поправочный коэффициент уширения стремится к единице.

## § 5. Расчет уширения при прокатке на гладкой бочке

Расчет калибров для прокатки профилей, подвергающихся прямому и частичному боковому обжатию, можно свести к простейшему случаю расчета прямоугольных полос при прокатке их на гладкой бочке. Соответствующие коррективы вносятся поправочным коэффициентом уширения. Такой путь расчета является наиболее приемлемым, ибо невозможно для каждого профиля разрабатывать особый метод расчета, поскольку для современной промышленности требуется большое количество все новых и новых типов размеров. Естественно, что этот путь решения окажется наиболее эффективным при условии, если расчет уширения на гладкой бочке производится с достаточной степенью точности.

Ввиду трудностей математического порядка, возникающих при описании конечных деформаций методами современной математической теории пластичности, указанную проблему пытаются

пока решать более простыми путями — эмпирически или полумэмпирически.

В связи с этим возникает вопрос о пригодности таких решений для условий, выходящих за пределы эксперимента, при котором они были получены. Ответ на него дает опубликованная недавно работа Ю. М. Чижикова [21].

Ю. М. Чижиков подверг систематическому анализу 21 из существующих формул для расчета уширения. При этом было установлено, что формулы Бласса, Жеза, Кирхберга, Шельда, Фалька, Петрова, Тафеля, Седлачека, Седлачека—Тафеля, Чихирова, Александрова и Лашко, Эсса, Хейна, Тринкса, Риделя являются принципиально неправильными и не пригодными для определения уширения.

Было показано также, что формулы Зибеля и Ру имеют большой недостаток, заключающийся в том, что в них входят постоянные числовые коэффициенты, значения которых требуют уточнения для различных случаев прокатки. Формула Экелунда практически непригодна вследствие ее сложности.

Формулы М. И. Злотникова [22] и Б. П. Бахтинова [23] являются более совершенными, но применимы в сравнительно узком диапазоне изменения параметров процесса прокатки.

Заслуживает особого упоминания метод расчета уширения, предложенный А. Ф. Головиным<sup>1</sup>, в основу которого положена разработанная им теория параллелепипедной деформации [10]. Основные положения этой теории впоследствии использовал И. Я. Тарновский для полумэмпирического способа расчета уширения [24].

Ю. М. Чижиков на основе анализа приходит к выводу, что одной из лучших является формула С. И. Губкина, которую он и рекомендует для подсчета уширения. Формула может быть улучшена, если учесть в ней влияние ширины полосы на уширение и уточнить способ определения коэффициента трения.

Принимая во внимание выводы Ю. М. Чижикова, в дальнейшем для расчета уширения будем пользоваться формулой С. И. Губкина<sup>2</sup>, в которую введем коэффициенты, учитывающие влияние ширины полосы на уширение и способ определения коэффициента трения. С указанными коррективами формула С. И. Губкина приобретает такой вид:

при значениях  $\frac{b_0}{h_0} \leq 1$

$$\frac{\Delta b}{\Delta h} = \frac{b_0}{h_0} \left( 1 + \frac{\Delta h}{h_0} \right) \left( 1,27 \mu \sqrt{\frac{\Delta h}{h_0} \cdot \frac{D_p}{h_0} - \frac{\Delta h}{2h_0}} \right); \quad (22-1)$$

<sup>1</sup> А. Ф. Головин. Прокатка Ч. III. Калибровка. ОНТИ, 1934, стр. 3.  
<sup>2</sup> С. И. Губкин. Теория обработки металлов давлением. Металлургиздат, 1947.

При значениях  $\frac{b_0}{h_0} \geq 1$

$$\frac{\Delta b}{\Delta h} = \left( 1 + \frac{\Delta h}{h_0} \right) \left( 1,27 \mu \sqrt{\frac{\Delta h}{h_0} \cdot \frac{D_p}{h_0} - \frac{\Delta h}{2h_0}} \right), \quad (23-1)$$

где  $\frac{\Delta b}{\Delta h}$  — отношение уширения к обжатию (коэффициент уширения);

$\frac{\Delta h}{h_0}$  — относительное обжатие;

$\frac{D_p}{h_0}$  — отношение рабочего диаметра к высоте полосы до прокатки;

$\mu$  — коэффициент трения при прокатке.

В этих формулах коэффициент трения для углеродистых сталей определяется по данным Н. Н. Гета [3].

Зависимость коэффициента трения от температуры, по Н. Н. Гету, приведена на рис. 13. Эту зависимость в интервале температур от 700 до 1250° при прокатке на стальных валках можно выразить эмпирической формулой:

$$\mu = 0,57 - 0,00024 t. \quad (24-1)$$

При прокатке на чугунных валках коэффициент трения можно вычислять по формуле:

$$\mu = 0,8 (0,57 - 0,00024 t). \quad (25-1)$$

Упомянутые уточнения, касающиеся способа определения коэффициента трения и учета влияния ширины полосы, введены нами на основании опытных лабораторных и заводских данных и дей-

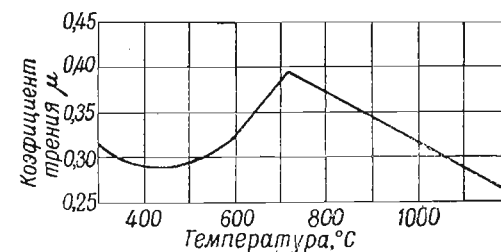


Рис. 13. Зависимость коэффициента трения от температуры для стали, содержащей 0,5—0,80% С (по Н. Н. Гету)

ствительны для случая горячей прокатки сортовой стали.

Опыты показывают, что точность формул (22-1) и (23-1) при  $\frac{b_0}{h_0} < 3$  составляет примерно  $\pm 10\%$ . При  $\frac{b_0}{h_0} > 3$  погрешность формулы постепенно возрастает, и она дает все более завышенные значения.

В дальнейшем, при расчете калибровки часто придется пользоваться формулами (22—I) и (23—I), полагая коэффициент трения  $\mu = 0,3$ . Поэтому по указанным формулам построена номограмма, приведенная на рис. 14.

При соотношениях в размерах полосы  $\frac{b_0}{h_0} \gg 1$  пользуются только правой частью номограммы и, следовательно, значениями  $\frac{\Delta b}{\Delta h}$ , отложенными по вертикальной шкале.

Когда  $\frac{b_0}{h_0} < 1$ , пользуются и правой, и левой частями номограммы так, что значения  $\frac{\Delta b}{\Delta h}$  берут по горизонтальной шкале. Порядок отсчета значений в этом случае показан на рис. 14 пунктирной линией.

## § 6. Расчет деформации полосы по заданному отношению сторон ее поперечного сечения

Поправочные коэффициенты уширения являются, как мы видели (§ 4), функцией отношения сторон (осей) полосы. С учетом этого обстоятельства выведем соотношения, при помощи которых производится расчет деформации полосы по заданному отношению сторон ее поперечного сечения.

Пусть необходимо рассчитать обжатие, уширение и, следовательно, размеры полосы по заданному отношению сторон ее поперечного сечения при прокатке на гладкой бочке. Здесь возможны следующие четыре случая.

**С л у ч а й 1.** Рассчитать обжатие, уширение и размеры поперечного сечения полосы после пропуска, если известны размеры полосы  $h_0$ ,  $b_0$  до пропуска и отношение сторон  $a_1$  ее поперечного сечения после пропуска при условии, что отсутствует кантовка между пропусками (рис. 15, а).

Обжатие, уширение и линейные размеры полосы до и после пропуска связаны следующими соотношениями:

$$\left. \begin{aligned} b_1 &= b_0 + \Delta b; \\ h_1 &= h_0 - \Delta h. \end{aligned} \right\} \quad (26 - I)$$

Поделив почленно первое равенство на второе, получим:

$$\frac{b_1}{h_1} = \frac{b_0 + \Delta b}{h_0 - \Delta h}$$

или

$$a_1 = \frac{b_0 + \Delta b}{h_0 - \Delta h}.$$

Откуда:

$$\begin{aligned} a_1 h_0 - a_1 \Delta h &= b_0 + \Delta b; \\ \Delta b + a_1 \Delta h &= a_1 h_0 - b_0; \\ \Delta h \left( a_1 + \frac{\Delta b}{\Delta h} \right) &= a_1 h_0 - b_0 \end{aligned}$$

и окончательно

$$\Delta h = \frac{a_1 h_0 - b_0}{a_1 + \frac{\Delta b}{\Delta h}} \quad (27 - I)$$

С л у ч а й 2. Рассчитать обжатие, уширение и размеры поперечного сечения полосы до пропуска, если известны линейные размеры полосы  $h_1$ ,  $b_1$  после прокатки и отношение сторон  $a_0$  ее поперечного сечения до пропуска при условии, что отсутствует кантовка между пропусками (рис. 15, б).

Перепишем равенства (26—I) в таком виде:

$$\begin{aligned} b_0 &= b_1 - \Delta b; \\ h_0 &= h_1 + \Delta h. \end{aligned}$$

Поделив почленно первое равенство на второе, получим:

$$a_0 = \frac{b_1 - \Delta b}{h_1 + \Delta h},$$

откуда после несложных преобразований

$$\Delta h = \frac{b_1 - a_0 h_1}{a_0 + \frac{\Delta b}{\Delta h}} \quad (28 - I)$$

С л у ч а й 3. Рассчитать обжатие, уширение и размеры поперечного сечения полосы после пропуска, если известны размеры  $h_0$ ,  $b_0$  до пропуска и отношение сторон  $a_1$  ее поперечного сечения после пропуска при условии, что между пропусками производится кантовка.

Как видно из рис. 15, в, после кантовки ширина полосы становится высотой  $h_0$ , а высота ее шириной  $b_0$ . Поэтому

$$\begin{aligned} b_1 &= b_0 + \Delta b; \\ h_1 &= h_0 - \Delta h. \end{aligned}$$

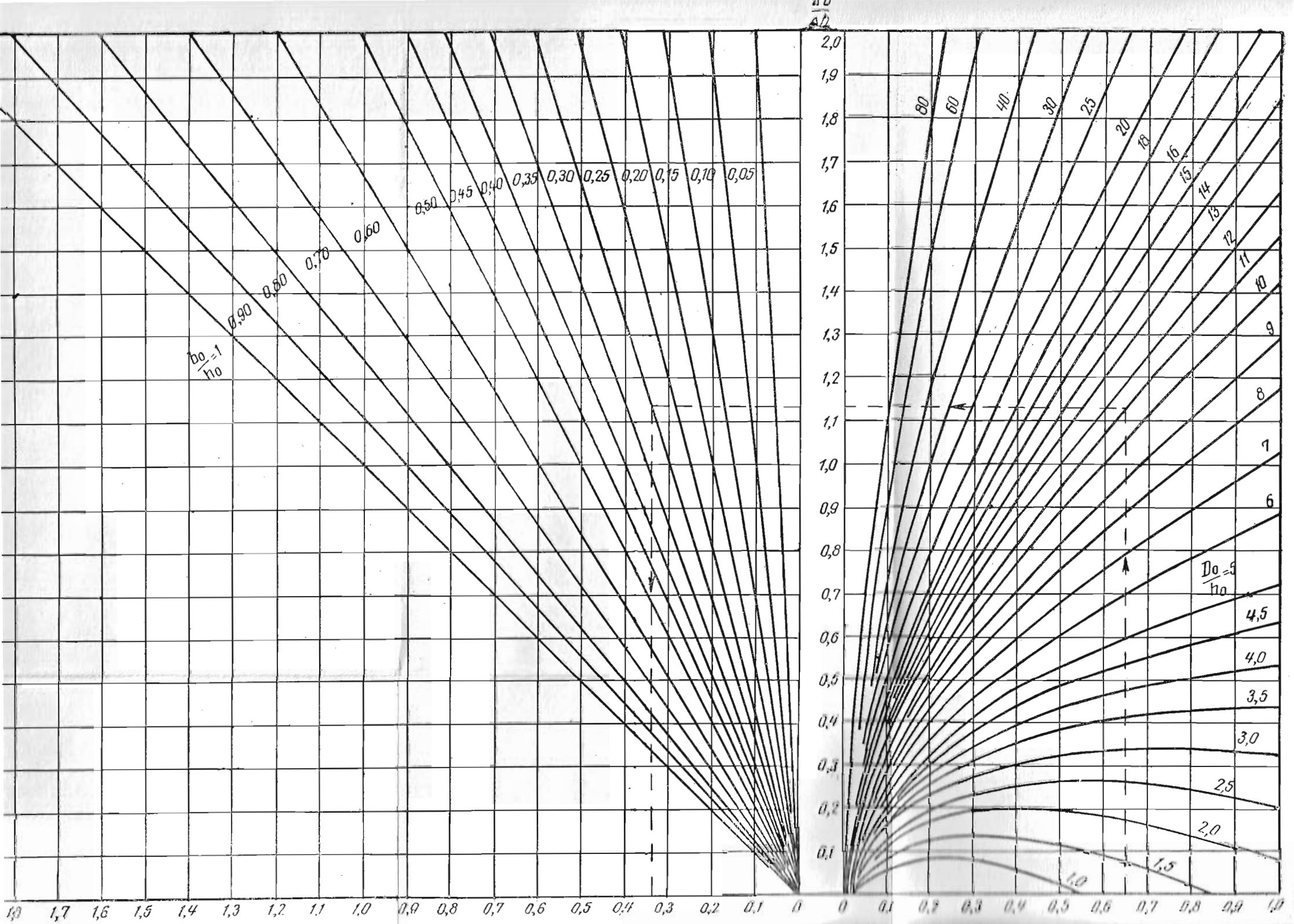
Поделив почленно первое равенство на второе, получим:

$$a_1 = \frac{b_0 + \Delta b}{h_0 - \Delta h},$$

откуда после простых преобразований

$$\Delta h = \frac{a_1 h_0 - b}{a_1 + \frac{\Delta b}{\Delta h}}$$





Таким образом, получили уже известное равенство (27—I), выведенное для случая прокатки без кантовки.

С л у ч а й 4. Рассчитать обжатие, уширение и размеры поперечного сечения полосы до пропуска, если известны линейные размеры полосы  $h_1$ ,  $b_1$  после пропуска и отношение сторон  $a_0$  ее поперечного сечения до пропуска при условии, что между пропусками производится кантовка (рис. 15, г).

Перепишем равенства (26—I) в таком виде:

$$\begin{aligned} h_0 &= h_1 + \Delta h; \\ b_0 &= b_1 - \Delta b. \end{aligned}$$

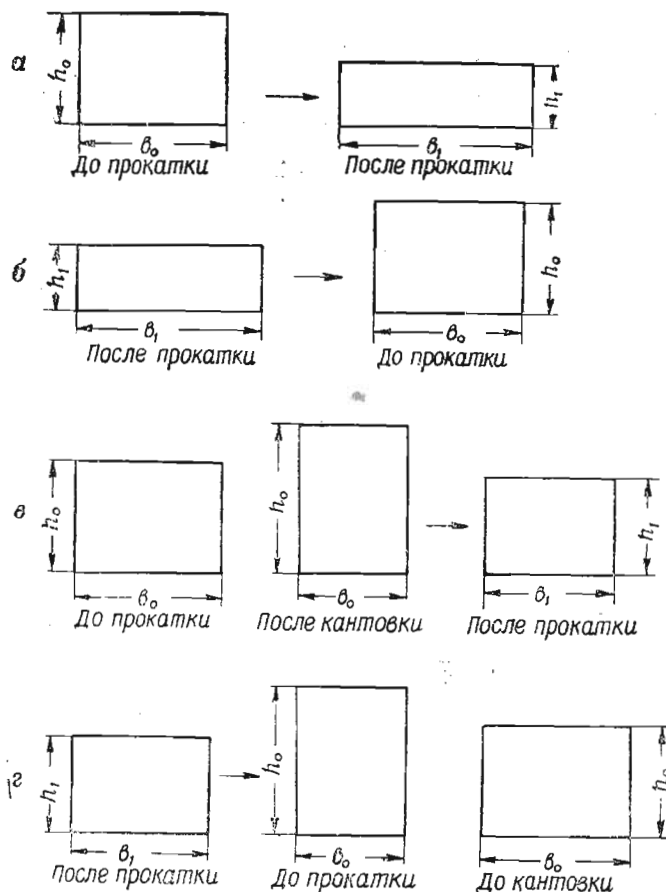


Рис. 15. Схема к расчету деформации полосы при прокатке по заданному отношению диагоналей

Учитывая кантовку полосы, имеем:

$$a_0 = \frac{h_0}{b_0}.$$

Поделив почленно первое равенство на второе, получим:

$$a_0 = \frac{h_1 + \Delta h}{b_1 - \Delta b},$$

откуда после простых преобразований

$$\Delta h = \frac{a_0 b_1 - h_1}{1 + a_0 \frac{\Delta b}{\Delta h}} \quad (29—I)$$

В § 3 дано определение соответственных полос и формул (9—I ÷ 12—I), при помощи которых можно определить высоту и ширину соответственных прямоугольных полос по площади поперечного сечения и отношению характеристических осей полос фасонного сечения.

В § 4 было показано, что если пересчитать фасонные полосы на соответственные им прямоугольные и сравнить уширение фасонных полос, вычисленное по соответственным размерам, с уширением прямоугольных полос на гладкой бочке при условии, что исходные размеры прямоугольных полос равны соответственным размерам фасонных полос, то при одинаковых отношениях осей уширение фасонных полос в калибрах в  $k_i$  раз отличается от уширения прямоугольных полос при прокатке их на гладкой бочке. Отсюда следует, что равенствами (27—I; 28—I; 29—I) можно воспользоваться для расчета деформации при прокатке в калибрах.

В этом случае вместо величин  $h_0$ ,  $b_0$ ,  $h_1$ ,  $b_1$ ,  $\Delta h$ ,  $\Delta b$  в указанных равенства войдут значения  $h_{0c}$ ,  $b_{0c}$ ,  $h_{1c}$ ,  $b_{1c}$ ,  $\Delta h_c$ ,  $\Delta b_c$ , вычисленные по соответственным размерам.

Выше было показано, что если прокатка производится в калибрах, то, благодаря «стесняющему» или «разгонному» действию калибра, обусловленному влиянием его конфигурации, уширение по соответственной полосе, прокатанной в данном калибре, при прочих равных условиях, будет отличаться от уширения соответственной прямоугольной полосы на гладкой бочке. Разница в уширении учитывается поправочным коэффициентом уширения. Действительно, из формулы (21—I) следует, что уширение соответственной полосы в калибре равно:

$$\frac{\Delta b_c}{\Delta h_c} = k_i \frac{\Delta b}{\Delta h}.$$

Заменяя в равенствах (27—I) — (29—I) величины  $h_0$ ,  $b_0$ ,  $h_1$ ,  $b_1$ ,  $\Delta h$ ,  $\Delta b$  на соответственные  $h_{0c}$ ,  $b_{0c}$ ,  $h_{1c}$ ,  $b_{1c}$ ,  $\Delta h_c$ ,  $\Delta b_c$  и принимая во внимание последнее соотношение, получим следующие формулы:

для случаев 1 и 3—

$$\Delta h_c = \frac{a_1 h_{0c} - b_{0c}}{a_1 + \frac{\Delta b_c}{\Delta h_c}}; \quad (30-I)$$

для случая 2—

$$\Delta h_c = \frac{b_{1c} - a_0 h_{1c}}{a_0 + \frac{\Delta b_c}{\Delta h_c}}; \quad (31-I)$$

для случая 4 —

$$\Delta h_c = \frac{a_0 b_{1c} - h_{1c}}{1 + a_0 \frac{\Delta b_c}{\Delta h_c}}. \quad (32-I)$$

При расчете по этим равенствам точность будет еще выше, чем по равенствам (27—I, 28—I, 29—I), так как при умножении предварительно заданного значения  $\frac{\Delta b}{\Delta h}$  на поправочный коэффициент уширения  $k_i$ , значения которого обычно меньше единицы, погрешность уменьшается.

Примеры пользования равенствами (30—I) — (32—I) будут даны в следующих главах.

Приведенные выше формулы показывают, что расчет обжатия и уширения полосы по заданному отношению сторон ее поперечного сечения производится методом последовательных приближений.

В связи с этим возникает вопрос о точности решения и числе необходимых пересчетов. Для ответа на этот вопрос приведем примеры расчетов по формулам (27—I) — (29—I) для конкретных случаев прокатки.

**ПРИМЕР 1.** Рассчитать деформацию полосы после пропуска, если ее начальная высота  $h_0 = 30$  мм, ширина  $b_0 = 40$  мм и отношение осей после пропуска  $a_1 = \frac{b_1}{h_1} = 3$ . Диаметр валков  $D_p = 350$  мм; прокатка металла осуществляется в горячем состоянии. Коэффициент трения при прокатке  $\mu = 0,3$ .

*Предварительный расчет*

Задаемся коэффициентом уширения  $\frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,5$ , тогда при  $a_1 = 3$  по формуле (27—I) линейное обжатие

$$\Delta h = \frac{a_1 h_0 - b_0}{a_1 + \frac{\Delta b}{\Delta h}} = \frac{3 \cdot 30 - 40}{3 + 0,5} = \frac{50}{3,5} = 14,3 \text{ мм.}$$

Относительное обжатие:

$$\frac{\Delta h}{h_0} = \frac{14,3}{30} = 0,478.$$

Высота полосы после пропуска:

$$h_1 = h_0 - \Delta h = 30 - 14,3 = 15,7 \text{ мм.}$$

Отношение рабочего диаметра к высоте полосы

$$\frac{D_p}{h_0} = \frac{350}{30} = 11,6.$$

По номограмме (рис. 14) или формуле (23—I) находим, что:

$$\frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,97.$$

*1-й пересчет*

$$\Delta h = \frac{3 \cdot 30 - 40}{3 + 0,97} = \frac{50}{3,97} = 12,6 \text{ мм;}$$

$$\frac{\Delta h}{h_0} = \frac{12,6}{30} = 0,42;$$

$$\frac{D_p}{h_0} = 11,6.$$

По номограмме (рис. 14):

$$\frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,89.$$

*2-й пересчет*

$$\Delta h = \frac{3 \cdot 30 - 40}{3 + 0,89} = \frac{50}{3,89} = 12,8 \text{ мм;}$$

$$\frac{\Delta h}{h_0} = \frac{12,8}{30} = 0,427;$$

$$\frac{D_p}{h_0} = 11,6.$$

По номограмме (рис. 14):

$$\frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,90.$$

Разница между величинами линейного обжатия, полученная в результате первого и второго пересчета, составляет

$$\frac{12,6 - 12,8}{12,6} \cdot 100 = -1,59\%,$$

что можно считать вполне удовлетворительным при решении аналогичных задач.

Предварительно заданная величина коэффициента уширения  $\frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,5$  отличается от величины его  $\frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,97$ , полученной после первого пересчета, в  $\frac{0,89}{0,5} = 1,78$  раза.

Различие же между коэффициентами уширения после первого и второго пересчетов составит уже только

$$\frac{0,89 - 0,90}{0,89} \cdot 100 = -1,12\%.$$

На рис. 16 графически представлены результаты произведенных вычислений. Рисунок наглядно показывает, что при расчете по заданному отношению сторон поперечного сечения технически точные значения обжатия получаем уже после первого пересчета.

Поэтому по данным, полученным после первого пересчета, и определяем конечные размеры полосы.

Высота полосы:

$$h_1 = h_0 - \Delta h = 30 - 12,6 = 17,4 \text{ мм.}$$

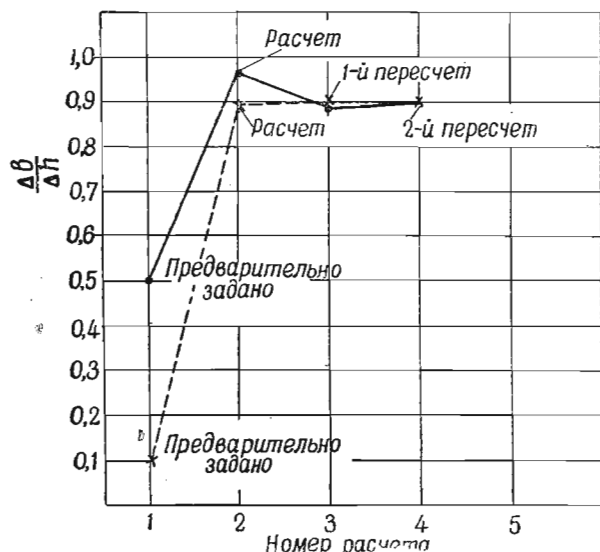


Рис. 16. Результаты расчета деформации по равенствам (27—I), (28—I) и (29—I): ——— прямой порядок расчета; — — — обратный порядок расчета

Ширина полосы:

$$b_1 = a_1 h_1 = 3 \cdot 17,4 = 52,2 \text{ мм.}$$

Представляет интерес выяснить вопрос о сходимости результатов «прямого» и «обратного» расчетов. Поэтому по размерам полосы после пропуска, полученным на основании расчета в предыдущем примере, определим начальные размеры полосы.

**ПРИМЕР 2.** По данным размерам полосы после пропуска  $h_1 = 17,4 \text{ мм}$ ,  $b_1 = 52,2 \text{ мм}$  и начальному отношению осей полосы  $a_0 = 1,33$ , найдем ее размеры до прокатки.

### Предварительный расчет

Задаемся коэффициентом уширения  $\frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,1$  (заведомо малым), тогда по формуле (28—I):

$$\Delta h = \frac{b_1 - a_0 h_1}{a_0 + \frac{\Delta b}{\Delta h}} = \frac{52,2 - 1,33 \cdot 17,4}{1,33 + 0,1} = \frac{29,0}{1,43} = 20,2 \text{ мм;}$$

$$h_0 = h_1 + \Delta h = 17,4 + 20,2 = 37,6 \text{ мм;}$$

$$\frac{\Delta h}{h_0} = \frac{20,2}{37,6} = 0,538;$$

$$\frac{D_p}{h_0} = \frac{350}{37,6} = 9,3.$$

По номограмме (рис. 14):

$$\frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,89.$$

1-й пересчет

$$\Delta h = \frac{52,2 - 1,33 \cdot 17,4}{1,33 + 0,89} = \frac{29,0}{2,22} = 13,1 \text{ мм;}$$

$$h_0 = 17,4 + 13,1 = 30,5 \text{ мм;}$$

$$\frac{\Delta h}{h_0} = \frac{13,1}{30,5} = 0,43;$$

$$\frac{D_p}{h_0} = \frac{350}{30,5} = 11,45.$$

По номограмме (рис. 14):

$$\frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,9.$$

2-й пересчет

$$\Delta h = \frac{52,2 - 1,33 \cdot 17,4}{1,33 + 0,9} = 13,0 \text{ мм;}$$

$$h_0 = 17,4 + 13 = 30,4 \text{ мм;}$$

$$\frac{\Delta h}{h_0} = \frac{13,0}{30,4} = 0,428;$$

$$\frac{D_p}{h_0} = \frac{350}{30,4} = 11,5.$$

По номограмме (рис. 14):

$$\frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,9.$$

Разница между величинами линейного обжатия, полученная в результате первого и второго пересчета, составляет:

$$\frac{13,1 - 13,0}{13,1} \cdot 100 = 0,76\%.$$

Это также подтверждает, что первый пересчет дает достаточную для аналогичных технических задач точность.

Поэтому по данным, полученным после первого пересчета, и определяем начальные размеры полосы.

Начальная высота полосы:

$$h_0 = h_1 + \Delta h = 17,4 + 13,1 = 30,5 \text{ мм};$$

начальная ширина полосы:

$$b_0 = a_0 h_0 = 1,33 \cdot 30,5 = 40,6 \text{ мм}.$$

Результаты расчетов приведены на рис. 16.

Рисунок показывает, что результаты «прямого» и «обратного» расчета практически совпадают уже после первого пересчета.

**ПРИМЕР 3.** Рассчитать деформацию полосы при прокатке, если ее начальная высота  $h_0 = 30 \text{ мм}$ , ширина  $b_0 = 40 \text{ мм}$ , отношение осей после пропуска  $a_1 = 1,4$ . Между пропусками полоса кантуется.

Диаметр валков  $D_p = 300 \text{ мм}$ . Прокатка производится в горячем состоянии, коэффициент трения  $\mu = 0,3$ .

*Предварительный расчет*

Величина обжатия определяется по формуле (27—I):

$$\Delta h = \frac{a_1 h_0 - b_0}{a_1 + \frac{\Delta b}{\Delta h}}.$$

Так как полоса кантуется, то значения  $h_0$  и  $b_0$  меняются местами, отношение же осей после пропуска остается заданным.

Задаемся коэффициентом уширения  $\frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,5$ , тогда при  $a_1 = 1,4$ :

$$\Delta h = \frac{1,4 \cdot 40 - 30}{1,4 + 0,5} = \frac{26}{1,9} = 13,6 \text{ мм};$$

$$\frac{D_p}{h_0} = \frac{300}{40} = 7,5; \quad \frac{\Delta h}{h_0} = \frac{13,6}{40} = 0,34; \quad \frac{b_0}{h_0} = \frac{30,0}{40} = 0,75.$$

По номограмме (рис. 14) или по формуле (22—I):

$$\frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,45.$$

*1-й пересчет*

$$\Delta h = \frac{1,4 \cdot 40 - 30}{1,4 + 0,45} = \frac{26}{1,85} = 14 \text{ мм}.$$

На основании предыдущих примеров уже известно, что первый пересчет дает удовлетворительные результаты, а поэтому принимаем  $\Delta h = 14 \text{ мм}$ . Тогда

$$h_1 = 40 - 14 = 26 \text{ мм};$$

$$b_1 = h_1 a_1 = 26 \cdot 1,4 = 36,4 \text{ мм}.$$

**ПРИМЕР 4.** Рассчитать деформацию при прокатке по известным размерам конечной полосы  $h_1 = 26 \text{ мм}$ ,  $b_1 = 36,4 \text{ мм}$  и отношению осей до пропуска  $a_0 = 1,33$ . Перед пропуском полоса кантуется.  $D_p = 300 \text{ мм}$ ,  $\mu = 0,3$ .

*Предварительный расчет*

Величина обжатия определяется по формуле (29—I):

$$\Delta h = \frac{a_0 b_1 - h_1}{1 + a_0 \frac{\Delta b}{\Delta h}}.$$

Задаемся коэффициентом относительного уширения

$$\frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,5, \text{ тогда при } a_0 = 1,33:$$

$$\Delta h = \frac{1,33 \cdot 36,4 - 26}{1 + 1,33 \cdot 0,5} = \frac{48,5 - 26}{1,667} = \frac{22,5}{1,667} = 13,5 \text{ мм};$$

$$h_0 = 13,5 + 26 = 39,5 \text{ мм};$$

$$\frac{D_p}{h_0} = \frac{300}{39,5} = 7,6;$$

$$\frac{\Delta h}{h_0} = \frac{13,5}{39,5} = 0,342.$$

$$\text{При } \frac{D_p}{h_0} = 7,6, \quad \frac{\Delta h}{h_0} = 0,342, \quad \frac{b_0}{h_0} = 0,75,$$

по формуле (22—I) или по номограмме (рис. 14) получаем:

$$\frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,585 \cdot 0,75 = 0,44.$$

*1-й пересчет*

$$\Delta h = \frac{1,33 \cdot 36,4 - 26}{1 + 1,33 \cdot 0,44} = \frac{22,5}{1,586} = 14,1 \text{ мм}.$$

Исходная полоса будет иметь следующие размеры:

$$b_0 = h_1 + \Delta h = 26 + 14,1 = 40,1 \text{ мм};$$

$$h_0 = \frac{b_0}{a_0} = \frac{40,1}{1,33} = 30,1 \text{ мм}.$$

Примеры 3 и 4 снова подтверждают, что уже при первом пересчете получаются значения, точность которых достаточна для практических целей, и дальнейших перерасчетов не требуется.

## § 7. Общий характер зависимости между отношением осей полосы, отношением осей калибра и степенью его заполнения

Для того, чтобы предотвратить переполнение калибров, площадь поперечного сечения полосы в большинстве случаев подбирают так, чтобы она была меньше площади поперечного сечения калибра. Этим стараются предупредить появление заусенцев и последующих закатов на полосе. Таким образом, с точки зрения качества желательное некоторое незаполнение калибра. С другой стороны, в калибрах с криволинейным периметром незаполнение способствует развитию уширения и, следовательно, уменьшает вытяжку, что неблагоприятно сказывается на производительности стана. Отсюда понятно, что при рациональном расчете калибров необходимо учитывать влияние степени заполнения на уширение (вытяжку). Для этого необходимо установить аналитическую зависимость между отношениями осей полосы и калибра и степенью заполнения последнего.

Как уже упоминалось, степенью заполнения калибра  $i$  называется отношение площади поперечного сечения полосы  $\omega$  к площади поперечного сечения калибра  $\omega_k$  в плоскости, проведенной через оси прокатных валков:

$$i = \frac{\omega}{\omega_k}. \quad (20-I)$$

Площадь поперечного сечения полосы является функцией линейных размеров сечения, точнее, функцией характеристических осей  $b$  и  $h$ .

Площадь поперечного сечения калибра также является функцией характеристических осей калибра  $b_k$  и  $h_k$ .

Таким образом:

$$\omega = f_1(b, h);$$

$$\omega_k = f_2(b_k, h_k).$$

Подставляя эти зависимости в равенство (20—I), после соответствующих преобразований получим уравнение, связывающее степень заполнения  $i$ , отношение осей полосы  $a = \frac{b}{h}$  и отношение осей калибра  $a_k = \frac{b_k}{h_k}$ :

$$f_3(a_k, a, i) = 0.$$

Решая это уравнение относительно  $a_k$ , получим функцию вида

$$a_k = f_4(a, i). \quad (33-I)$$

По равенству (33—I), построенному для калибров различной геометрической формы, легко определяется отношение осей калибра, если известно отношение осей полосы и степень заполне-

ния калибра. Без труда решается и обратная задача — отыскание отношения осей полосы, если известно отношение осей калибра и степень его заполнения.

Знание зависимости между отношением осей калибра, отношением осей полосы и степенью заполнения совершенно необходимо для рационального расчета калибров, поскольку в подавляющем большинстве случаев площади поперечного сечения полос и площади калибров, в которых производится прокатка этих полос, различны по величине. От величины заполнения калибра, как увидим ниже, сильно зависит вытяжка и, следовательно, производительность стана.

## § 8. Общий ход расчета калибров

На основании изложенного кратко опишем порядок расчета калибров.

1. По линейным размерам характеристических осей и площади поперечного сечения данной полосы фасонного сечения определяют по формулам (9—I; 10—I) или (11—I; 12—I) ее соответственные размеры  $h_{oc}$ ,  $b_{oc}$  или  $h_{1c}$ ,  $b_{1c}$ .

2. Задаются отношением осей искомой полосы и по одному из равенств (27—I; 28—I; 29—I) рассчитывают деформацию полосы, размеры которой равны  $h_0 = h_{oc}$ ;  $b_0 = b_{oc}$  или  $h_1 = h_{1c}$ ;  $b_1 = b_{1c}$ , в предположении, что прокатка производится на гладкой бочке. В результате расчета определяют коэффициент уширения  $\frac{\Delta b}{\Delta h}$  при прокатке на гладкой бочке.

3. Задаются степенью заполнения калибра  $i$ . Таким образом, степень заполнения калибра и отношение осей полосы оказываются известными. По этим данным находят поправочный коэффициент уширения.

4. По равенству (21—I) определяют коэффициент уширения в калибре.

5. Подставляют известные теперь значения отношения осей полосы, коэффициента уширения в калибрах в одно из равенств (30—I; 31—I; 32—I), рассчитывают деформацию полосы в калибре и, следовательно, определяют соответственные размеры искомой полосы  $h_{1c}$ ;  $b_{1c}$  или  $h_{oc}$ ;  $b_{oc}$ , а также ее площадь  $\omega_{1c} = h_{1c} b_{1c}$  или  $\omega_{oc} = h_{oc} b_{oc}$ .

Этим расчетом определяется площадь поперечного сечения искомой полосы фасонного сечения, поскольку  $\omega_{1c} = \omega_1$  и  $\omega_{oc} = \omega_0$ .

6. Определяют площадь калибра:

$$\omega_k = \frac{\omega_1}{i} \text{ или } \omega_k = \frac{\omega_0}{i}.$$



7. Определяют отношение осей калибра  $a_k$  по степени заполнения калибра и отношению осей полосы.

8. По известным площади и отношению осей калибра определяют линейные размеры калибра. Для этого, исходя из конкретной геометрической формы калибра, составляют геометрические соотношения, выражающие зависимость между его линейными размерами, отношением осей и площадью.

Итак, расчет калибров складывается из следующих трех основных операций:

- 1) расчета деформации полосы при прокатке на гладкой бочке;
- 2) расчета деформации полосы при прокатке в калибре;
- 3) расчета геометрических размеров калибра.

### § 9. Границы применимости метода расчета по соответственной полосе

По литературным данным, закономерности для прямого обжатия справедливы и в том случае, если наряду с ним имеется боковое обжатие. При этом наклон элементов поверхности калибра, вызывающих боковое обжатие, к оси вала может достигать до  $45-60^\circ$ . Если этот угол превышает указанные пределы, то боковое обжатие будет преобладать над прямым и проявят себя закономерности, наблюдаемые при прокатке фланцевых профилей: утяжка их по высоте в закрытых частях и приращение в открытых частях калибра, что связано уже с действием скоростного фактора, анализ которого произведен еще В. Е. Грум-Гржимайло [2]. Здесь, как известно, проблема правильного подсчета уширения перестает играть преобладающее значение и возникают особые условия, которые требуют принципиально нового подхода к расчетам калибровки.

Таким образом, метод расчета калибров по соответственной полосе с использованием поправочных коэффициентов уширения применим для расчетов калибровки профилей с выпуклым и вогнутым периметром, подвергающихся прямому и частичному боковому обжатию. Этому условию удовлетворяют овальные, квадратные, ромбические, круглые, шестиугольные калибры, многочисленные категории полосовых профилей, калибры для прокатки угловой равнобокой и неравнобокой стали и подобных им.

Следовательно, изложенный метод применим для расчетов калибровки простых профилей и профилей, занимающих промежуточное положение между простыми и фланцевыми.

Обратим внимание еще на одно существенное обстоятельство, которое следует иметь в виду при использовании метода расчета калибровки по соответственной полосе.

На рис. 17 и 18 изображены три различных профиля, занимающих промежуточное положение между простыми и фланце-

выми. Выясним возможность применения метода расчета калибровки их по соответственной полосе.

Угловой и зетовый профили (рис. 17) легко могут быть рассчитаны по соответственной полосе, ибо характеристическая вы-

сота профиля легко определяется самой его конфигурацией и выбор ее не представляет затруднений. В угловом профиле характеристическая высота располагается на вертикали  $mm$ .

В зетовом профиле можно наметить по крайней мере уже три характеристические высоты на вертикалях  $mm$ .

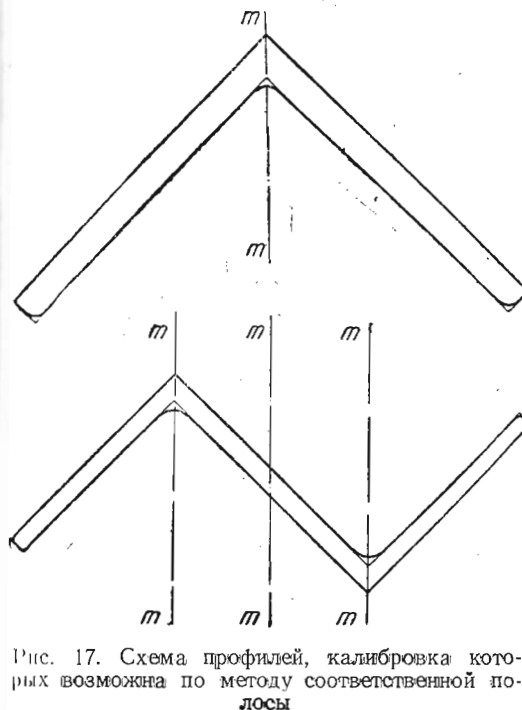


Рис. 17. Схема профилей, калибровка которых возможна по методу соответственной полосы



Рис. 18. Схема профиля, калибровка которого по методу соответственной полосы невозможна

Однако, как видно из рисунка, на всех вертикалях характеристические высоты (если пренебречь закрутлениями) численно равны между собой и, следовательно, отношение характеристических осей профиля является величиной постоянной и вполне определенной для данного профиля, поскольку ширина данного профиля при данном его положении относительно координатных осей также постоянна. Таким образом, метод расчета по соответственной полосе может быть использован для профилей типа угловых, зетовых и подобных им, у которых характеристическая высота по ширине профиля одинакова.

Иные условия создаются при калибровке профилей типа, изображенного на рис. 18. Так как высота профиля по ширине его изменяется, то выбор характеристической высоты вызывает затруднения. В зависимости от положения характеристической вы-

соты по ширине профиля будет изменяться отношение осей, а, следовательно, длина, ширина соответственной полосы и соотношение между ними. Все это вносит элемент неопределенности в решение задачи о калибровке такого профиля. Задача не имеет уже однозначного решения и, следовательно, метод расчета по соответственной полосе здесь неприменим.

На рис. 19 изображен полособульбовый профиль в одном из промежуточных калибров. При данном положении профиля от-

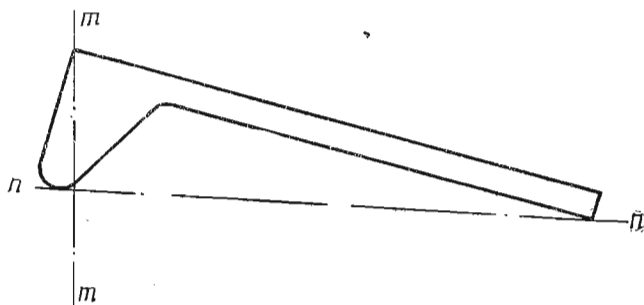


Рис. 19. Схема профиля, калибровка которого по методу соответственной полосы возможна при условии, если задать строго определенное положение горизонтальной  $пп$  и вертикальной  $тт$  осей калибра в валках

носителю координатных осей высота профиля по ширине, как и в предыдущем случае, также неодинакова. Однако, исходя из конфигурации профиля и технологических соображений, за характеристическую высоту его можно принять величину  $h$  в сечении  $тт$ . В таком случае калибровка этого профиля по соответственной полосе оказывается возможной.

В заключение заметим, что ничто не мешает экспериментальным путем установить критерии для выбора характеристических осей и для несимметричных профилей с переменной по ширине высотой.

В этом случае границы применимости метода расчета по соответственной полосе могут быть значительно расширены вплоть до использования его для калибровки фланцевых профилей.

## ГЛАВА II

### СИСТЕМЫ РОМБИЧЕСКИХ КАЛИБРОВ

#### § 1. Особенности прокатки в ромбических калибрах и область их применения

Ромбические калибры выполняются так, что их малая диагональ перпендикулярна оси, а большая диагональ — параллельна оси прокатных валков.

Ромбические калибры часто можно встретить на обжимных и черновых валках крупносортовых и мелкосортных станов. Они широко применяются также на валках заготовочных трехвалковых станов. Это объясняется тем, что каждый ромбический калибр системы ромб — ромб, ромб — квадрат является предотделочным для квадратной заготовки соответствующего размера. В системе же квадрат — квадрат из каждого калибра можно выдавать заготовку. При широком сортаменте заготовок, прокатываемых на данном стане, применение ромбических калибров оказывается весьма удобным.

При прокатке крупных и средних профилей часто можно встретить системы, целиком состоящие из ромбических калибров.

При прокатке мелких профилей обычно ромбические калибры предшествуют системе овал — квадрат или подобной ей.

Система ромб — квадрат получила наибольшее распространение как вытяжная система калибров. Она применяется как составная часть в комбинированных системах и как самостоятельная при прокатке квадратной заготовки. Достоинством системы ромб — квадрат является возможность получения квадратных профилей точных размеров.

Ввиду того, что система ромб — квадрат дает возможность получить ряд различных по размерам квадратных сечений, раньше она была широко распространена, так как на каждом прокатном стане необходимо было прокатывать широкий сортмент заготовок.

В настоящее время, в связи со специализацией станов и повышением требований к производительности и качеству проката,

система ромб—квадрат постепенно вытесняется другими, более эффективными вытяжными системами.

На практике максимальная величина тупого угла ромба в системе ромб — квадрат достигает  $135^\circ$ . Однако наиболее употребительны ромбы с углами  $110^\circ$ — $120^\circ$ .

Применение ромбов с углом больше  $125^\circ$  практически нерацонально, так как отношение осей получается слишком большим и полоса после кантовки и при подаче ее в следующий калибр легко свертывается.

Таким образом, на практике максимальное отношение диагоналей в ромбическом калибре составляет:

$$\frac{b}{h} = \operatorname{tg} \frac{125^\circ}{2} = 1,92.$$

Однако следует иметь в виду, что калибры на практике всегда несколько не заполняются. В связи с этим, если принять, что степень заполнения ромбического калибра равна 0,96—0,98, то указанному выше отношению осей калибров соответствует отношение осей полосы, равное 1,52—1,62.

В дальнейшем примем, что при прокатке в системе ромбических калибров отношение осей полосы не должно превышать значения

$$a = 1,6 \quad (I - II)$$

во избежание свертывания полосы в калибре.

Система геометрически подобных ромбических калибров имеет перед системой ромб — квадрат то преимущество, что вытяжки в калибрах первой из указанных систем более равномерны.

Система квадрат — квадрат до настоящего времени была широко распространена. Объясняется это тем, что большинство станов имело широкий сортамент и поэтому требовалось получать с черновых клетей большое количество квадратных заготовок.

В настоящее время система квадрат — квадрат лишь иногда используется на подготовительных (черновых) клетях крупно-сортных станов.

Введение специализации станов позволило в большинстве случаев перейти на использование других, более производительных систем. Дело в том, что система квадрат—квадрат состоит из геометрически правильных квадратных калибров или из ромбических калибров, у которых угол при вертикальной диагонали калибра равен  $91^\circ$ — $95^\circ$ . Вследствие этого получить большие вытяжки при прокатке невозможно. Обычно величина вытяжки лежит в пределах 1,08—1,15 и только в редких случаях может быть принята равной 1,2.

Относительно небольшие вытяжки вообще характерны для всех ромбических систем. Величину допустимых вытяжек в значительной степени определяет форма калибров. В ромбических калибрах величина вытяжек возрастает с увеличением отношения диагоналей. Но с увеличением отношения осей увеличивается угол захвата и опасность свертывания полосы, которые и определяют предельное отношение осей калибра.

При прокатке полос в ромбических калибрах требуется применение рольгангов, ролики которых снабжены ромбическими ручьями, что усложняет и удорожает конструкцию вспомогательного оборудования и усложняет работу у прокатного стана.

Этими обстоятельствами объясняется сравнительно редкое применение ромбических систем на прокатных станах, оборудованных рольгангами. На непрерывных же станах ромбические системы применяются с большим успехом.

К недостаткам ромбических калибров следует также отнести неравномерность деформации по сечению полосы, что нередко ведет к образованию рванин. Особенно большое значение имеет это обстоятельство при прокатке легированных сталей. Ограниченное применение ромбических калибров при прокатке этих сталей вызвано также неравномерностью охлаждения полосы по сечению.

Рванины (особенно на ребрах полосы) образуются также вследствие разности окружных скоростей валков в разьеме и в глубине калибра, которая вызывает появление растягивающих напряжений в кромках полосы.

Все рассмотренные недостатки, естественно, усугубляются с возрастанием отношения диагоналей ромбических калибров.

Система вытяжных ромбических калибров заканчивается чистовыми калибрами.

Чистовые ромбические калибры используются главным образом для прокатки квадратного профиля.

При прокатке квадратной стали к чистовым калибрам относятся три последних калибра: квадрат, ромб и квадрат. При прокатке крупных сортов—иногда квадрат, ромб, ромб и квадрат.

При прокатке круглой стали к чистовым калибрам относятся три последних: квадрат, овал и круг или другие системы.

Существуют два способа прокатки квадратного и круглого металла.

Первый способ — прокатка вручную, когда полоса удерживается от свертывания вальцовщиками при помощи клещей. В настоящее время этот способ как устаревший, малопроизводительный и трудоемкий применяется редко.

Второй способ — прокатка в проводках — применяется обычно на современных станах.

## § 2. Исследование уширения в ромбических калибрах

Для основных размеров ромбического калибра, ромбической полосы и соответственной полосы (рис. 20) введем следующие обозначения:

$h_k, b_k$  — высота и ширина калибра;  
 $h_o, b_o$  — высота и ширина ромбической полосы до пропуска;

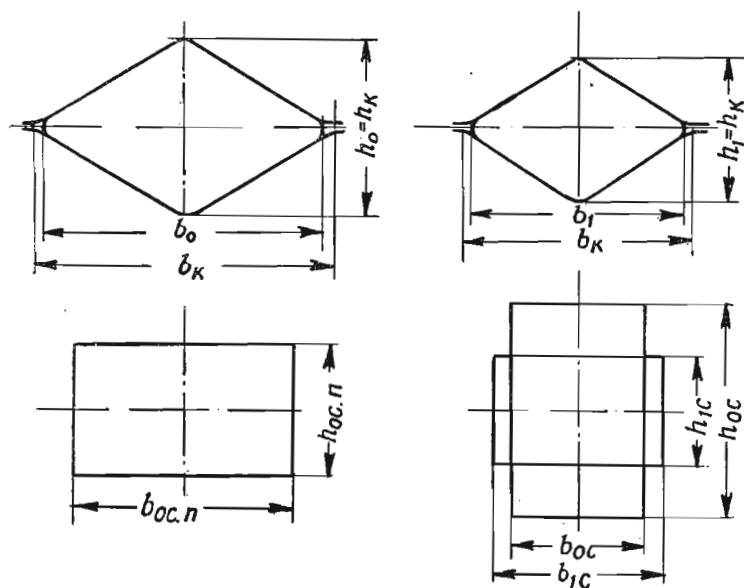


Рис. 20. Условные обозначения основных размеров ромбического калибра, ромбической полосы и полосы соответственной

$h_1, b_1$  — высота и ширина ромбической полосы после пропуска;

$h_{o.c.p.}, b_{o.c.p.}$  — высота и ширина соответственной полосы до пропуска;

$h_{1.c}, b_{1.c}$  — высота и ширина соответственной полосы после пропуска;

$h_{o.c}, b_{o.c}$  — высота и ширина соответственной полосы после кантовки перед задачей ее в следующий калибр.

Исследование уширения при прокатке в ромбических калибрах производилось в лаборатории пластической обработки металлов Ленинградского политехнического института им. М. И. Калинина.

Предварительно прокаткой в калибрах была изготовлена серия ромбических полос с различным отношением диагоналей.

Опыты проводились при степени заполнения  $i=1,0$ . После прокатки тщательно замерялись размеры диагоналей. Отношение диагоналей этих полос оказалось равным 1,11; 1,395; 1,795.

Полученные таким образом ромбические полосы прокатывались в ромбических калибрах, отношение осей которых было равно 1,0; 1,23; 1,8.

Далее размеры поперечного сечения ромбических полос до и после прокатки были пересчитаны на соответственные по равенствам (10—I, и 11—I):

$$b_{oc} = \sqrt{\frac{\omega_0}{a_0}}; h_{oc} = a_0 b_{oc}$$

и

$$h_{1c} = \sqrt{\frac{\omega_1}{a_1}}; b_{1c} = a_1 h_{1c}$$

Затем вычислялась величина относительного уширения при прокатке в ромбических калибрах:

$$\frac{\Delta b}{\Delta h} = \frac{b_{1c} - b_{oc}}{h_{oc} - h_{1c}}$$

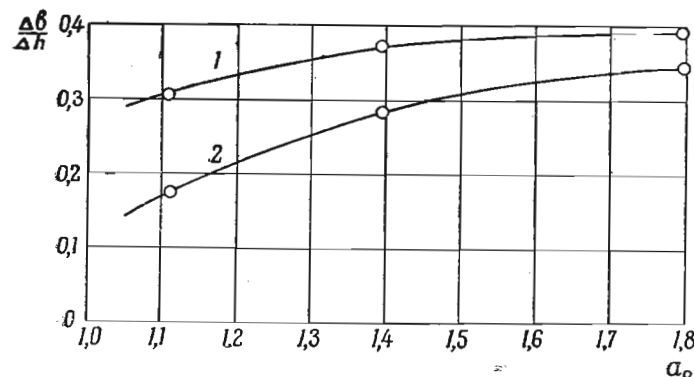


Рис. 21. Зависимость коэффициента уширения от исходного отношения осей полосы для ромбических калибров с отношением диагоналей  $a_1 = 1,23$  и на гладкой бочке:

1 — на гладкой бочке; 2 — в калибре

Зависимость коэффициента уширения от исходного отношения осей при прокатке в ромбических калибрах показана на рис. 21, 22 и 23 (нижние кривые).

Затем была прокатана вторая серия полос. Эти полосы имели первоначальное поперечное сечение, размеры которого были вы-

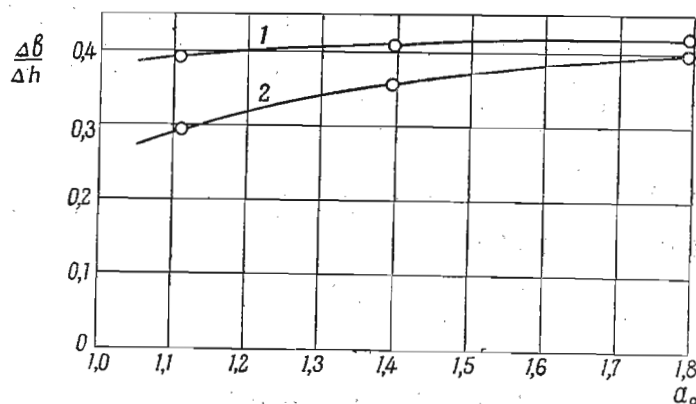


Рис. 22. Зависимость коэффициента уширения от исходного отношения осей полосы для ромбических калибров с отношением диагоналей  $a_1 = 1,0$  и на гладкой бочке:

1 — на гладкой бочке; 2 — в калибре

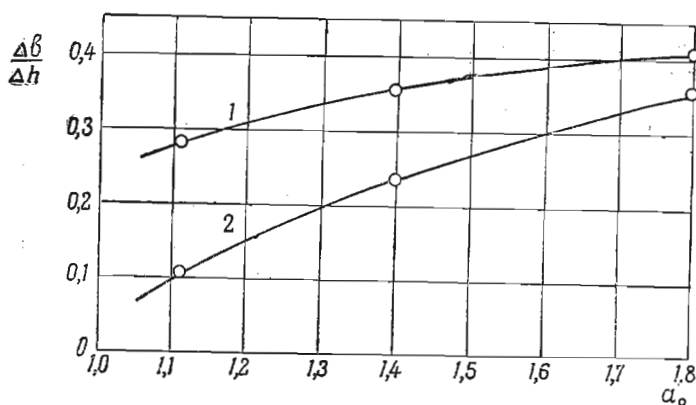


Рис. 23. Зависимость коэффициента уширения от исходного отношения осей полосы для ромбических калибров с отношением диагоналей  $a_1 = 1,8$  и на гладкой бочке:

1 — на гладкой бочке; 2 — в калибре

браны так, что:

$$h_0 = h_{oc} \text{ и } b_0 = b_{oc}.$$

Прямоугольные полосы были прокатаны на гладкой бочке с обжатием:

$$\Delta h = h_0 - h_1 = h_{oc} - h_{1c} = \Delta h_c.$$

Коэффициент уширения при прокатке на гладкой бочке вычислялся по равенству

$$\frac{\Delta b}{\Delta h} = \frac{b_1 - b_0}{h_0 - h_1}$$

для каждого значения отношения осей  $a_0$  прямоугольной полосы до прокатки.

Зависимость коэффициента уширения от исходного отношения осей при прокатке на гладкой бочке приведена на рис. 21, 22 и 23 (верхние кривые).

Поправочный коэффициент уширения, определяемый равенством (21—I):

$$k_i = \frac{\frac{\Delta b_c}{\Delta h}}{\frac{\Delta b}{\Delta h}},$$

можно получить делением коэффициента относительного уширения в калибре на коэффициент относительного уширения на гладкой бочке при одинаковых отношениях осей.

Определив поправочные коэффициенты на основании рис. 21, 22 и 23, получаем кривые, выражающие зависимость поправочного коэффициента уширения от отношения осей  $a_0$  ромбической полосы при прокатке в ромбических калибрах с отношением осей  $a_1$ , равным 1,0; 1,23 и 1,8 (рис. 24).

По данным рис. 24 составлена табл. I и рабочая номограмма для определения поправочного коэффициента уширения (рис. 25).

### § 3. Зависимость между геометрическими размерами ромбической полосы, калибра и степенью заполнения последнего

Для расчета ромбических калибров по соответственной полосе необходимо знать зависимости между следующими величинами: отношением осей ромбической полосы, отношением осей ромбического калибра, степенью заполнения, площадью и радиусом закругления при вершине его тупого угла.

Выведем указанные соотношения.

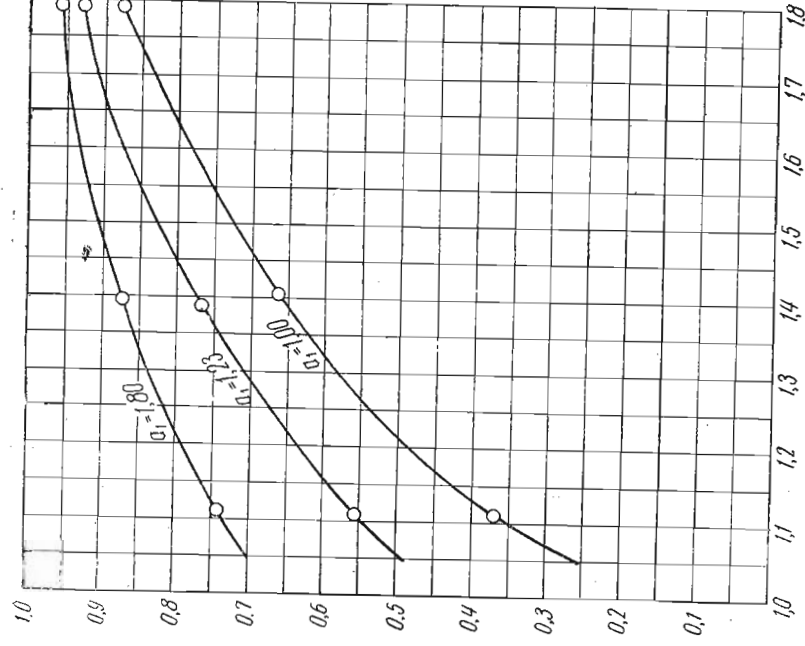


Рис. 24. Поправочный коэффициент уширения для калибров с отношением диагоналей 1,0; 1,23; 1,8

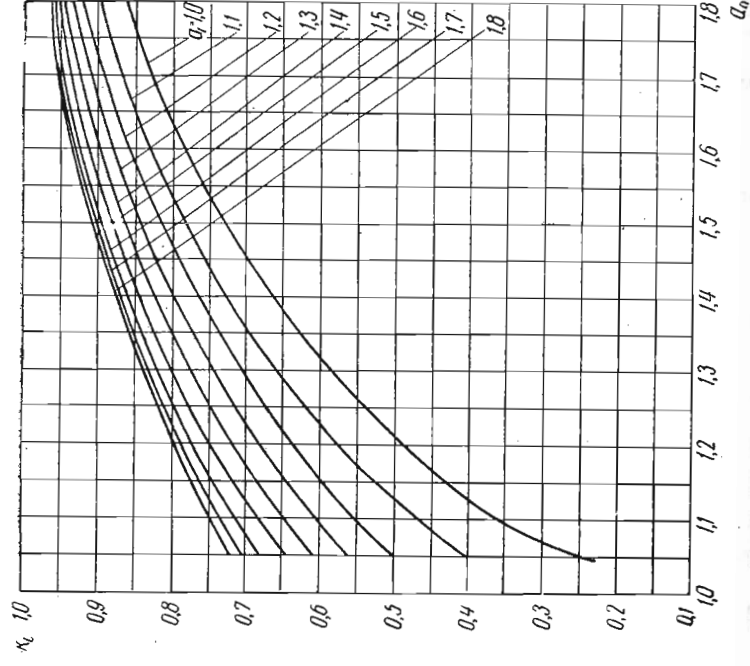


Рис. 25. Рабочая номограмма для определения поправочного коэффициента уширения в ромбических калибрах

Значения поправочного коэффициента уширения  $k_i$  в зависимости от отношения осей полосы до и после прокатки

$\frac{a_0}{a_1}$	1,00	1,05	1,10	1,15	1,20	1,25	1,30	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60
1,00	0,000	0,225	0,350	0,423	0,480	0,533	0,580	0,622	0,660	0,693	0,730	0,757	0,781
1,05	0,155	0,305	0,405	0,475	0,525	0,578	0,620	0,660	0,693	0,726	0,758	0,783	0,808
1,10	0,305	0,390	0,460	0,518	0,570	0,613	0,655	0,690	0,722	0,753	0,780	0,805	0,827
1,15	0,365	0,440	0,505	0,563	0,603	0,640	0,680	0,715	0,745	0,771	0,798	0,823	0,842
1,20	0,420	0,495	0,547	0,592	0,630	0,667	0,703	0,734	0,762	0,787	0,813	0,836	0,856
1,25	0,465	0,525	0,575	0,617	0,656	0,689	0,723	0,755	0,780	0,803	0,828	0,848	0,867
1,30	0,500	0,555	0,600	0,640	0,675	0,708	0,739	0,771	0,795	0,816	0,839	0,858	0,876
1,35	0,530	0,580	0,620	0,660	0,694	0,726	0,758	0,785	0,810	0,828	0,850	0,867	0,884
1,40	0,555	0,603	0,643	0,675	0,713	0,741	0,769	0,797	0,821	0,840	0,858	0,878	0,893
1,45	0,580	0,620	0,666	0,698	0,729	0,755	0,783	0,809	0,831	0,850	0,869	0,885	0,900
1,50	0,600	0,638	0,678	0,713	0,742	0,768	0,794	0,820	0,840	0,860	0,878	0,896	0,910
1,55	0,620	0,655	0,695	0,730	0,756	0,776	0,805	0,829	0,849	0,868	0,885	0,902	0,915
1,60	0,635	0,673	0,709	0,741	0,766	0,790	0,814	0,836	0,856	0,875	0,893	0,908	0,922



На рис. 26 изображен ромбический калибр и сечение ромбической полосы, заполняющей указанный калибр не полностью (сечение полосы заштриховано).

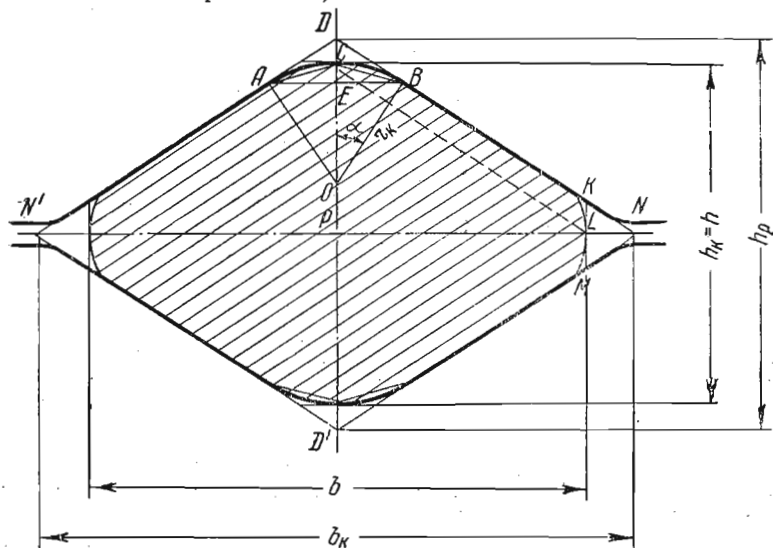


Рис. 26. Первая схема к выводу соотношений между геометрическими размерами ромбической полосы, калибра и степенью заполнения.

Проведем через точки  $C$  и  $L$  прямые  $AB$  и  $KM$ , которые заменяют прилежащие к ним дуги. Если пренебречь участками, заключенными между указанными кривыми и дугами, то, как видно из рис. 26, площадь ромбического калибра выражается так:

$$\omega_K = \frac{1}{2} b_K h_p - 2 \text{ пл. } ADB.$$

Площадь полосы равна:

$$\omega = \omega_K - 2 \text{ пл. } KMN.$$

В свою очередь, площадь калибра и площадь полосы связаны между собой следующим соотношением:

$$\langle \Omega \rangle_K = \frac{\langle \Omega \rangle}{i}.$$

Для построения калибра необходимо знать его площадь, отношение осей и радиус закругления при вершине тупого угла.

Переходя к определению этих величин, сделаем допущение, что площади  $MNK$  и  $ADB$  равны между собой, т. е. полагаем, что площадь калибра, не заполненная металлом, при определении степени заполнения равна площади калибра, теряемой вследствие притуплений при вертикальной его диагонали.

Построим прямоугольное сечение  $mnqj$  (рис. 27), отношение осей которого равно отношению осей ромбической полосы, прокатанной в ромбическом калибре при некоторой степени заполнения его. Построим на прямоугольнике  $mnqj$  ромб так, чтобы площадь треугольника  $ADB$  при вертикальной диагонали ромба

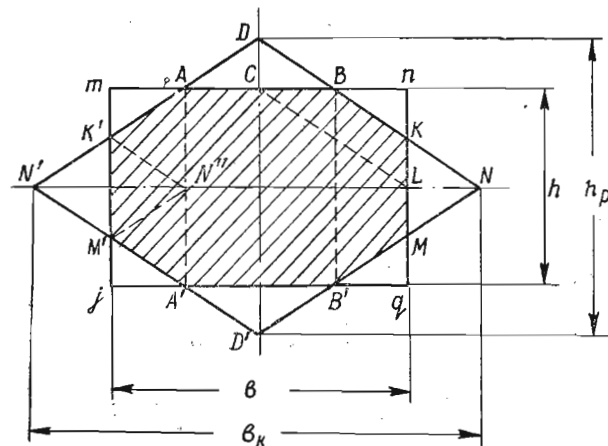


Рис. 27. Вторая схема к выводу соотношений между геометрическими размерами ромбической полосы, калибра и степенью заполнения

была равна площади  $KNM$  при горизонтальной оси ромба. При этом будут равны и площади треугольников  $DBC$  и  $KNL$ . Отсюда следует, что отрезок  $DC$  равен отрезку  $KL$  и, следовательно, линия  $CL$  параллельна стороне ромба  $DN$ .

Это обстоятельство дает возможность сделать вывод, что отношение осей рассматриваемого ромба ( $DND'N'$ ) равно отношению осей прокатанной полосы.

Теперь определим зависимости между отношением диагоналей калибра, отношением осей полосы и степенью заполнения.

При решении этой задачи для упрощения предположим, что площадь калибра, теряемая вследствие закруглений при вертикальной диагонали калибра, и площадь, теряемая вследствие незаполнения при горизонтальной диагонали калибра, представляет собой треугольники  $ADB$  и  $KNM$ .

Рассмотрим сначала участки, не заполненные металлом.

В сумме эти оба участка образуют ромб (рис. 27) с отношением диагоналей, равным отношению диагоналей ромба  $DND'N'$ . Отношение же диагоналей ромба  $DND'N'$  равно отношению осей прокатываемой полосы.

Следовательно:  $\frac{N'N''}{M'K'} = \frac{NN'}{DD'} = a$ .

Большая диагональ ромба  $N'K'N''M'$  равна разнице в ширине калибра и прокатываемой полосы.

Действительно:

$$N'N'' = 2LN \text{ и } LN = \frac{b_K - b}{2},$$

отсюда:

$$N'N'' = 2 \cdot \frac{b_K - b}{2} = b_K - b.$$

Зная разность между шириной калибра и полосы, легко найти зависимость, которая связывает отношение диагоналей калибра и отношение осей полосы при различных значениях степени заполнения.

Определим ширину калибра.

Площадь ромба  $N'DND'$  равна:

$$\omega_p = \omega + 2(\omega_K - \omega),$$

но

$$\omega_K - \omega = \frac{\omega}{i} - \omega = \omega \left( \frac{1-i}{i} \right);$$

поэтому

$$\omega_p = \omega + 2\omega \left( \frac{1-i}{i} \right) = \omega \left[ 1 + \frac{2(1-i)}{i} \right].$$

Кроме того,

$$\omega_p = \frac{1}{2} NN' \cdot DD' = \frac{1}{2} NN' \cdot \frac{NN'}{a} = \frac{(NN')^2}{2a},$$

отсюда

$$b_K = NN' = \sqrt{2a\omega_p} = \sqrt{2a\omega \left[ 1 + \frac{2(1-i)}{i} \right]}.$$

Определим ширину полосы

$$b = b_K - N'N''.$$

Площадь ромба  $N'K'N''M'$  равна:

$$\omega_K - \omega = \frac{1}{2} N'N'' \cdot K'M' = \frac{1}{2} N'N'' \cdot \frac{N'N''}{a} = \frac{(N'N'')^2}{2a}.$$

отсюда

$$N'N'' = \sqrt{2a(\omega_K - \omega)} = \sqrt{2a\omega \left( \frac{1-i}{i} \right)}.$$

Следовательно, ширина полосы равна:

$$b = b_K - N'N'' = \sqrt{2a\omega \left[ 1 + \frac{2(1-i)}{i} \right]} - \sqrt{2a\omega \frac{1-i}{i}}.$$

Заметим, что высота полосы практически всегда равна высоте калибра, в котором она прокатывается, т. е.

$$h = h_K.$$

Таким образом, отношения осей калибра и полосы выражаются так:

$$a_K = \frac{b_K}{h_K} \text{ и } a = \frac{b}{h} = \frac{b}{h_K}.$$

Их отношение:

$$\frac{a_K}{a} = \frac{b_K}{b}.$$

Принимая во внимание полученные выше выражения для  $b_K$  и  $b$ , получим:

$$\begin{aligned} \frac{a_K}{a} &= \frac{\sqrt{2a\omega \left[ 1 + \frac{2(1-i)}{i} \right]}}{\sqrt{2a\omega \left[ 1 + \frac{2(1-i)}{i} \right]} - \sqrt{2a\omega \frac{1-i}{i}}} = \\ &= \frac{\sqrt{\frac{2a\omega}{i}} \sqrt{i+2-2i}}{\sqrt{\frac{2a\omega}{i}} (\sqrt{i+2-2i} - \sqrt{1-i})} = \frac{\sqrt{2-i}}{\sqrt{2-i} - \sqrt{1-i}} = \\ &= \frac{1}{1 - \sqrt{\frac{1-i}{2-i}}}, \end{aligned}$$

отсюда

$$a_K = \frac{a}{1 - \sqrt{\frac{1-i}{2-i}}}. \quad (2-II)$$

На основании подсчетов по этой формуле построена номограмма (рис. 28).

Составим формулы для определения основных размеров ромбической полосы и калибра.

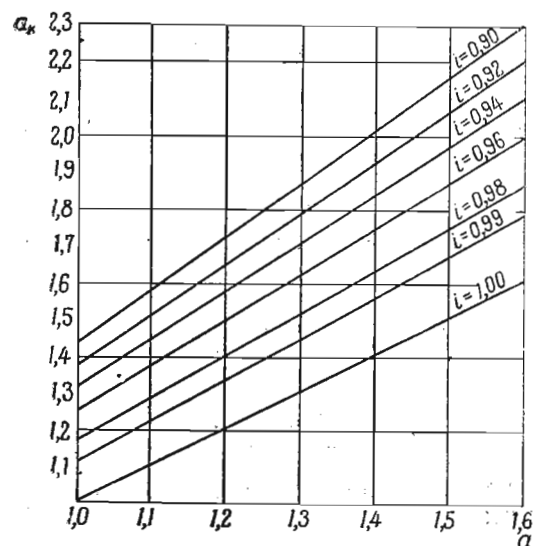


Рис. 28. Зависимость между отношением осей ромбической полосы, отношением осей ромбического калибра и его степенью заполнения

Согласно рис. 27, площадь ромбической полосы (заштрихована) может быть представлена как сумма площади прямоугольника  $ABB'A'$  и площадей двух трапеций  $M'K'AA'$  и  $BKMB'$  (последние равны друг другу).

Так как  $AB = N'N''$ , то площадь ромбической полосы равна:

$$\omega = N'N'' \cdot h + 2 \left( \frac{h + K'M'}{2} \right) \left( \frac{b}{2} - \frac{N'N''}{2} \right),$$

но выше было показано, что:

$$N'N'' = \sqrt{2a\omega \frac{1-i}{i}} \text{ и } K'M' = \frac{N'N''}{a} = \frac{\sqrt{2a\omega \frac{1-i}{i}}}{a};$$

кроме того,  $b = ah$ .

Подставляя эти значения в выражение для площади полосы, имеем:

$$\omega = h \sqrt{2a\omega \frac{1-i}{i}} + \frac{1}{2} \left( h + \frac{\sqrt{2a\omega \frac{1-i}{i}}}{a} \right) \left( ah - \sqrt{2a\omega \frac{1-i}{i}} \right).$$

После простых преобразований получаем квадратное уравнение относительно величины  $\frac{\omega}{h^2}$ :

$$\left( \frac{\omega}{h^2} \right)^2 \frac{1}{i} - \left( \frac{\omega}{h^2} \right) a \left( \frac{3-2i}{i} \right) + \frac{a^2}{4} = 0.$$

Действительный корень этого уравнения записывается так:

$$\frac{\omega}{h^2} = \frac{2}{ai \left[ (3-2i) + \sqrt{(3-2i)^2 - 1} \right]}. \quad (3 - II)$$

По этой формуле построена номограмма (рис. 29).

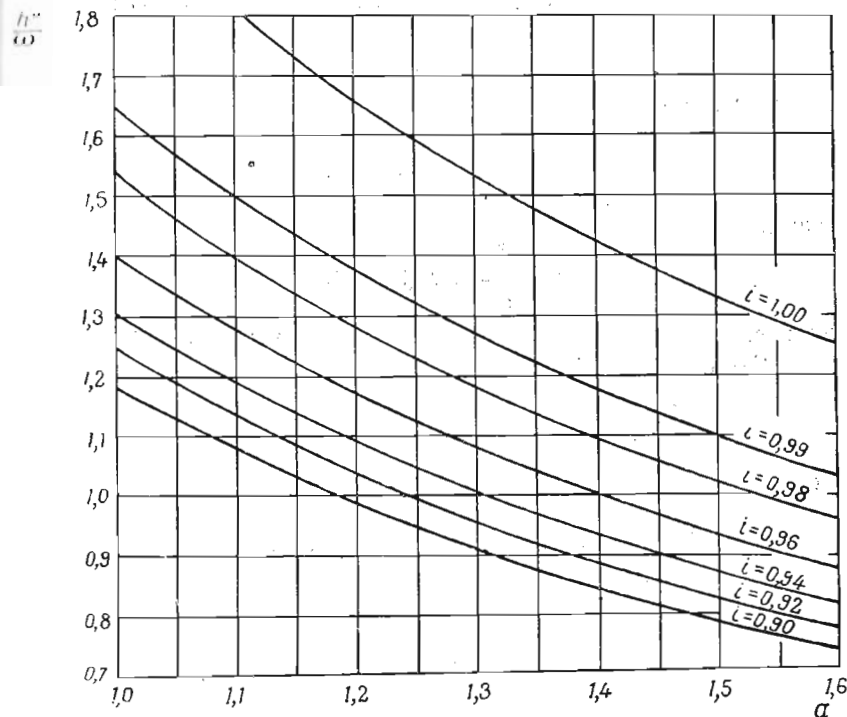


Рис. 29. Зависимость между отношением  $\frac{h^2}{\omega}$ , отношением осей полосы и степенью заполнения

Далее найдем зависимость между отношением  $\frac{h_K^2}{\omega_K}$ , отношением осей калибра  $a_K$  и степенью заполнения  $i$ .

Как видно из рис. 27, площадь ромба равна:

$$\text{пл. } ND'N'D = \frac{1}{2} b_K h_p,$$

но

$$h_p = \frac{b_K}{a},$$

поэтому

$$\text{пл. } ND'N'D = \frac{1}{2} \cdot \frac{b_K^2}{a}.$$

С другой стороны, площадь этого же ромба выразится так:

$$\begin{aligned} \text{пл. } ND'N'D &= \omega + 2(\omega_K - \omega) = i\omega_K + 2(\omega_K - i\omega_K) = \\ &= 2\omega_K - i\omega_K = \omega_K(2 - i). \end{aligned}$$

Таким образом,

$$\frac{b_K^2}{2a} = \omega_K(2 - i).$$

Отсюда

$$\frac{b_K^2}{\omega_K} = 2a(2 - i).$$

Подставляя в это равенство значения  $a$  согласно формуле (1—II) и  $b_K = a_K h_K$ , получим:

$$\frac{a_K^2 h_K^2}{\omega_K} = 2(2 - i) \left(1 - \sqrt{\frac{1 - i}{2 - i}}\right) a_K$$

или

$$\frac{a_K h_K^2}{\omega_K} = 2 \left[2 - i - \sqrt{(1 - i)(2 - i)}\right].$$

Окончательно:

$$\frac{h_K^2}{\omega_K} = \frac{2 \left[2 - i - \sqrt{(1 - i)(2 - i)}\right]}{a_K}. \quad (4 - II)$$

По этой формуле построена номограмма (рис. 30).

Теперь определим величины радиуса закругления при вершине тупого угла ромбического калибра  $r_K$  (см. рис. 26).

Заметим, что

$$\text{пл. } ADBC = 2 \text{ пл. } DBC;$$

и свою очередь,

$$\text{пл. } DBC = \text{пл. } ODB - \text{пл. } OCB.$$

Для простоты расчета дугу  $CB$  заменим хордой  $CB$ .

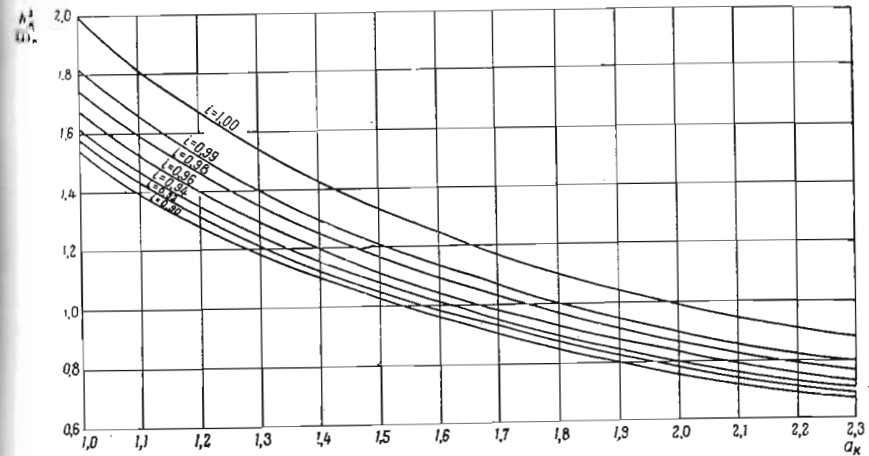


Рис. 30. Зависимость между отношением  $\frac{h_K^2}{\omega_K}$ , отношением осей калибра и степенью заполнения

Заметим, что угол  $\alpha$  равен углу  $DNP$  и соответственно углу  $CLP$ , так как их стороны взаимно перпендикулярны.

$$\text{пл. } ODB = \frac{1}{2} OD \cdot EB,$$

но

$$OD = \frac{r_K}{\cos \alpha} \text{ и } EB = r_K \sin \alpha.$$

Таким образом,

$$\text{пл. } ODB = \frac{1}{2} \cdot \frac{r_K}{\cos \alpha} r_K \sin \alpha = \frac{r_K^2}{2} \tg \alpha.$$

Далее, из рис. 26 видно, что

$$\text{пл. } OCB = \frac{1}{2} r_K^2 \sin \alpha.$$

Таким образом,

$$\begin{aligned} \text{пл. } DCB &= \text{пл. } ODB - \text{пл. } OCB = \frac{r_K^2}{2} \operatorname{tg} \alpha - \\ &- \frac{r_K^2}{2} \sin \alpha = \frac{r_K^2}{2} (\operatorname{tg} \alpha - \sin \alpha). \end{aligned}$$

Однако

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\frac{h}{2}}{\frac{b}{2}} = \frac{h}{b} = \frac{1}{a}$$

и

$$\sin \alpha = \operatorname{tg} \alpha \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha}}.$$

Поэтому

$$\sin \alpha = \frac{1}{a} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{a^2}}}.$$

Используя эти выражения для  $\operatorname{tg} \alpha$  и  $\sin \alpha$ , получим:

$$\begin{aligned} \text{пл. } DCB &= \frac{r_K^2}{2} \left( \frac{1}{a} - \frac{1}{a} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{a^2}}} \right) = \\ &= \frac{r_K^2}{2} \left( \frac{1}{a} - \frac{1}{\sqrt{1 + a^2}} \right). \end{aligned}$$

Следовательно,

$$\begin{aligned} \text{пл. } ADBC &= 2 \text{ пл. } DCB = 2 \frac{r_K^2}{2} \left( \frac{1}{a} - \frac{1}{\sqrt{1 + a^2}} \right) = \\ &= r_K^2 \left( \frac{1}{a} - \frac{1}{\sqrt{1 + a^2}} \right). \end{aligned}$$

В свою очередь:

$$\begin{aligned} \omega_K - \omega &= 2 \text{ пл. } KMN = 2 \text{ пл. } ADBC = 2 r_K^2 \left( \frac{1}{a} - \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{\sqrt{1 + a^2}} \right). \end{aligned}$$

Но:

$$\omega = i \omega_K,$$

поэтому

$$\omega_K - \omega = \omega_K - i \omega_K = \omega_K (1 - i)$$

и, следовательно,

$$\omega_K (1 - i) = 2 r_K^2 \left( \frac{1}{a} - \frac{1}{\sqrt{1 + a^2}} \right).$$

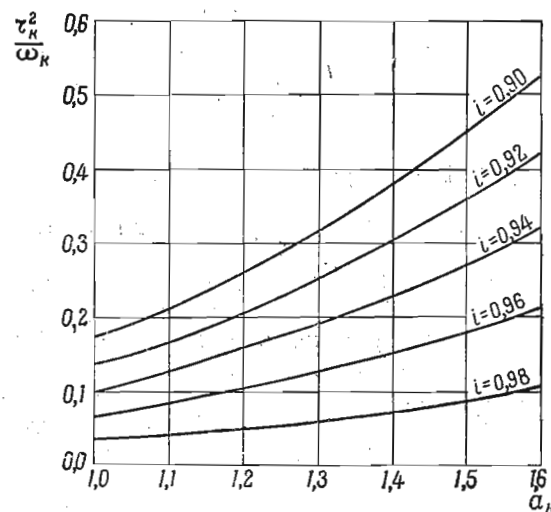


Рис. 31. Зависимость между отношением  $\frac{r_K^2}{\omega_K}$ , отношением осей полосы и степенью заполнения

Отсюда

$$\frac{r_K^2}{\omega_K} = \frac{1 - i}{2 \left( \frac{1}{a} - \frac{1}{\sqrt{1 + a^2}} \right)}. \quad (5 - II)$$

По этой формуле построена номограмма (рис. 31).

Для расчета калибров по методу соответственной полосы необходимо знать величину площади поперечного сечения исходной полосы и отношение ее диагоналей.

Обычно в первый калибр системы ромбических калибров задается квадратная полоса, последний калибр указанной системы также бывает квадратный.

Часто площадь квадратной полосы указана в сортаменте. В тех же случаях, когда площадь неизвестна, ее можно опреде-

лить на основании следующего очевидного соотношения между площадью полосы и ее стороной:

$$\omega_k = c^2 - (\omega_k - \omega)$$

или 
$$\frac{\omega}{i} = c^2 - \left( \frac{\omega}{i} - \omega \right) = c^2 - \frac{\omega - i\omega}{i} = \frac{ic - \omega + i\omega}{i}.$$

Перенос в одну сторону равенства все члены, содержащие  $\omega$ , получаем:

$$2\omega - i\omega = ic^2.$$

Отсюда площадь поперечного сечения квадратной полосы

$$\omega = \frac{ic^2}{2-i}. \quad (6-II)$$

#### § 4. Расчет ромбических калибров

При расчете ромбических калибров могут встретиться две следующие задачи.

**Случай первый.** По известным размерам исходной полосы, поступающей в систему ромбических калибров, рассчитываются все последующие ромбические калибры. В этом случае расчет производится «по ходу» прокатки.

**Случай второй.** По известным размерам ромбической полосы, выходящей из последнего калибра, определяются все предыдущие ромбические калибры. В этом случае расчет производится «против хода» прокатки.

Расчет калибров производится в следующем порядке.

**Расчет «по ходу прокатки».** Расчет «против хода прокатки».

1. Пересчитывают размеры ромбической полосы на соответственные.

Для этого по номограмме (рис. 29) определяют площадь ромбической полосы

$$\omega_0 \qquad \qquad \qquad \omega_1$$

и вычисляют отношение осей полосы

$$a_0 = \frac{h_0}{b_0} \qquad \qquad \qquad a_1 = \frac{b_1}{h_1}$$

После этого находят высоту и ширину полосы:

по формуле (10—I) по формуле (11—I)

$$b_{oc} = \sqrt{\frac{\omega_0}{a_0}}; \qquad \qquad \qquad h_{1c} = \sqrt{\frac{\omega_1}{a_1}};$$

$$h_{oc} = a_0 b_{oc}. \qquad \qquad \qquad b_{1c} = a_1 h_{1c}.$$

2. Рассчитывают уширение полосы при прокатке на гладкой бочке.

Полагают:

$$h_0 = h_{oc}; \quad b_0 = b_{oc}.$$

$$h_1 = h_{1c}; \quad b_1 = b_{1c}.$$

Предварительно задаются величиной  $\frac{\Delta b}{\Delta h}$ .

Рассчитывают обжатие.

По формуле (27—I):

По формуле (29—I):

$$\Delta h = \frac{a_1 h_0 - b_0}{a_1 + \frac{\Delta b}{\Delta h}}.$$

$$\Delta h = \frac{a_0 b_1 - h_1}{1 + a_0 \frac{\Delta b}{\Delta h}}.$$

По формуле (22—I) или номограмме (рис. 14) после первого пересчета окончательно устанавливают коэффициент уширения  $\frac{\Delta b}{\Delta h}$ .

3. По известным значениям  $a_0$  и  $a_1$  по номограмме (рис. 25) находят поправочный коэффициент уширения,  $k_i$ .

4. Определяют коэффициент уширения при прокатке в калибре:

$$\frac{\Delta b_c}{\Delta h_c} = k_i \frac{\Delta b}{\Delta h}.$$

5. Рассчитывают деформацию полосы при прокатке в калибре. По формуле (30—I): По формуле (32—I):

$$\Delta h_c = \frac{a_1 h_{0c} - b_{0c}}{a_1 + \frac{\Delta b_c}{\Delta h_c}};$$

$$\Delta h_c = \frac{a_0 b_{1c} - h_{1c}}{1 + a_0 \frac{\Delta b_c}{\Delta h_c}};$$

Тогда:

$$\Delta b_c = k_i \frac{\Delta b}{\Delta h} \Delta h_c;$$

$$h_{1c} = h_{oc} - \Delta h_c;$$

$$h_{oc} = h_{1c} + \Delta h_c;$$

$$b_{1c} = b_{oc} + \Delta b_c;$$

$$b_{oc} = b_{1c} - \Delta b_c;$$

$$\omega_1 = h_{1c} b_{1c}$$

$$\omega_0 = h_{oc} b_{oc}.$$

6. Определяют размеры калибра.

Площадь калибра:

$$\omega_k = \frac{\omega}{i}.$$

Зная отношение осей полосы и степень заполнения калибра, по номограмме находят (рис. 28) отношение осей калибра  $a_k$ .

Зная отношение осей калибра и степень заполнения калибра, по номограмме (рис. 30) определяют отношение  $\frac{h_k^2}{\omega_k}$



Зная площадь калибра и отношение  $\frac{h_k^2}{\omega_k}$ , определяют высоту калибра  $h_k$  и затем ширину калибра:

$$b_k = a_k h_k.$$

По номограмме (рис. 31) определяют отношение  $\frac{r_k^2}{\omega_k}$ .

По этому отношению и площади калибра определяют радиус закругления у вершины калибра  $r_k$ .

Производят построение калибра.

Ниже приводятся примеры расчета ромбических калибров.  
ПРИМЕР 5. Высота ромбической полосы до прокатки равна 60 мм, а ширина ее 72 мм. Начальный диаметр валков  $D=300$  мм. Степень заполнения калибра  $i=0,98$ . Прокатка производится в горячем состоянии. Коэффициент трения при прокатке  $\mu=0,3$ . Отношение осей полосы после прокатки  $a_1=1,4$ . Необходимо определить размеры ромбической полосы и калибра после прокатки.

1. Пересчитываем размеры ромбической полосы на соответственные.

Принимая во внимание, что при задаче ромбической полосы в калибр ее большая диагональ перпендикулярна оси валков и условие (7—I), согласно которому отношение осей полосы всегда выбирается так, чтобы оно было больше или равно единице, вычисляем отношение осей исходной полосы

$$a_0 = \frac{72}{60} = 1,2.$$

По номограмме (рис. 29) при  $a_0=1,2$  и  $i=0,98$  отношение

$$\frac{h_0^2}{\omega_0} = 1,283.$$

Тогда площадь исходной полосы:

$$\omega_0 = \frac{h_0^2}{1,283} = \frac{60^2}{1,283} = 2805 \text{ мм}^2.$$

Высота и ширина соответственной полосы (после кантовки) определяются по формуле (10—I):

$$b_{0c} = \sqrt{\frac{\omega_0}{a_0}} = \sqrt{\frac{2805}{1,2}} = 48,4 \text{ мм};$$

$$h_{0c} = a_0 b_{0c} = 1,2 \cdot 48,4 = 58,0 \text{ мм}.$$

2. Рассчитываем коэффициент уширения при деформации полосы высотой  $h_0=h_{0c}=58,0$  мм и шириной  $b_0=b_{0c}=48,4$  мм в предположении, что полоса прокатывается на гладкой точке.

Предварительно задаемся коэффициентом уширения

$$\frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,5.$$

По формуле (27—I):

$$\Delta h = \frac{a_1 h_0 - b_0}{a_1 + \frac{\Delta b}{\Delta h}} = \frac{1,4 \cdot 58,0 - 48,4}{1,4 + 0,5} = 17,2 \text{ мм}.$$

Относительное обжатие:

$$\frac{\Delta h}{h_0} = \frac{17,2}{58} = 0,297.$$

Высота полосы после прокатки:

$$h_1 = h_0 - \Delta h = 58,0 - 17,2 = 40,8 \text{ мм}.$$

Рабочий диаметр:

$$D_p = D - h_1 = 300 - 40,8 \approx 259 \text{ мм}.$$

Отношение рабочего диаметра к высоте полосы до прокатки:

$$\frac{D_p}{h_0} = \frac{259}{58} = 4,47.$$

Отношение сторон поперечного сечения:

$$\frac{b_0}{h_0} = \frac{48,4}{58} = 0,834.$$

По формуле (22—I) или по номограмме (рис. 14) при

$$\frac{\Delta h}{h_0} = 0,297; \quad \frac{D_p}{h_0} = 4,47 \quad \text{и} \quad \frac{b_0}{h_0} = 0,834$$

отношение

$$\frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,32.$$

3. Определяем поправочный коэффициент уширения при прокатке в ромбическом калибре.

При отношениях осей ромбической полосы до прокатки  $a_0=1,2$  и после прокатки  $a_1=1,4$  по номограмме (рис. 25)

$$k_i = 0,71.$$

4. Определяем коэффициент уширения при прокатке в ромбическом калибре:

$$\frac{\Delta b_c}{\Delta h_c} = k_i \frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,71 \cdot 0,32 = 0,227.$$

5. Рассчитываем деформацию полосы при прокатке в ромбическом калибре.

Обжатие при прокатке в калибре (30—I):

$$\Delta h_c = \frac{a_1 h_{0c} - b_{0c}}{a_1 + \frac{\Delta b_c}{\Delta h_c}} = \frac{1,4 \cdot 58,0 - 48,4}{1,4 + 0,227} = 20,2 \text{ мм.}$$

Уширение при прокатке в калибре:

$$\Delta b_c = \frac{\Delta b_c}{\Delta h_c} \Delta h_c = 0,227 \cdot 20,2 = 4,6 \text{ мм.}$$

Высота полосы после прокатки:

$$h_{1c} = h_{0c} - \Delta h_c = 58 - 20,2 = 37,8 \text{ мм.}$$

Ширина полосы после прокатки:

$$b_{1c} = b_{0c} + \Delta b_c = 48,4 + 4,6 = 53,0 \text{ мм.}$$

Проверка:

$$a_1 = \frac{b_{1c}}{h_{1c}} = \frac{53,0}{37,8} = 1,40.$$

Площадь полосы после прокатки:

$$\omega_1 = h_{1c} b_{1c} = 37,8 \cdot 53,0 = 2005 \text{ мм}^2.$$

6. Определяем размеры калибра.

При степени заполнения  $i = 0,98$  площадь калибра равна:

$$\omega_k = \frac{\omega_1}{i} = \frac{2005}{0,98} = 2044 \text{ мм}^2.$$

При отношении осей полосы  $a_1 = 1,4$  и степени заполнения  $i = 0,98$  по номограмме (рис. 28) находим отношение осей калибра:

$$a_k = 1,628.$$

По номограмме (рис. 30) определяем отношение

$$\frac{h_k^2}{\omega_k} = 1,07,$$

откуда

$$h_k = \sqrt{1,07 \omega_k} = \sqrt{1,07 \cdot 2044} = 46,8 \text{ мм.}$$

Тогда:

$$b_k = a_k h_k = 1,628 \cdot 46,8 = 76,2 \text{ мм.}$$

Затем по номограмме (рис. 31) при  $a_1 = 1,4$  и  $i = 0,98$  определяем отношение

$$\frac{r_k^2}{\omega_k} = 0,075,$$

откуда  $r_k = \sqrt{0,075 \omega_k} = \sqrt{0,075 \cdot 2044} = 12,4 \text{ мм.}$

Таким образом определены все элементы калибра, необходимые для его построения.

ПРИМЕР 6. Высота ромбической полосы после прокатки равна 40,0 мм и ширина ее 52,0 мм. Начальный диаметр валков  $D = 300$  мм. Степень заполнения калибра  $i = 0,98$ . Прокатка производится в горячем состоянии. Коэффициент трения при прокатке  $\mu = 0,3$ . Отношение осей полосы до прокатки  $a_0 = 1,2$ . Необходимо определить размеры ромбической полосы и калибра до прокатки.

1. Пересчитываем размеры ромбической полосы на соответственные.

Находим отношение осей полосы:

$$a_1 = \frac{52,0}{40,0} = 1,3.$$

По номограмме (рис. 29)

$$\frac{h_1^2}{\omega_1} = 1,184,$$

откуда

$$\omega_1 = \frac{h_1^2}{1,184} = \frac{40,0^2}{1,184} = 1350 \text{ мм}^2.$$

По формуле (11—I):

$$h_{1c} = \sqrt{\frac{\omega_1}{a_1}} = \sqrt{\frac{1350}{1,3}} = 32,0 \text{ мм};$$

$$b_{1c} = a_1 h_{1c} = 1,3 \cdot 32,0 = 41,6 \text{ мм.}$$

2. Рассчитываем коэффициент уширения при прокатке на гладкой бочке. Предварительно задаемся  $\frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,5$ . По формуле (29—I):

$$\Delta h = \frac{a_0 b_1 - h_1}{1 + a_0 \frac{\Delta b}{\Delta h}} = \frac{1,2 \cdot 41,6 - 32,0}{1 + 1,2 \cdot 0,5} = 11,3 \text{ мм.}$$

Тогда:

$$h_0 = h_1 + \Delta h = 32,0 + 11,3 = 43,3 \text{ мм};$$

$$\frac{\Delta h}{h_0} = \frac{11,3}{43,3} = 0,261;$$

$$D_p = D - h_1 = 300 - 32,0 = 268,0 \text{ мм};$$

$$\frac{D_p}{h_0} = \frac{268,0}{43,3} = 6,2;$$

$$\frac{b_0}{h_0} = \frac{1}{a_0} = \frac{1}{1,2} = 0,834.$$

По формуле (22—I) или по номограмме (рис. 14):

$$\frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,36.$$

3. Определяем поправочный коэффициент уширения при прокатке в ромбическом калибре.

По номограмме (рис. 25) он равен:

$$k_i = 0,795.$$

4. Определяем коэффициент уширения при прокатке в калибре:

$$\frac{\Delta b_c}{\Delta h_c} = k_i \frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,795 \cdot 0,36 = 0,286.$$

5. Рассчитываем деформацию полосы при прокатке в калибре. По формуле (32—I) имеем:

$$\Delta h_c = \frac{a_0 b_{1c} - h_{1c}}{1 + a_0 \frac{\Delta b_c}{\Delta h_c}} = \frac{1,2 \cdot 41,6 - 32,0}{1 + 1,2 \cdot 0,286} = 13,4 \text{ мм.}$$

Тогда:

$$\Delta b_c = \frac{\Delta b_c}{\Delta h_c} \Delta h_c = 0,286 \cdot 13,4 = 3,8 \text{ мм;}$$

$$b_{0 \text{ с.п}} = h_{0c} = h_{1c} + \Delta h_c = 32,0 + 13,4 = 45,4 \text{ мм;}$$

$$h_{0 \text{ с.п}} = b_{0c} = b_{1c} - \Delta b_c = 41,6 - 3,8 = 37,8 \text{ мм.}$$

Проверка:

$$a_0 = \frac{b_{0 \text{ с.п}}}{h_{0 \text{ с.п}}} = \frac{45,4}{37,8} = 1,20;$$

$$\omega_0 = b_{0 \text{ с.п}} h_{0 \text{ с.п}} = 45,4 \cdot 37,8 = 1712 \text{ мм}^2.$$

6. Определяем размеры калибра:

$$\omega_k = \frac{\omega_0}{i} = \frac{1712}{0,98} = 1748 \text{ мм}^2.$$

По номограмме (рис. 28):

$$a_k = 1,395.$$

По номограмме (рис. 30):

$$\frac{h_k^2}{\omega_k} = 1,25,$$

откуда высота калибра:

$$h_k = \sqrt{1,25 \omega_k} = \sqrt{1,25 \cdot 1748} = 46,8 \text{ мм.}$$

Ширина калибра:

$$b_k = a_k h_k = 1,395 \cdot 46,8 = 65,3 \text{ мм.}$$

По номограмме (рис. 31):

$$\frac{r_k^2}{\omega_k} = 0,052,$$

откуда

$$r_k = \sqrt{0,052 \omega_k} = \sqrt{0,052 \cdot 1748} = 9,5 \text{ мм.}$$

## § 5. Предельное отношение осей ромбической полосы

Предельное отношение осей ромбической полосы определяется условием прочности валков и предельным углом захвата при прокатке.

В ромбических калибрах отношение осей полосы до и после прокатки определяет коэффициент вытяжки. Таким образом, при предельном отношении осей полосы получаем максимально возможную для такого калибра вытяжку полосы.

Вопрос о предельной глубине вреза калибра в валки сортового стана был рассмотрен А. Ф. Головиным [6].

Исходя из условия прочности валков и предельно допустимого обжатия, А. Ф. Головин устанавливает предельное соотношение между сечением слитка и диаметром валка.

При выводе этого соотношения А. Ф. Головин принимает предельный угол захвата равным  $23^\circ$ , мы же на основании анализа заводских данных примем предельный угол захвата равным  $25^\circ$ .

В таком случае:

$$\Delta h = 2 D_p \sin^2 \frac{25^\circ}{2} = 0,094 D_p,$$

но рабочий диаметр валка

$$D_p = D - h_1$$

или

$$D_p = D - h_0 + \Delta h,$$

где  $D$  — начальный диаметр валка.

Таким образом:

$$D_p = D - h_0 + 0,094 D_p,$$

откуда

$$D_p = 1,100 (D - h_0).$$

Далее А. Ф. Головин принимает, что по условию прочности

рабочий диаметр валка должен быть больше диаметра  $d$  его шейки, т. е.

$$D_p > d. \quad (7-II)$$

Обычно принимают:

$$d \approx 0,55 D.$$

Принимая во внимание три последних соотношения, получим:

$$1,1 (D - h_0) > 0,55 D,$$

откуда:

$$\frac{h_0}{D} < 0,5. \quad (8-II)$$

Это соотношение, разумеется, является приближенным.

Действительно, соотношение между рабочим диаметром валка и диаметром его шейки по условию прочности зависит от длины бочки, положения калибра на валке и некоторых других факторов, которые не учитываются соотношением (8-II).

Принимая во внимание, что

$$h_0 = h_1 + \Delta h,$$

соотношение (8-II) можно написать в таком виде:

$$\frac{h_1}{D} + \frac{\Delta h}{D} \leq 0,5$$

или

$$\frac{h_1}{D} \leq 0,5 - \frac{\Delta h}{D}.$$

Так как

$$D_p < D,$$

то всегда имеем:

$$\frac{\Delta h}{D} < \frac{\Delta h}{D_p}.$$

Учитывая, что соотношение (8-II) является приближенным, примем с запасом, что

$$\frac{\Delta h}{D} = \frac{\Delta h}{D_p} = 0,094 \approx 0,1.$$

Тогда окончательно получаем:

$$\frac{h_1}{D} \leq 0,4.$$

Указанное соотношение получено для случая прокатки полосы в ящичных калибрах.

Определим предельное по условиям прочности соотношение между высотой ромбической полосы и начальным диаметром валков.

Площадь ромбической полосы при  $i = 1$  (без закруглений) равна:

$$\omega_1 = \frac{1}{2} b h.$$

Согласно предыдущему равенству  $h_1 = 0,4 D$ . Известно, что

$$b_1 = a_1 h_1.$$

Подставляя вместо  $h_1$  значение  $0,4 D$ , получим:

$$b_1 = 0,4 a_1 D.$$

Тогда

$$\omega_1 = \frac{1}{2} 0,4^2 a_1 D^2.$$

Согласно формуле (11-I) высота соответственной полосы:

$$\text{или} \quad h_{1c} = \sqrt{\frac{\omega_1}{a_1}},$$

$$h_{1c} = \sqrt{\frac{1}{2} 0,4^2 D^2} = 0,284 D.$$

Таким образом, предельное отношение высоты калибра (высоты полосы) к начальному диаметру валков равно:

$$\frac{h_{1c}}{D} = 0,284. \quad (9-II)$$

Следует заметить, что этим отношением ограничивают размеры полосы, а соответственно и калибра, и в том случае, когда значение угла захвата меньше предельного.

Теперь определим предельное отношение высоты соответственной полосы к начальному диаметру валков, исходя из предельного угла захвата.

Предельную величину угла захвата для ромбических калибров примем на основании анализа заводских калибровок равной  $25^\circ$ , причем калибровки непрерывных станов не рассматривались. При прокатке в непрерывных станах предельные углы захвата можно принимать больше  $25^\circ$  ввиду смятия передней кромки полосы при ударе ее о валки под действием усилия, сообщаемого полосе предыдущей клетью.

Зависимость между предельным отношением высоты полосы к начальному диаметру и углом захвата можно получить, исходя из следующих соображений.

Напишем такие очевидные соотношения:

$$\cos \alpha = 1 - \frac{\Delta h_c}{D_p};$$

$$D_p = D - h_{1c};$$

$$\Delta h_c = h_{oc} - h_{1c},$$

откуда

$$\cos \alpha = 1 - \frac{h_{0c} - h_{1c}}{D - h_{1c}},$$

или

$$(D - h_{1c}) \cos \alpha = D - h_{0c}.$$

Поделив обе части этого равенства на  $D$ , после простых преобразований получим:

$$\frac{h_{0c}}{D} = 1 - \left(1 - \frac{h_{1c}}{D}\right) \cos \alpha. \quad (10-II)$$

Если в этом равенстве угол захвата  $\alpha$  принять равным его предельному значению, то получим связь между предельным отношением высоты полосы к диаметру валков до и после прокатки.

При предельном угле захвата  $\alpha = 25^\circ$  зависимость (6-II) имеет вид, изображенный на рис. 32.

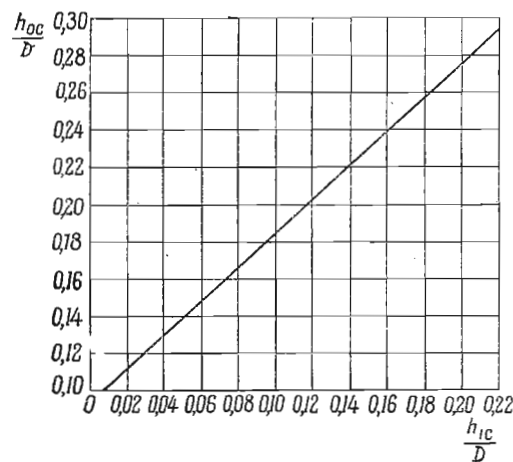


Рис. 32. Зависимость между предельным отношением высоты полосы к диаметру валков до и после прокатки

Используя зависимость (9-II), можно найти связь между предельным отношением осей полосы, поступающей в калибр, и отношением осей полосы, выходящей из этого калибра. Для этого производят такой расчет.

1. Задаются размерами соответственной полосы после прокатки и начальным диаметром валков. Тем самым задаются значениями отношений  $a_1$  и  $\frac{h_{1c}}{D}$ .

2. Находят отношение  $\frac{h_{0c}}{D}$  для случая, когда угол захвата имеет предельное значение. По отношению  $\frac{h_{0c}}{D}$  легко определяется высота полосы до прокатки.

3. Задаются отношением осей полосы до прокатки и на его основании находят ширину соответственной полосы до прокатки (при этом учитывают кантовку полосы):

$$b_{0c} = \frac{h_{0c}}{a_0}.$$

4. Находят величину абсолютного уширения соответственной полосы  $\Delta b_c$  и ширину ее после прокатки:

$$b_{1c} = b_{0c} + \Delta b_c.$$

Если размеры соответственной полосы до прокатки выбраны правильно, то полученная таким образом ширина полосы после прокатки должна соответствовать заданной.

Если это условие не выполнено, значит заданное отношение  $a_0$  не соответствует фактическому и для его определения необходимо произвести пересчет.

Обычно требуется проделать не более 3—4 пересчетов. По данным описанного расчета построена номограмма (рис. 33), с помощью которой определяется предельное отношение осей ромбических полос.

Номограмма предназначена для расчета калибровки «против хода» прокатки. При расчете «по ходу прокатки» предварительно определяют значение  $\frac{h_{1c}}{D}$  по номограмме, изображенной на рис. 32.

Заметим, что номограмма построена для ромбических полос, у которых отношение осей не превышает 1,6.

Отношения  $\frac{h_{1c}}{D}$ , взятые по номограмме (рис. 33), изменяются в пределах от 0,09 до 0,284. Понятно, что нижний предел этого отношения (0,09) определяется предельным отношением осей полосы до и после прокатки по условию свертывания, которое, согласно равенству (1-II), равно 1,6.

Таким образом, условие свертывания (1-II) эквивалентно условию

$$\frac{h_{1c}}{D} = 0,09. \quad (11-II)$$

Верхний предел отношения  $\frac{h_{1c}}{D}$ , равный 0,284, определяется предельным отношением осей полосы по условию прочности, которое, согласно равенству (9-II), равно 0,284.

Пример 7. Высота ромбической полосы после прокатки равна 50 мм и ширина ее 75 мм. Начальный диаметр валков 650 мм.

Необходимо определить предельные размеры ромбической полосы до прокатки.

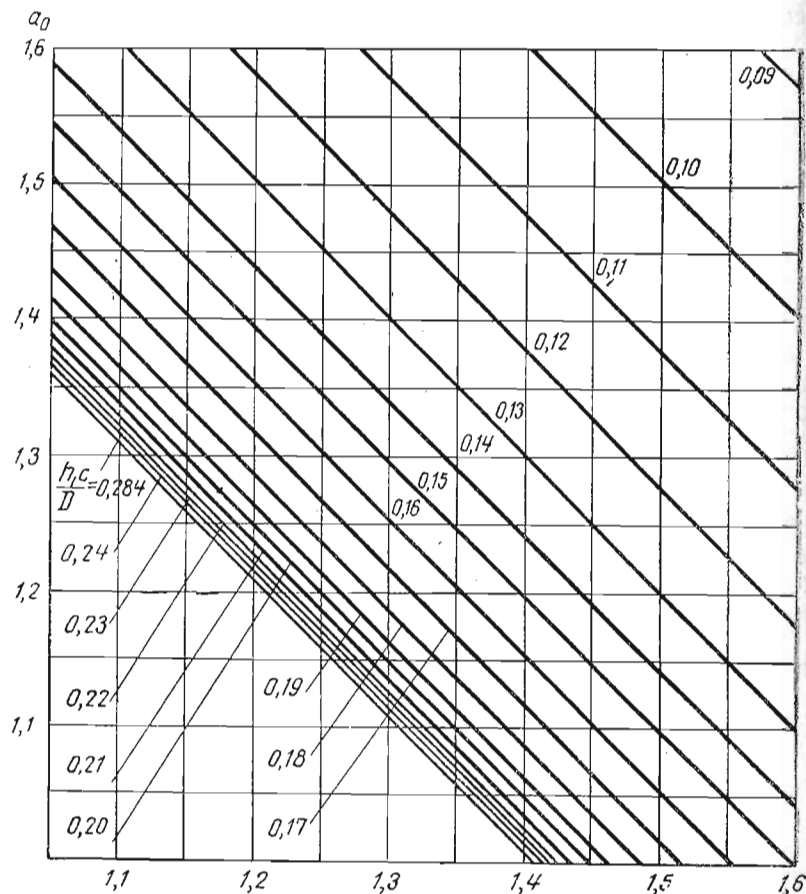


Рис. 33. Зависимость между предельным отношением осей ромбических полос (до и после прокатки) и отношением  $\frac{h_{1c}}{D}$

1. Находим отношение осей полосы после прокатки:

$$a_1 = \frac{b_1}{h_1} = \frac{75,0}{50,0} = 1,5.$$

2. Находим отношение высоты полосы после прокатки к начальному диаметру:

$$\frac{h_{1c}}{D} = 0,13.$$

3. По номограммам (рис. 32) находим предельное отношение высоты полосы до прокатки к начальному диаметру валков:

$$\frac{h_{0c}}{D} = 0,212.$$

4. По номограмме (рис. 33) находим предельное отношение осей полосы до прокатки:

$$a_0 = 1,2.$$

5. Находим ширину полосы до прокатки

$$b_{0c.n} = h_{0c} = 0,212 D = 0,212 \cdot 650,0 = 138,0 \text{ мм.}$$

6. Определяем высоту полосы до прокатки

$$h_{0c.n} = \frac{b_{0c.n}}{a_0} = \frac{138,0}{1,2} = 115,0 \text{ мм.}$$

По величинам  $h_{0c.n}$ ;  $b_{0c.n}$ ;  $a_0$  и степени заполнения нетрудно найти размеры ромбического калибра (см. пример 6).

## § 6. Пример расчета калибров ромбической системы

**ПРИМЕР 8.** Из последнего калибра ромбической системы выдается полоса квадратного сечения  $30 \times 30 \text{ мм}$ . В первый калибр системы поступает квадратная заготовка сечением  $75 \times 75 \text{ мм}$ . Начальный диаметр валков  $400 \text{ мм}$ . Коэффициент трения при прокатке  $\mu = 0,3$ . Степень заполнения калибров  $i = 0,98$ . Требуется рассчитать систему ромбических калибров с максимально допустимыми вытяжками.

Расчет калибров ведем «против хода» прокатки.

*I калибр (последний «по ходу» прокатки)*

1. Размеры калибра соответствуют размерам полосы в горячем состоянии. Ввиду того, что по ГОСТ 2591 — 44 квадратная полоса со стороной  $30 \text{ мм}$  прокатывается без закругленных углов, степень заполнения в I калибре  $i = 1,0$ .

$$b_{1c} = h_{1c} = 1,015 c = 1,015 \cdot 30,0 = 30,5 \text{ мм;}$$

$$b_k = h_k = 1,416 b_{1c} = 1,416 \cdot 30,5 = 43,2 \text{ мм.}$$

Площадь калибра:

$$\omega_k = \frac{\omega}{i} = \frac{b_{1c} h_{1c}}{i} = \frac{30,5^2}{1,0} = 930 \text{ мм}^2.$$

2. Определяем отношение высоты полосы, выходящей из I калибра, к диаметру валков:

$$\frac{h_{1c}}{D} = \frac{30,5}{400,0} = 0,076 < 0,09.$$



Следовательно, отношение осей при прокатке в I калибре углом захвата не лимитируется. В этом случае отношение осей полосы ограничивается условием свертывания (I—II), которое эквивалентно условию (II—II). Отношение осей полосы по условию свертывания (I—II) не должно превышать величины 1,6.

Таким образом, принимаем:

$$a_0 = 1,6.$$

### II калибр

1. Рассчитываем коэффициент уширения при прокатке на гладкой бочке.

Предварительно принимаем  $\frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,5$ .

По формуле (29—I):

$$\Delta h = \frac{a_0 b_1 - h_1}{1 + a_0 \frac{\Delta b}{\Delta h}} = \frac{1,6 \cdot 30,5 - 30,5}{1 + 1,6 \cdot 0,5} = 10,2 \text{ мм.}$$

Тогда:

$$h_0 = h_1 + \Delta h = 30,5 + 10,2 = 40,7 \text{ мм;}$$

$$\frac{\Delta h}{h_0} = \frac{10,2}{40,7} = 0,25;$$

$$D_p = D - h_1 = 400,0 - 30,5 = 369,5 \text{ мм;}$$

$$\frac{D_p}{h_0} = \frac{369,5}{40,7} = 9,0; \quad \frac{b_0}{h_0} = \frac{1}{a_0} = \frac{1}{1,6} = 0,63.$$

По формуле (22—I) или по номограмме (рис. 14):

$$\frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,35.$$

2. Определяем поправочный коэффициент уширения при прокатке в I калибре.

По номограмме (рис. 25) он равен:

$$k_i = 0,78.$$

3. Определяем коэффициент уширения при прокатке в калибре:

$$\frac{\Delta b_c}{\Delta h_c} = k_i \frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,78 \cdot 0,35 = 0,27.$$

4. Рассчитываем деформацию полосы при прокатке в I калибре.

По формуле (32—I) имеем:

$$\Delta h_c = \frac{a_0 b_{1c} - h_{1c}}{1 + a_0 \frac{\Delta b_c}{\Delta h_c}} = \frac{1,6 \cdot 30,5 - 30,5}{1 + 1,6 \cdot 0,27} = 12,8 \text{ мм.}$$

Тогда:

$$\Delta b_c = \frac{\Delta b_c}{\Delta h_c} \Delta h_c = 0,27 \cdot 12,8 = 3,5 \text{ мм;}$$

$$b_{0c.п} = h_{0c} = h_{1c} + \Delta h_c = 30,5 + 12,8 = 43,3 \text{ мм;}$$

$$h_{0c.п} = b_{0c} = b_{1c} - \Delta b_c = 30,5 - 3,5 = 27,0 \text{ мм.}$$

Проверка:

$$a_0 = \frac{b_{0c.п}}{h_{0c.п}} = \frac{43,3}{27,0} = 1,60;$$

$$\omega_0 = b_{0c.п} h_{0c.п} = 43,3 \cdot 27,0 = 1170 \text{ мм}^2.$$

5. Определяем размеры II калибра:

Площадь калибра:

$$\omega_k = \frac{\omega_0}{i} = \frac{1170}{0,98} = 1195 \text{ мм}^2.$$

По номограмме (рис. 28):

$$a_k = 1,86.$$

По номограмме (рис. 30):

$$\frac{h_k^2}{\omega_k} = 0,94.$$

Высота калибра:

$$h_k = \sqrt{0,94 \omega_k} = \sqrt{0,94 \cdot 1195} = 33,5 \text{ мм.}$$

Ширина калибра:

$$b_k = a_k h_k = 1,86 \cdot 33,5 = 62,3 \text{ мм.}$$

По номограмме (рис. 32):

$$\frac{r_k^2}{\omega_k} = 0,089,$$

откуда:

$$r_k = \sqrt{0,089 \omega_k} = \sqrt{0,089 \cdot 1195} = 10,4 \text{ мм.}$$

6. Определяем предельное отношение осей полосы, поступающей во II калибр:

$$\frac{h_{1c}}{D} = \frac{27,0}{400,0} = 0,068 < 0,09.$$

Следовательно, предельное отношение осей полосы, поступающей во II калибр, ограничивается условием свертывания (I—II) и составляет:

$$a_0 = 1,6.$$

### III калибр

1. Рассчитываем коэффициент уширения при прокатке на гладкой бочке.

Предварительно задаемся  $\frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,6$ .

По формуле (29—I):

$$\Delta h = \frac{a_0 b_1 - h_1}{1 + a_0 \frac{\Delta b}{\Delta h}} = \frac{1,6 \cdot 43,3 - 27,0}{1 + 1,6 \cdot 0,6} = 21,6 \text{ мм.}$$

Тогда:

$$h_0 = h_1 + \Delta h = 27,0 + 21,6 = 48,6 \text{ мм;}$$

$$\frac{\Delta h}{h_0} = \frac{21,6}{48,6} = 0,45;$$

$$D_p = D - h_1 = 400,0 - 27,0 = 363,0 \text{ мм;}$$

$$\frac{D_p}{h_0} = \frac{363,0}{48,6} = 7,5; \quad \frac{b_0}{h_0} = \frac{1}{a_0} = \frac{1}{1,6} = 0,63.$$

По номограмме (рис. 14):

$$\frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,43.$$

2. Определяем поправочный коэффициент уширения (рис. 25):

$$k_i = 0,92.$$

3. Определяем коэффициент уширения при прокатке в калибре:

$$\frac{\Delta b_c}{\Delta h_c} = k_i \frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,92 \cdot 0,43 = 0,40.$$

4. Рассчитываем деформацию полосы при прокатке в калибре. По формуле (32—I) имеем:

$$\Delta h_c = \frac{a_0 b_{1c} - h_{1c}}{1 + a_0 \frac{\Delta b_c}{\Delta h_c}} = \frac{1,6 \cdot 43,3 - 27,0}{1 + 1,6 \cdot 0,40} = 25,8 \text{ мм.}$$

Тогда:

$$\Delta b_c = \frac{\Delta b_c}{\Delta h_c} \Delta h_c = 0,40 \cdot 25,8 = 10,3 \text{ мм;}$$

$$b_{0c.n} = h_{0c} = h_{1c} + \Delta h_c = 27,0 + 25,8 = 52,8 \text{ мм;}$$

$$h_{0c.n} = b_{0c} = b_{1c} - \Delta b_c = 43,3 - 10,3 = 33,0 \text{ мм.}$$

Проверка:

$$a_0 = \frac{b_{0c.n}}{h_{0c.n}} = \frac{52,8}{33,0} = 1,60;$$

$$\omega_0 = b_{0c.n} h_{0c.n} = 52,8 \cdot 33,0 = 1740 \text{ мм}^2.$$

5. Определяем размеры III калибра:

$$\omega_K = \frac{\omega_0}{i} = \frac{1740}{0,98} = 1780 \text{ мм}^2;$$

$$a_K = 1,86;$$

$$\frac{h_K^2}{\omega_K} = 0,94; \quad h_K = \sqrt{0,94 \omega_K} = \sqrt{0,94 \cdot 1780} = 41,0 \text{ мм;}$$

$$b_K = a_K h_K = 1,86 \cdot 41,0 = 76,2 \text{ мм;}$$

$$\frac{r_K^2}{\omega_K} = 0,089; \quad r_K = \sqrt{0,089 \omega_K} = \sqrt{0,089 \cdot 1780} = 12,6 \text{ мм.}$$

6. Определяем предельное отношение осей полосы, поступающей в III калибр:

$$\frac{h_{1c}}{D} = \frac{33,0}{400,0} = 0,083 < 0,09.$$

Следовательно,  $a_0 = 1,6$ .

IV калибр

1. Предварительно задаемся  $\frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,5$ .

$$\Delta h = \frac{a_0 b_1 - h_1}{1 + a_0 \frac{\Delta b}{\Delta h}} = \frac{1,6 \cdot 52,8 - 33,0}{1 + 1,6 \cdot 0,5} = 28,6 \text{ мм;}$$

$$h_0 = h_1 + \Delta h = 33,0 + 28,6 = 61,6 \text{ мм;}$$

$$\frac{\Delta h}{h_0} = \frac{28,6}{61,6} = 0,46;$$

$$D_p = D - h_1 = 400,0 - 33,0 = 367,0 \text{ мм;}$$

$$\frac{D_p}{h_0} = \frac{367,0}{61,6} = 6,0; \quad \frac{b_0}{h_0} = \frac{1}{a_0} = \frac{1}{1,6} = 0,63.$$

По номограмме (рис. 14):

$$\frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,41.$$

2. Определяем поправочный коэффициент уширения (рис. 25):

$$k_i = 0,92$$

3. Определяем коэффициент уширения при прокатке в калибре:

$$\frac{\Delta b_c}{\Delta h_c} = k_i \frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,92 \cdot 0,41 = 0,38.$$

4. Рассчитываем деформацию полосы при прокатке в калибре:

$$\Delta h_c = \frac{a_0 b_{1c} - h_{1c}}{1 + a_0 \frac{\Delta b_c}{\Delta h_c}} = \frac{1,6 \cdot 52,8 - 33,0}{1 + 1,6 \cdot 0,38} = 32,0 \text{ мм;}$$

$$\Delta b_c = \frac{\Delta b_c}{\Delta h_c} \Delta h_c = 0,38 \cdot 32,0 = 12,2 \text{ мм;}$$

$$b_{0c.n} = h_{0c} = h_{1c} + \Delta h_c = 33,0 + 32,0 = 65,0 \text{ мм};$$

$$h_{0c.n} = b_{0c} = b_{1c} - \Delta b_c = 52,8 - 12,2 = 40,6 \text{ мм}.$$

Проверка:

$$a_0 = \frac{b_{0c.n}}{h_{0c.n}} = \frac{65,0}{40,6} = 1,60;$$

$$\omega_0 = b_{0c.n} h_{0c.n} = 65,0 \cdot 40,6 = 2640 \text{ мм}^2.$$

5. Определяем размеры IV калибра.

Площадь калибра

$$\omega_K = \frac{\omega_0}{i} = \frac{640}{0,98} = 2965 \text{ мм}^2.$$

По номограмме (рис. 28):

$$a_K = 1,86.$$

По номограмме (рис. 30):

$$\frac{h_K^2}{\omega_K} = 0,94,$$

откуда:

$$h_K = \sqrt{0,94 \omega_K} = \sqrt{0,94 \cdot 2695} = 50,4 \text{ мм}.$$

Ширина калибра:

$$b_K = a_K h_K = 1,86 \cdot 50,4 = 94,6 \text{ мм}.$$

По номограмме (рис. 32)

$$\frac{r_K^2}{\omega_K} = 0,089,$$

откуда:

$$r_K = \sqrt{0,089 \omega_K} = \sqrt{0,089 \cdot 2695} = 15,5 \text{ мм}.$$

6. Определяем предельное отношение осей полосы, поступающей в IV калибр:

$$\frac{h_{1c}}{D} = \frac{40,6}{400,0} = 0,102 > 0,09.$$

В данном случае по номограмме (рис. 33) видно, что предельное отношение осей полосы, поступающей в IV калибр, ограничивается условием захвата и равно:

$$a_0 = 1,36.$$

V калибр

1. Определяем предельное отношение высоты полосы до прокатки в IV калибре к начальному диаметру валков.

По номограмме (рис. 32)

$$\frac{h_{0c}}{D} = 0,187.$$

2. Находим размеры полосы, выходящей из V калибра:

$$b_{0c.n} = h_{0c} = 0,187 \cdot D = 0,187 \cdot 400,0 = 74,8 \text{ мм};$$

$$h_{0c.n} = \frac{b_{0c.n}}{a_0} = \frac{74,8}{1,36} = 55,0 \text{ мм};$$

$$\omega_0 = b_{0c.n} h_{0c.n} = 74,8 \cdot 55,0 = 4110 \text{ мм}^2.$$

3. Определяем размеры V калибра:

$$\omega_K = \frac{\omega_0}{i} = \frac{4110}{0,98} = 4200 \text{ мм}^2.$$

По номограмме (рис. 28):

$$a_K = 1,58.$$

По номограмме (рис. 30):

$$\frac{h_K^2}{\omega_K} = 1,104,$$

откуда: высота калибра

$$h_K = \sqrt{1,104 \omega_K} = \sqrt{1,104 \cdot 4200} = 68,1 \text{ мм},$$

ширина калибра

$$b_K = a_K h_K = 1,58 \cdot 68,1 = 107,7 \text{ мм}.$$

По номограмме (рис. 31):

$$\frac{r_K^2}{\omega_K} = 0,065,$$

откуда

$$r_K = \sqrt{0,065 \omega_K} = \sqrt{0,065 \cdot 4200} = 16,6 \text{ мм}.$$

Площадь сечения полосы, вышедшей из V калибра, близка к площади поперечного сечения квадратной заготовки  $75 \times 75 \text{ мм}$ .

Таким образом, необходимо определить размеры поступающей в V калибр полосы так, чтобы они удовлетворяли заданным по условию размерам —  $75 \times 75 \text{ мм}$ .

1. Рассчитываем коэффициент уширения при прокатке на гладкой бочке.

Предварительно задаемся  $\frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,5$ .

По формуле (29—I):

$$\Delta h = \frac{a_0 b_1 - h_1}{1 + a_0 \frac{\Delta b}{\Delta h}} = \frac{1,0 \cdot 74,8 - 55,0}{1 + 1,0 \cdot 0,5} = 13,2 \text{ мм};$$

$$h_0 = h_1 + \Delta h = 55,0 + 13,2 = 68,2 \text{ мм};$$

$$\frac{\Delta h}{h_0} = \frac{13,2}{68,2} = 0,19.$$

$$D_p = D - h_1 = 400,0 - 55,0 = 345,0 \text{ мм};$$

$$\frac{D_p}{h_0} = \frac{345,0}{68,2} = 5,1; \quad \frac{b_0}{h_0} = \frac{1}{a_0} = \frac{1}{1,0} = 1,0.$$

По номограмме (рис. 14):

$$\frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,33.$$

2. Определяем поправочный коэффициент уширения. По номограмме (рис. 25) при  $a_1 = 1,36$  и  $a_0 = 1,0$

$$k_i = 0,53.$$

3. Определяем коэффициент уширения при прокатке в калибре:

$$\frac{\Delta b_c}{\Delta h_c} = k_i \frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,53 \cdot 0,33 = 0,19.$$

4. Рассчитываем деформацию полосы при прокатке в V калибре

$$\Delta h_c = \frac{a_0 b_{1c} - h_{1c}}{1 + a_0 \frac{\Delta b_c}{\Delta h_c}} = \frac{1,0 \cdot 74,8 - 55,0}{1 + 1,0 \cdot 0,19} = 16,6 \text{ мм}.$$

Тогда:

$$\Delta b_c = \frac{\Delta b_c}{\Delta h_c} \Delta h_c = 0,19 \cdot 16,6 = 3,2 \text{ мм};$$

$$b_{0c.n} = h_{0c} = h_{1c} + \Delta h_c = 55,0 + 16,6 = 71,6 \text{ мм};$$

$$h_{0c.n} = b_{0c} = b_{1c} - \Delta b_c = 74,8 - 3,2 = 71,6 \text{ мм};$$

$$\omega_0 = b_{0c.n} h_{0c.n} = 71,6^2 = 5120 \text{ мм}^2.$$

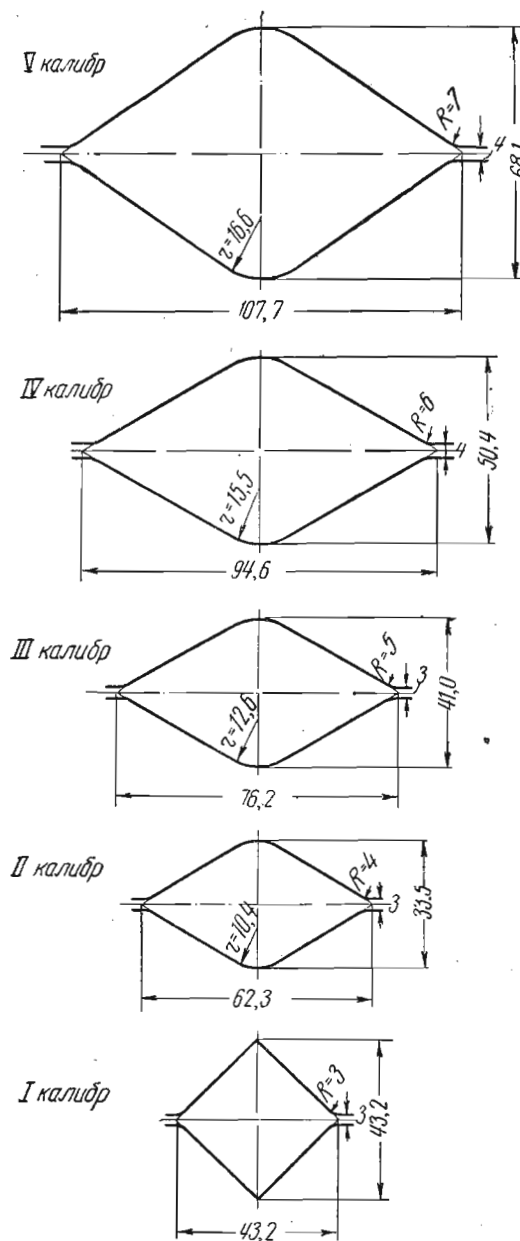


Рис. 34. Система ромбических калибров стана 400 мм

## 5. Определяем размеры заготовки.

Считаем, что заготовка была прокатана в калибре со степенью заполнения  $i = 0,98$ .

По формуле (6—II):

$$\omega = \frac{i c^2}{2 - i}.$$

Отсюда:

$$c = \sqrt{\frac{\omega(2-i)}{i}} = \sqrt{\frac{5120(2-0,98)}{0,98}} = 73,0 \text{ мм} < 75 \text{ мм}.$$

Таким образом, при степени заполнения  $i = 0,98$  сторона квадратной заготовки менее заданной по условию. Поэтому принимаем степень заполнения калибра, из которого выдается заготовка, равной  $i = 0,96$ .

Тогда:

$$c = \sqrt{\frac{\omega(2-i)}{i}} = \sqrt{\frac{5120(2-0,96)}{0,96}} = 75,0 \text{ мм}.$$

Таким образом, расчет калибров ромбической системы можно считать законченным.

Результаты расчета сведены в табл. 2. Калибры рассчитанной системы приведены на рис. 34.

Таблица 2

Размеры ромбических калибров стана 400

№ калибра	Размеры калибра					Вытяжка $\lambda$
	$h_K$	$b_K$	$a_K$	$\omega_K$	$r_K$	
V	68,1	107,7	1,58	4200	16,6	1,245
IV	50,4	94,6	1,86	2695	15,5	1,560
III	41,0	76,2	1,86	1780	12,6	1,514
II	33,5	62,3	1,86	1195	10,4	1,490
I	43,2	43,2	1,00	930	—	1,285

## ГЛАВА III

СИСТЕМЫ КАЛИБРОВ ОВАЛ — КВАДРАТ,  
ШЕСТИУГОЛЬНИК—КВАДРАТ, ОВАЛ—КРУГ§ 1. Общие сведения о калибрах систем овал—квадрат,  
шестиугольник—квадрат; овал—круг

Системы овал — квадрат и шестиугольник — квадрат дают возможность получать большие вытяжки. Поэтому их часто называют вытяжными. Эти системы калибров применяются на черновых линиях мелкосортных станов, где осуществляется интенсивная вытяжка прокатываемых полос, поступающих с обжимных клетей, с тем, чтобы получить размеры поперечного сечения полос, необходимых для передачи их на чистовые линии.

При прокатке в системах овал — круг, как будет показано ниже, получают вытяжки, меньшие по величине, чем в системах овал — квадрат и шестиугольник — квадрат. Однако системы овал — круг обладают тем преимуществом, что дают возможность получить поверхность сортового металла высокого качества. Поэтому системы овал — круг применяют как вытяжные при прокатке качественных сталей, где, как правило, не требуется больших вытяжек, но предъявляются высокие требования к качеству поверхности.

Кроме указанных систем существуют комбинированные системы: квадрат — полоска — овал, прямоугольник — овал — квадрат и др. Наиболее распространена все же система овал — квадрат. Система шестиугольник — квадрат почти не применяется в виде ряда чередующихся калибров. Однако шестиугольные калибры часто можно встретить как переходные между системой инициальных калибров и системой вытяжных калибров.

Применение систем овал — круг связано с трудностями передачи овальной полосы в круглый калибр и обеспечением правильного положения полосы по отношению к калибру при задаче в валки.

Наибольшее количество дефектов сортового металла и связанного с ними брака получается при прокатке в черновых калибрах, так как в них осуществляется весьма интенсивная деформация.

ция. Поэтому правильный расчет системы вытяжных калибров имеет существенное значение не только для получения высокой производительности, но и для обеспечения надлежащего качества продукции.

Вытяжные системы в последние два десятилетия широко применяются на наших заводах потому, что они обеспечивают высокую производительность при условии массового выпуска однотипных профилей. В условиях специализации прокатных цехов и заводов, осуществляемой в нашей стране в широких масштабах, такие системы особенно удобны.

Прокатка в вытяжных системах производится на современных непрерывных, зигзагообразных, шахматных станах и на станах устаревшего типа — со ступенчатым расположением клетей.

В последнем случае прокатка обычно осуществляется петлевым способом с применением обводок для автоматической передачи полосы из клетки в клеть. Однако при этом не удастся полностью избежать применения ручного труда, и некоторое количество клетей такого стана обслуживается вручную вальцовщиками. При отсутствии петель полоса задается в клеть попеременно передним и задним концами. Это способствует равномерному распределению температуры по длине полосы, но снижает производительность стана. Такой способ обычно используется при прокатке относительно крупных сечений из качественной стали.

Вытяжные калибры, как уже упоминалось, располагаются отдельно от чистовых в специальных черновых клетях (линиях), в которых диаметр валков больше, а окружные скорости меньше, чем в чистовых. Благодаря этому производительность стана повышается, так как при этих условиях полоса интенсивно деформируется и получает большую вытяжку.

В начале текущего столетия вытяжные системы и, в частности, система овал — квадрат применялась только для прокатки проволоки-катанки и некоторых других профилей.

В настоящее время вытяжные калибры применяют также в среднесортных и даже в крупносортных станах.

## § 2. Характеристика системы овал—квадрат

Вытяжка в системе овал — квадрат в значительной мере зависит от конструкции овального калибра.

В практике встречаются овалы четырех типов (рис. 35). Первый тип калибра обычно называют «нормальным» овалом. Этот тип чаще всего можно встретить на существующих прокатных станах. Второй, третий и четвертый типы применяют реже нормальных овалов, главным образом тогда, когда нужно осуществить большие вытяжки по проходам при малом их числе.

Отношение осей овальных калибров обычно находится в пределах от 1,1 до 3,5. Малое отношение осей имеют все предчистовые овальные калибры и овальные калибры для прокатки крупных сечений. Большое отношение осей имеют вытяжные овалы.

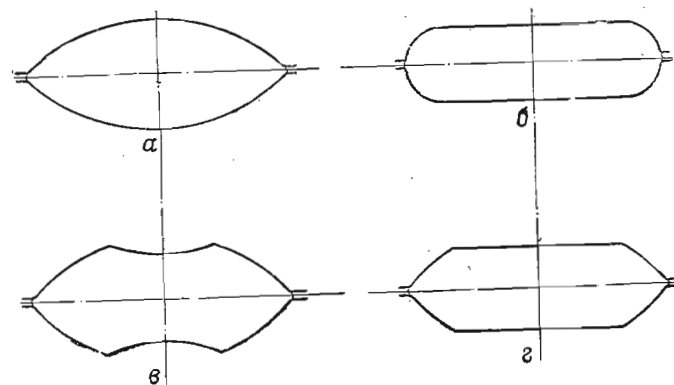


Рис. 35. Типы овальных калибров:  
а — нормальный овал; б, в, г — так называемые ненормальные овалы

Для таких калибров довольно четко выявляется следующая особенность: чем меньше площадь поперечного сечения калибра, тем больше его отношение осей. Это объясняется тем, что при использовании овалов с малым отношением осей для мелких сечений затрудняются условия работы: при задаче овала в следующий квадрат полоса легко свертывается. В тех случаях, где это затруднение удастся преодолеть, применение овалов с малым отношением осей иногда оказывается выгодным, так как уменьшается износ валков.

По данным П. А. Александрова, В. А. Писанко, С. Т. Богатырева [24], которые подвергли анализу большое количество калибровок прокатных станов южных заводов, отношение осей овалов и вытяжка в них практически лежит в следующих пределах:

	Отношение осей	Вытяжка
Нормальные овалы . . . . .	2,1—3,2	1,25—1,90
Ненормальные овалы . . . . .	2,8—3,9	1,35—2,10

Отношение осей ненормальных овалов больше, чем отношение осей нормальных овалов, потому что величина малой оси в первом случае как бы искусственно уменьшена. Авторы правильно отмечают, что вытяжка в ненормальных овалах воз-

растает потому, что она зависит от отношения осей, возрастая с ростом этого отношения.

На основе анализа заводских материалов авторы рекомендуют вытяжки в системе овальных и квадратных калибров и дают их примерные значения для низкоуглеродистых и высокоуглеродистых сталей.

Остановимся на некоторых особенностях прокатки в овальных и квадратных калибрах. На рис. 36 приведены три смежных овальных и квадратных калибра.

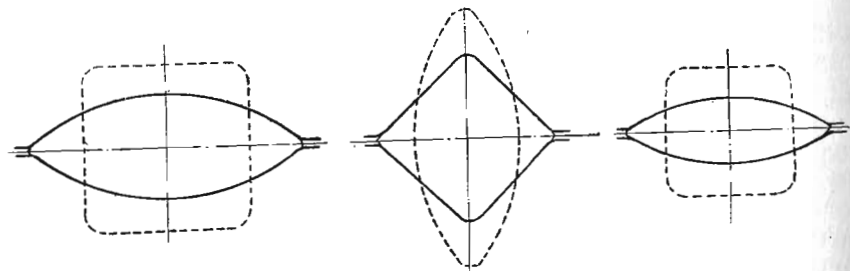


Рис. 36. Калибры системы овал — квадрат

Из рисунка видно, что полоса при выходе из квадратного калибра перед задачей в овальный калибр кантуется на  $45^\circ$ , а по выходе из овального калибра — на  $90^\circ$ . Поэтому ребра квадратной полосы закатываются в следующем овальном калибре, а

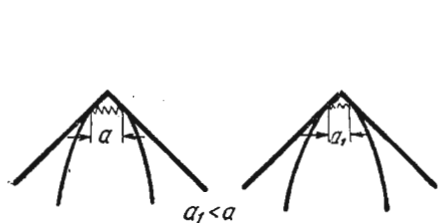


Рис. 37. Схема образования морщин на поверхности овальной полосы

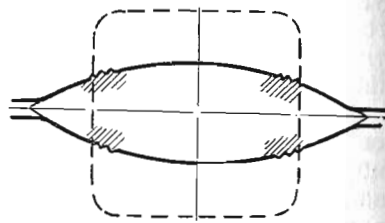


Рис. 38. Характер износа поверхности овального калибра (участки наибольшего износа заштрихованы)

ребра овальной полосы, вышедшей из него, закатываются в последующем квадратном калибре. Такой порядок кантовки способствует равномерному распределению температуры по поперечному сечению и периметру полосы. Последнее же благоприятно в том отношении, что опасность образования трещин на ребрах

полосы меньше, чем, например, при прокатке по системе ромб — ромб, где полоса кантуется во всех калибрах на  $90^\circ$ . Иногда при прокатке некоторых сталей вытяжки умышленно ограничивают. Это объясняется тем, что при значительных вытяжках в зонах наибольшего обжатия (рис. 37) образуются мелкие складки и трещины. Следует заметить, что при правильно спроектированной калибровке указанные дефекты не образуются ни при прокатке мягких, ни при прокатке твердых сталей.

Форма овального калибра, обеспечивающая малую глубину реза в валки, позволяет осуществлять большое количество переточек. Это обстоятельство тем более благоприятно, что овальный калибр довольно быстро изнашивается в местах первого соприкосновения с полосой (рис. 38).

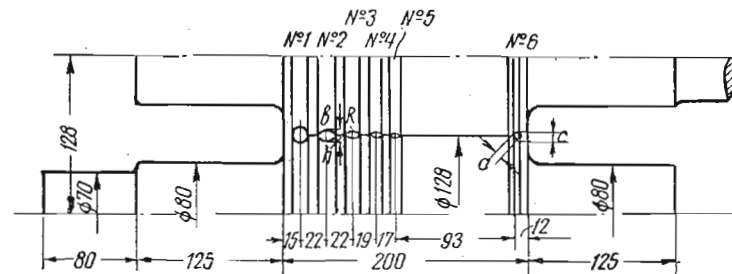
### § 3. Исследование уширения квадратных полос в овальных калибрах

Опыты по прокатке в овальных калибрах производились на лабораторном прокатном стане с диаметром валков 130 мм. Окружная скорость валков — 0,222 м/сек.

Все опыты производились на свинцовых и стальных образцах. Химический состав свинца: 0,09% Cu; 0,53% Sb; 0,008% Bi; 99,2% Pb. Химический состав стали: 0,34% C; 0,62% Mn; 0,23% Si; 0,028% S; 0,010% P.

Свинец прокатывался при комнатной температуре, сталь — при  $1000^\circ$ .

Прокатные валки и размеры калибров приведены на рис. 39. Размеры калибров выбраны таким образом, что по мере увели-



№ калибра	$h$	$b$	$R$	$a$	$c$
1	14,9	14,9	7,45	—	—
2	11,9	17,9	9,7	—	—
3	6,34	14,25	9,65	—	—
4	3,84	11,65	9,75	—	—
5	3,0	10,75	10,2	—	—
6	—	—	—	52	7,3

Рис. 39. Рабочие валки стана 130



чения отношения осей овала, линейные размеры калибров уменьшаются. Это было сделано для того, чтобы не получать углов захвата больше  $17^\circ$ . Следовательно, во всех опытах условия прокатки можно считать нормальными — без буксования, возникающего тогда, когда углы захвата превышают предельные.

Как видно из рис. 39, калибры очерчены двумя дугами окружности, т. е. представляют собой геометрически правильные овалы.

Всего было прокатано около 1500 полос. Соответственные размеры овальной полосы вычислялись по равенствам (11—I):

$$h_{1c} = \sqrt{\frac{\omega_1}{a_1}}; \quad b_{1c} = a_1 h_{1c}.$$

Коэффициент уширения при прокатке в овальных калибрах вычислялся по формуле:

$$\frac{\Delta b_c}{\Delta h_c} = \frac{b_{1c} - b_{0c}}{h_{0c} - h_{1c}}.$$

Принимая во внимание, что в овальный калибр задается квадратная полоса, для которой  $h_0 = h_{0c}$  и  $b_0 = b_{0c}$ , эта формула принимает вид:

$$\frac{\Delta b_c}{\Delta h_c} = \frac{b_{1c} - b_0}{h_0 - h_{1c}}.$$

После прокатки овальных полос в калибрах, квадратные полосы таких же исходных размеров, что и при прокатке в ручьях, прокатывались на гладкой бочке на высоту, равную соответственной высоте  $h_{1c}$  овальной полосы. После соответствующих измерений размеров полосы определялся коэффициент относительного уширения при прокатке на гладкой бочке:

$$\frac{\Delta b}{\Delta h} = \frac{b_1 - b_0}{h_0 - h_1}.$$

Описанные опыты производились при различной степени заполнения ( $i = 0,77 \div 0,80; 0,9; 1,0$ ) и неизменном «рабочем» зазоре между валками, во всех случаях одинаковом, с тем, чтобы форма калибра не искажалась.

Для свинца и стали при всех исследованных степенях заполнения зависимость между коэффициентом уширения и отношением осей полосы в первом приближении представляется линейной. Эта зависимость найдена по данным опытов для случая прокатки в калибрах и на гладкой бочке по способу наименьших квадратов и приведена на рис. 40—45. Результаты опытов по прокатке стальных полос представлены в табл. 3.

Результаты опытов позволяют сделать следующие выводы.

1. Условия деформации в калибре отличаются от условий деформации на гладкой бочке. Благодаря стесняющему действию

ручьев, уширение полосы в калибре меньше, чем на гладкой бочке.

2. С ростом отношения осей овальной полосы при данной степени заполнения уширение в калибре приближается по

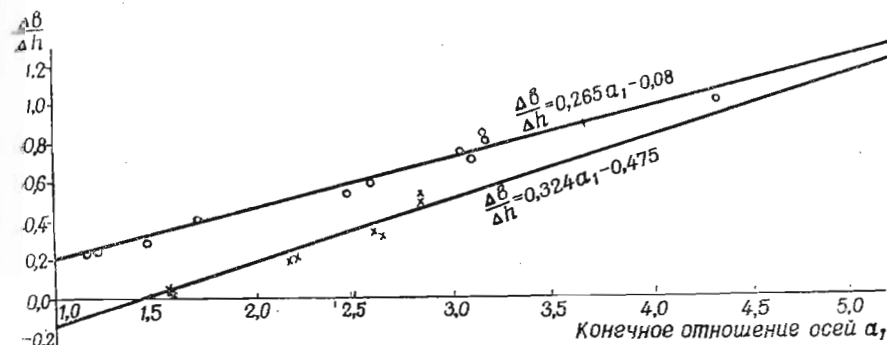


Рис. 40. Зависимость отношения  $\frac{\Delta b}{\Delta h}$  от  $a_1$  в овальном калибре (нижняя кривая) и на гладкой бочке (верхняя кривая). Прокатываемый материал — свинец. Овальный калибр заполнен на 100%

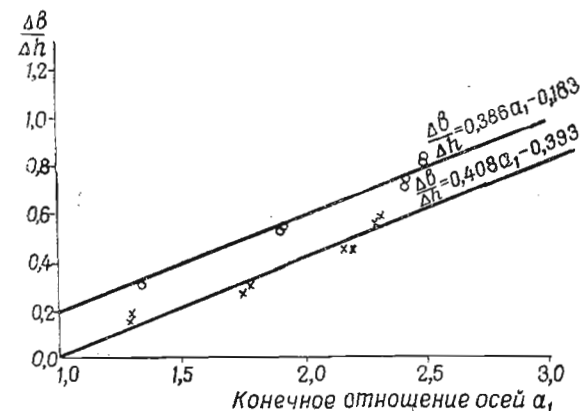


Рис. 41. Зависимость отношения  $\frac{\Delta b}{\Delta h}$  от  $a_1$  в овальном калибре (нижняя кривая) и на гладкой бочке (верхняя кривая). Прокатываемый материал — свинец. Овальный калибр заполнен на 90%

величине к уширению на гладкой бочке. Это свидетельствует о том, что с ростом отношения осей стесняющее действие калибра уменьшается.

Результаты опытов по прокатке овальных  
(Материал — сталь; темпе

№ по пор.	Форма поперечного сечения	$l_0$	$h_0$	$b_0$	$\omega_0$	$v$	$h_1$	$l_1$	$b_1$	$a_1 = \frac{b_1}{h_1}$
-----------	---------------------------	-------	-------	-------	------------	-----	-------	-------	-------	-------------------------

Степень заполнения

1	Овал	150	14,71	14,70	216,5	32420	11,10	230,1	18,3	1,635
2	Прямоугольник	150	14,71	14,69	216,0	32400	9,28	195,6	17,88	1,925
	Овал	150	10,66	10,63	113,4	17000	6,73	249,2	15,48	2,30
	Прямоугольник	150	10,64	10,63	113,2	16980	4,88	207,8	16,74	3,42

Степень заполнения

3	Овал	150	12,45	12,56	155,0	23250	11,51	171,9	13,83	1,200
4	Прямоугольник	150	12,46	12,44	154,9	23220	10,33	169,7	13,25	1,282
	Овал	150	8,83	8,31	77,7	11600	6,26	197,0	11,71	1,87
	Прямоугольник	150	8,81	8,83	77,7	11680	5,38	182,8	11,89	2,21
5	Овал	150	7,00	7,00	49,0	7350	4,21	206,9	11,48	2,73
	Прямоугольник	151,2	6,90	6,99	48,9	7395	3,71	187,9	10,62	2,86
6	Овал	150	5,76	5,79	38,3	5000	3,48	197,3	9,82	2,82
	Прямоугольник	150	5,77	5,78	38,25	4995	2,94	184,6	9,21	3,13

Степень заполнения

7	Овал	150	7,69	7,74	59,5	8930	6,22	178,5	9,19	1,48
	Прямоугольник	150	7,71	7,70	59,3	8900	6,22	179,8	9,18	1,65
8	Овал	150	6,13	6,09	37,4	5610	4,10	187,8	8,99	2,19
	Прямоугольник	150	6,10	6,13	37,8	5600	3,68	130,0	8,47	2,31
9	Овал	150	5,24	5,27	27,65	4140	3,43	186,1	8,20	2,39
	Прямоугольник	150	5,23	5,27	27,60	4135	3,00	178,9	7,70	2,56

3. Чем меньше степень заполнения калибра, тем ближе друг к другу расположены кривые, выражающие зависимость коэффициента относительного уширения от отношения осей в калибрах и на гладкой бочке. Кроме того, с уменьшением степени заполнения кривые стремятся занять параллельное положение по отношению друг к другу. Это свидетельствует о том, что с уменьшением степени заполнения уширение в калибре приближается по величине к уширению на гладкой бочке. Последнее является результатом уменьшения стесняющих усилий, приложенных к полосе со стороны валков в калибре.

Результаты описанных опытов полностью подтверждают общие соображения относительно условий деформации полосы в калибрах и на гладкой бочке, которые изложены в § 4 гл. I.

Таблица 3

и соответственных им прямоугольных полос  
ратура прокатки 1000°)

$\omega_1 = \frac{v}{l_1}$	$h_{1c}$	$b_{1c}$	$b_1$	$\Delta h_c$	$\Delta h$	$\Delta b_c$	$\Delta b$	$\frac{\Delta b}{\Delta h}$	$\alpha$	$\frac{\Delta h}{h_0}$	$\lambda$
----------------------------	----------	----------	-------	--------------	------------	--------------	------------	-----------------------------	----------	------------------------	-----------

овальных калибров  $i = 1,00$ 

141,0	9,30	15,20	—	5,45	—	0,50	—	0,094	17°25'	0,370	1,535
165,8	9,28	—	17,88	—	5,42	—	3,19	0,588	16°40'	0,368	1,300
68,2	5,44	12,51	—	5,22	—	1,88	—	0,360	16°45'	0,490	1,66
81,7	4,88	—	16,74	—	5,76	—	6,11	1,062	17°10'	0,541	1,387

овальных калибров  $i = 0,90$ 

135,1	10,62	12,77	—	1,83	—	0,31	—	0,170	10°00'	0,147	1,148
137,0	10,33	—	13,25	—	2,13	—	0,86	0,404	10°20'	0,171	1,131
59,2	5,63	10,33	—	3,20	—	1,72	—	0,537	13°00'	0,362	1,314
63,8	5,88	—	11,89	—	3,43	—	3,06	0,892	13°15'	0,389	1,218
35,5	3,61	9,87	—	3,38	—	2,87	—	0,846	13°20'	0,483	1,380
39,4	3,71	—	10,62	—	3,28	—	3,63	1,11	12°55'	0,476	1,241
25,35	3,00	8,46	—	2,76	—	2,67	—	0,968	12°00'	0,479	1,311
27,10	2,94	—	9,21	—	2,83	—	3,43	1,21	12°00'	0,491	1,23

овальных калибров  $i = 0,77$ 

50,0	5,82	8,61	—	1,87	—	0,87	—	0,465	9°56'	0,243	1,190
51,4	5,60	—	9,18	—	2,11	—	1,48	0,700	10°20'	0,274	1,154
29,7	3,69	8,08	—	2,44	—	1,99	—	0,815	10°15'	0,398	1,260
31,2	3,68	—	8,47	—	2,42	—	2,34	0,906	11°05'	0,397	1,195
22,3	3,05	7,30	—	2,19	—	2,03	—	0,927	10°27'	0,418	1,24
23,1	3,00	—	7,70	—	2,23	—	2,43	1,09	10°25'	0,427	1,195

Перейдем к определению поправочного коэффициента уширения для случая прокатки в овальных калибрах.

Чтобы получить поправочный коэффициент уширения как функцию отношения осей полосы и степени заполнения, нужно разделить значение коэффициента относительного уширения в калибрах на значение этого же коэффициента на гладкой бочке при одинаковых последовательно изменяющихся значениях  $a_1$  и  $i$ .

Результаты расчетов приведены в табл. 4, по которой построены кривые поправочного коэффициента уширения (см. рис. 9, § 4 гл. I). Зависимость относительного уширения от отношения осей при прокатке в калибрах и на гладкой бочке приближенно выражается уравнениями прямых типа  $\frac{\Delta b_c}{\Delta h_c} = A_1 a_1 + A_2$  и

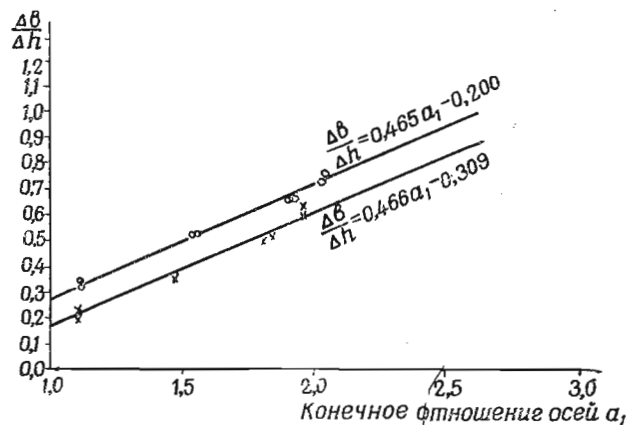


Рис. 42. Зависимость отношения  $\frac{\Delta b}{\Delta h}$  от  $a_1$  в овальном калибре (нижняя кривая) и на гладкой бочке (верхняя кривая). Прокатываемый материал — оvinец. Овальный калибр заполнен на 80%.

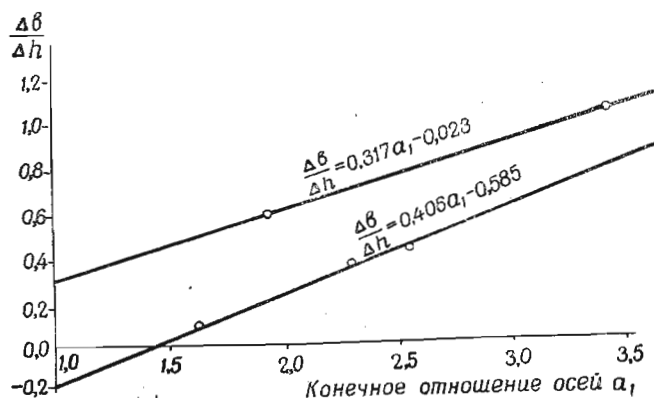


Рис. 43. Зависимость отношения  $\frac{\Delta b}{\Delta h}$  от  $a_1$  в овальном калибре (нижняя кривая) и на гладкой бочке (верхняя кривая). Прокатываемый материал — сталь. Температура прокатки 1000°. Овальный калибр заполнен на 100%.

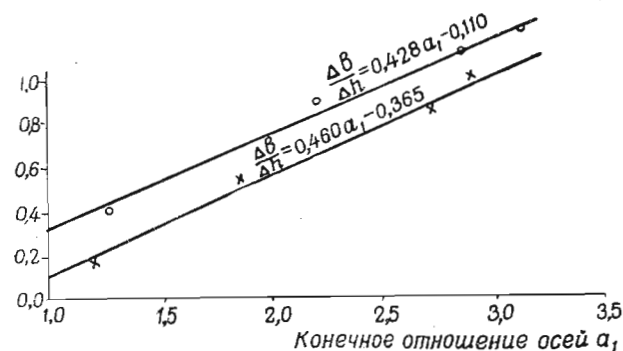


Рис. 44. Зависимость отношения  $\frac{\Delta b}{\Delta h}$  от  $a_1$  в овальном калибре (нижняя кривая) и на гладкой бочке (верхняя кривая). Прокатываемый материал — сталь. Температура прокатки 1000°. Овальный калибр заполнен на 88%.

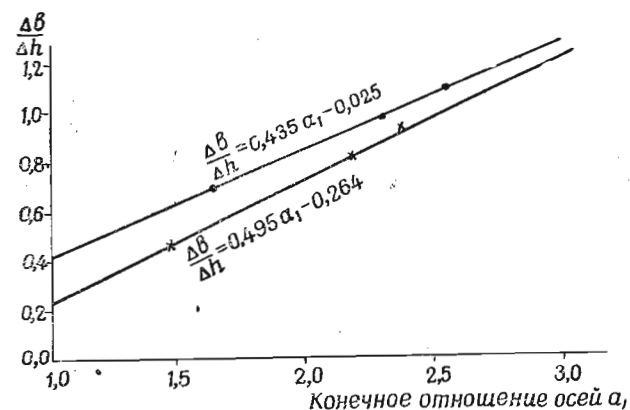


Рис. 45. Зависимость отношения  $\frac{\Delta b}{\Delta h}$  от  $a_1$  в овальном калибре (нижняя кривая) и на гладкой бочке (верхняя кривая). Прокатываемый материал — сталь. Температура прокатки 1000°. Овальный калибр заполнен на 77%.

$\frac{\Delta b}{\Delta h} = A_3 a_1 + A_4$ , в которых  $A_1, A_2, A_3, A_4$  — числовые коэффициенты. Кривые, изображенные на рис. 9, являются кривыми второго порядка типа:

$$k_i = \frac{A_1 a_1 - A_2}{A_3 a_1 + A_4} \quad (1-III)$$

Эти кривые являются дробно-линейными гиперболами с асимптотами, параллельными осям координат.

Асимптота, параллельная оси  $a_1$ , теоретически должна иметь уравнение:

$$k_i = 1.$$

В самом деле, соображения, приведенные в § 4 гл. I, и результаты опытов показывают, что случай  $k_i = 1$  соответствует прокатке на гладкой бочке двух полос одинакового размера с одинаковым обжатием. Понятно, что уширение таких полос будет одинаковым.

Асимптота  $k_i = 1$  и выражает этот предельный случай.

Ради точности заметим, что асимптота гипербол, полученных нами, будет отличаться от асимптоты  $k_i = 1$  в большую сторону, причем каждая гипербола будет иметь свою асимптоту. Объясняется это тем, что фактические кривые, асимптотически приближающиеся друг к другу, мы заменили прямыми, которые пересекаются при некоторых определенных значениях  $a_1$ . Например, при прокатке стальных полос в калибрах, заполненных на 90%, асимптота равна 1,07. Однако в интервале значений  $a_1$  от 1,0 до 4,0, которые употребляются в практике, это обстоятельство не внесет существенной погрешности.

Кривые (см. рис. 9) дают возможность определить величину поправочного коэффициента уширения только при заполнении калибра на 80, 90 и 100%. Указанными кривыми и табл. 4 можно воспользоваться для определения величины  $k_i$  при всех промежуточных значениях степени заполнения. Действительно, в уравнении (1—III) коэффициенты  $A_1, A_2, A_3, A_4$  — функции степени заполнения калибра  $i$ . На основании данных опыта эти функции легко определяются, и уравнение (1—III) приобретает такой вид:

Для степени заполнения  $i = 0,8 \div 0,9$ :

$$k_i = \frac{(1,093 - 0,58 i) a_1 - (0,84 i - 0,364)}{(1,098 - 0,79 i) a_1 - (0,336 - 0,17 i)}.$$

Для степени заполнения  $i = 0,9 \div 1,0$ :

$$k_i = \frac{(1,164 - 0,84 i) a_1 - (0,80 i - 0,327)}{(1,475 - 1,21 i) a_1 - (1,11 - 1,03 i)}.$$

(2—III)

По этим уравнениям построена рабочая номограмма (рис. 46), которой мы будем пользоваться при расчете овальных калибров.

В заключение попытаемся оценить, в какой мере данные лабораторного эксперимента соответствуют практическим данным. С этой целью (табл. 5 и 6) дан анализ двух калибровок. На рис. 47 (25) и 48 показаны поперечные разрезы прокатываемых полос по проходкам. В табл. 5 и 6 приводится также расчет уширения полос при прокатке на гладкой бочке по формуле (23—I), исходные размеры которых являются соответственными тем, которые прокатывались в калибрах. Коэффициент трения везде принят равным  $\mu = 0,3$ .

По данным табл. 5 и 6 построены кривые (рис. 49 и 50), характеризующие зависимость поправочного коэффициента уширения от отношения осей. На рис. 51 и 52 построены описанным выше способом поправочные коэффициенты уширения. Данные рис. 51 и 52 показывают, что при одной и той же степени заполнения кривые поправочного коэффициента уширения для заводских калибровок располагаются в области, заключенной между кривыми, полученными на основании лабораторного эксперимента.

Учитывая, что точность расчета уширения при прокатке на гладкой бочке составляет примерно  $\pm 10\%$ , можно сделать такой вывод: порядок величин поправочного коэффициента уши-

Таблица 4

Значение поправочного коэффициента уширения  $k_i$  для стальных полос, а также для стальных полос, прокатанных при температуре 1000°

Материал	$i$	Значение поправочного коэффициента при отношении осей полос:									
		1,00	1,25	1,50	1,75	2,00	2,25	2,50	2,75	3,0	3,5
Свинец	1,00	—0,805	—0,333	0,041	0,245	0,389	0,494	0,577	0,647	0,697	0,780
	0,90	0,074	0,391	0,554	0,653	0,718	0,766	0,800	0,828	0,852	0,886
	0,80	0,592	0,712	0,784	0,825	0,854	0,873	0,889	0,898	0,909	0,923
Сталь	1,00	—0,61	—0,209	0,055	0,235	0,372	0,475	0,558	0,623	0,684	0,766
	0,88	0,291	0,493	0,609	0,677	0,745	0,784	0,818	0,843	0,865	0,895
	0,77	0,563	0,683	0,761	0,819	0,858	0,890	0,915	0,936	0,954	0,980
											0,990
											1,02

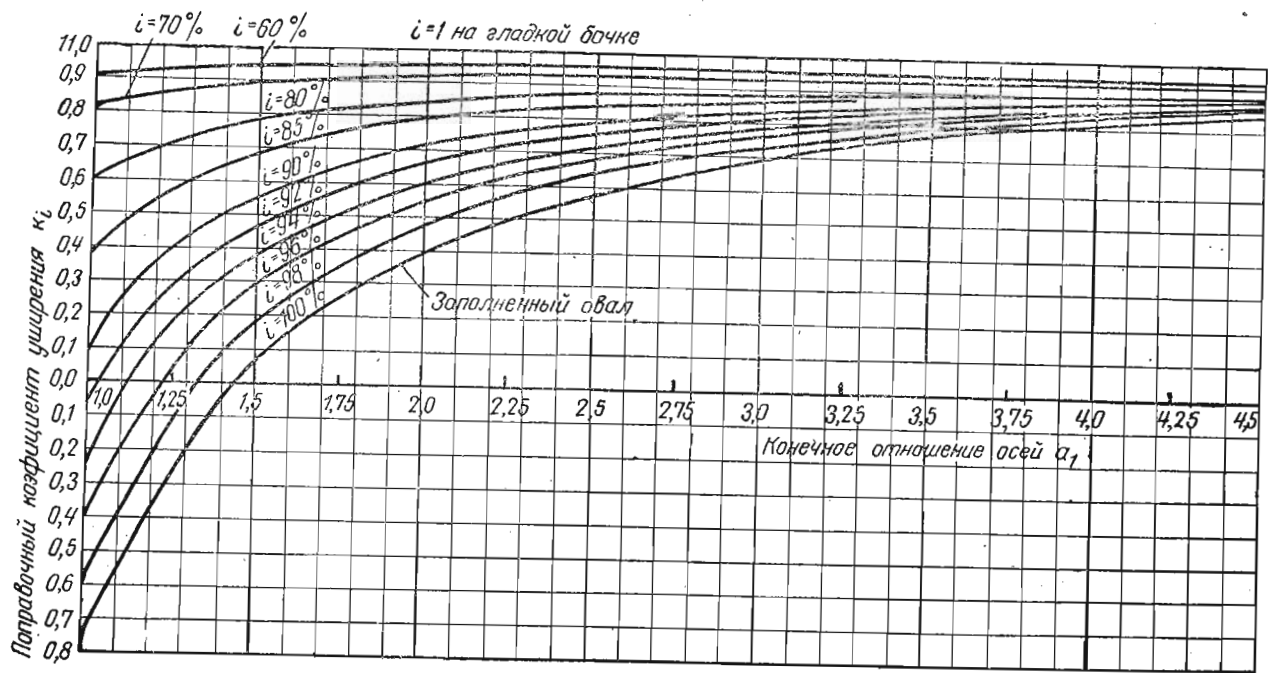


Рис. 46. Номограмма для определения поправочного коэффициента уширения при прокатке квадратных полос в овальных калибрах

Таблица 5

Анализ калибровки системы овал—квадрат для прокатки круга диаметром 16 мм из стали марки ШХ15

Порядок прокатки	Данные практики								Данные анализа калибровки							
	$h_0$ мм	$b_0$ мм	$h_1$ мм	$b_1$ мм	$a_0$	$a_1$	$\omega_0$ мм <sup>2</sup>	$\omega_1$ мм <sup>2</sup>	$a_K$	$\frac{h_K^2}{\omega_K}$	$\omega_K$ мм <sup>2</sup>	$i$	$h_{0c}$ мм	$b_{0c}$ мм	$h_{1c}$ мм	$b_{1c}$ мм
Квадрат—ромб . .	49,2	46,2	38,2	51,0	1,070	1,335	1388	1174	—	—	—	—	—	—	—	—
Ромб—квадрат . .	38,2	51,0	41,8	40,5	1,335	0,968	1174	1013	—	—	—	—	—	—	—	—
Квадрат—овал . .	41,8	40,5	21,8	40,1	0,968	1,840	1013	728	2,36	0,600	792	0,920	32,3	31,30	19,90	36,60
Овал—квадрат . .	40,1	21,8	30,4	28,2	1,840	0,447	728	561	1,00	—	615	0,910	36,6	19,90	24,30	23,00
Квадрат—овал . .	30,4	28,2	15,5	33,0	0,947	2,130	561	397	2,50	0,566	423	0,940	24,3	23,00	13,65	29,10
Овал—квадрат . .	33,0	15,5	22,8	21,5	2,130	0,444	397	302	1,00	—	320	0,944	29,1	13,65	17,90	16,90
Квадрат—овал . .	22,8	21,5	14,2	21,6	0,944	1,520	302	227	1,75	0,800	252	0,900	17,9	16,90	12,20	18,55
Овал—круг . . .	21,6	14,2	16,1	16,0	1,52	0,994	227	206	1,00	1,273	204	1,000	12,2	18,55	14,40	14,30

Порядок прокатки	Данные анализа калибровки				Результаты расчета для случая прокатки на гладкой бочке											
	$\Delta h_c$	$\Delta b_c$	$\frac{\Delta b_c}{\Delta h_c}$	$\alpha$	$D_p$	$h_0$	$b_0$	$h_1$	$\Delta h$	$\frac{\Delta h}{h_0}$	$\frac{D_p}{h_0}$	$\frac{\Delta b}{\Delta h}$	$\Delta b$	$b_1$	$a_0$	$a_1$
	мм	мм			мм	мм	мм	мм	мм				мм	мм		
Квадрат—ромб . .	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Ромб—квадрат . .	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Квадрат—овал . .	12,40	5,30	0,427	18°40'	280	32,3	31,30	19,9	12,40	0,384	8,68	0,675	8,35	39,65	1,01	2,00
Овал—квадрат . .	12,30	3,10	0,252	18°	276	36,6	19,90	24,3	12,30	0,337	7,54	0,31	3,80	23,70	1,84	0,98
Квадраг—овал . .	10,65	6,10	0,574	16°45'	286	24,3	23,00	13,65	10,65	0,439	11,78	0,88	9,35	32,35	1,06	2,37
Овал—квадрат . .	11,20	3,25	0,290	17°20'	282	29,1	13,65	17,9	11,20	0,385	9,70	0,36	4,00	17,65	2,13	0,99
Квадраг—овал . .	5,70	1,65	0,290	12°30'	288	17,9	16,90	12,2	5,70	0,319	16,10	0,85	4,85	21,75	1,06	1,78
Овал—круг . . .	4,15	2,10	0,506	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Таблица 6

## Анализ калибровки системы овал—квадрат при прокатке полосы 3×23 мм из стали ЭР

Порядок прокатки	Данные практики								Данные анализа калибровки							
	$h_0$	$b_0$	$h_1$	$b_1$	$a_0$	$a_1$	$\omega_0$	$\omega_1$	$a_K$	$\frac{h_K^2}{\omega_K}$	$\omega$	$i$	$h_{0c}$	$b_{0c}$	$h_{1c}$	$b_{1c}$
	мм	мм	мм	мм			мм <sup>2</sup>	мм <sup>2</sup>			мм <sup>2</sup>		мм	мм	мм	мм
Квадрат—овал . .	32,0	32,0	20,8	36,5	1,00	1,75	920	657	2,40	0,59	730	0,90	32,00	32,0	19,35	33,9
Овал—квадрат . .	36,5	20,8	23,7	23,4	1,75	0,99	657	521	1,00	—	561	0,93	33,90	19,35	22,9	22,7
Квадрат—овал . .	23,7	23,4	14,8	30,4	0,99	2,05	521	371	2,60	0,54	405	0,92	22,90	22,7	13,45	27,55
Овал—квадрат . .	30,4	14,8	17,8	17,3	2,05	0,97	371	293	1,00	—	343	0,86	27,55	13,45	17,40	16,85
Квадрат—овал . .	17,8	17,3	10,0	25,5	0,97	2,55	293	214	3,30	0,46	219	0,98	17,4	16,85	9,15	23,35
Овал—квадрат . .	25,5	10,0	13,1	12,9	2,55	0,985	214	165	1,00	—	172	0,96	23,35	9,15	12,95	12,75
Квадрат—полоса .	13,1	12,4	7,2	20,2	0,985	2,81	165	145	—	—	—	—	—	—	—	—
Полоса—полоса .	7,2	20,2	4,3	24,2	2,81	5,73	145	105	—	—	—	—	—	—	—	—
Полоса—полоса .	24,2	4,3	21,4	4,7	0,174	0,220	105	95	—	—	—	—	—	—	—	—
Полоса—полоса .	4,7	21,4	3,4	23,1	4,55	6,80	95	78	—	—	—	—	—	—	—	—





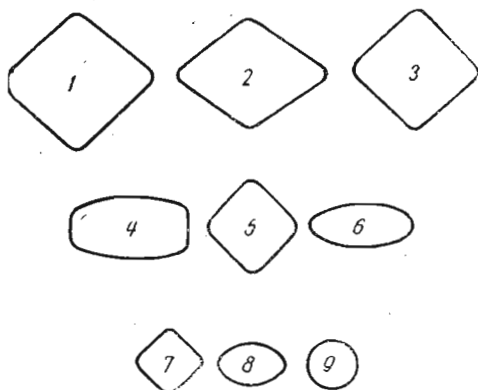


Рис. 47. Поперечные сечения полос по проходам при прокатке круга диаметром 16 мм из шарикоподшипниковой стали.  
Диаметр 16 мм (Ю. М. Чижиков).

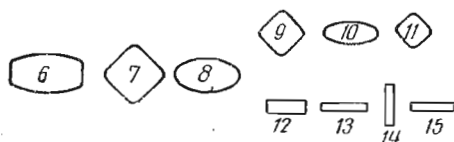


Рис. 48. Поперечные сечения полос по проходам при прокатке полосы 3×23 мм из стали марки ЭР

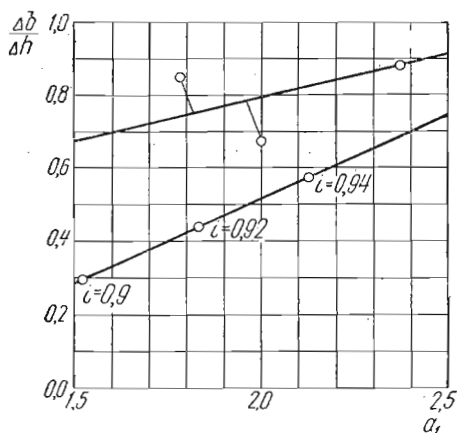


Рис. 49. Зависимость отношения  $\frac{\Delta b}{\Delta h}$  от  $\alpha_1$  в овальном калибре (нижняя кривая) и на гладкой бочке (верхняя кривая).  
Сталь ШХ15

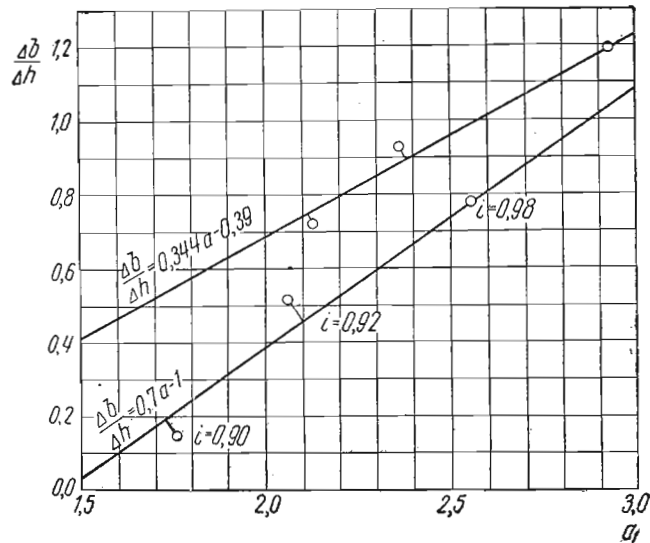


Рис. 50 Зависимость отношения  $\frac{\Delta b}{\Delta h}$  от  $a_1$  в овальном калибре (нижняя кривая) и на гладкой бочке (верхняя кривая). Сталь марки ЭР

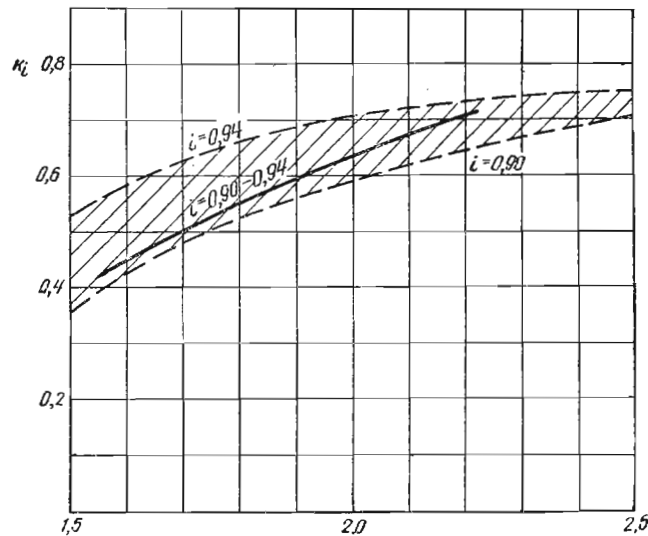


Рис. 51. Зависимость поправочного коэффициента уширения  $a_1$  в овальных ручьях калибровки завода для прокатки стали ШХ15. Заштрихованная область из номограммы (рис. 46)

рения по данным практики и лабораторного эксперимента удовлетворительно совпадают.

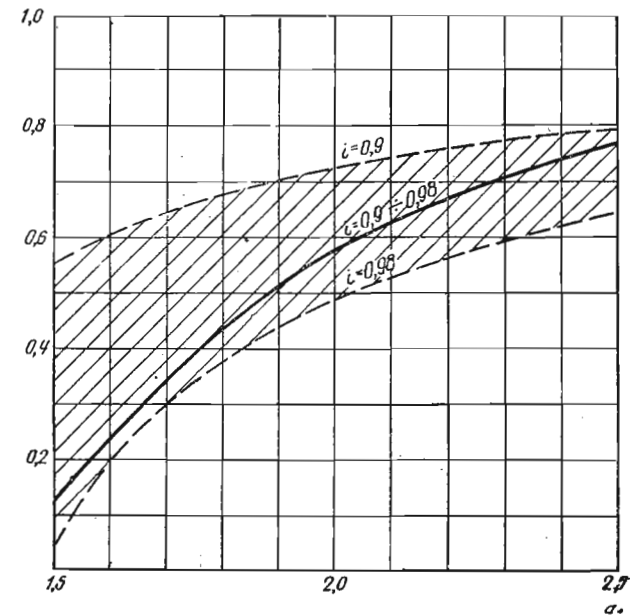


Рис. 52. Зависимость поправочного коэффициента уширения от  $a_1$  в овальных ручьях калибровки для прокатки стали марки ЭР. Заштрихованная область из номограммы (рис. 46)

#### § 4. Исследование уширения овальных полос в квадратных калибрах

Прокатные валки с квадратными калибрами, в которых проводилась опытная прокатка, изображены на рис. 53. Химический состав свинца и стали, из которых изготавливались опытные образцы, условия и порядок проведения опытов аналогичны описанным в § 3. Овальные полосы, необходимые для прокатки в квадратных калибрах, прокатывались в валках с калибрами, изображенными на рис. 39, при условии заполнения калибров на 100%.

При прокатке овальной полосы в квадратном калибре длинная ось поперечного сечения полосы расположена вертикально. Поэтому отношение осей овальной полосы и соответственной ей прямоугольной полосы можно записать так:

$$a_0 = \frac{h_0}{b_0}.$$

Соответственные размеры овальных полос определяются по равенствам (10—I).

Соответственные размеры квадратной полосы, получаемой в результате прокатки из овальной полосы, определяются по равенствам (11—I).

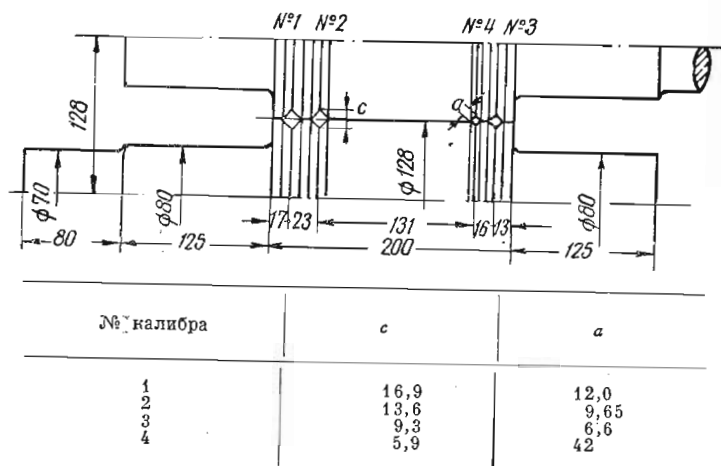


Рис. 53. Валки стана 130

Заметим, что если квадратный калибр имеет степень заполнения  $i=1$ , то размеры выходящей из него полосы равны размерам калибра. Вследствие равенства диагоналей калибра, его отношение осей  $a_1=1$ . Поэтому стороны квадрата  $c$  численно равны высоте и ширине соответственной полосы:

$$h_{1c} = \sqrt{\frac{\omega_1}{1,0}} = c; \quad b_{1c} = 1,0 \quad h_{1c} = h_{1c} = c.$$

Когда степень заполнения меньше единицы, высота и ширина соответственной полосы не равны стороне квадрата.

Коэффициент уширения при прокатке в калибрах вычисляется по соответственным размерам:

$$\frac{\Delta b_c}{\Delta h_c} = \frac{b_{1c} - b_{0c}}{h_{0c} - h_{1c}}.$$

После прокатки овальных полос в квадратных калибрах производилась прокатка прямоугольных полос, соответственных овальным, на гладкой бочке, с обжатием  $\Delta h$ , равным обжатию  $\Delta h_c$  при прокатке в калибрах.

По данным опыта определялось отношение уширения к обжатию при прокатке на гладкой бочке:

$$\frac{\Delta b}{\Delta h} = \frac{b_1 - b_0}{h_0 - h_1}.$$

Заполнение квадратного калибра при прокатке свинцовых полос составляло 100, 95 и 90%, при прокатке стальных полос — 95 и 90%. Меньшая степень заполнения калибров в практике обычно не встречается и поэтому не исследовалась.

Квадратный калибр в наиболее широкой части, у линии разрыва, ограничен воображаемыми линиями, являющимися продолжением наклонных стенок калибра. В вертикальной плоскости, проходящей через оси валков, эти линии ограничивают площадь калибра (рис. 54). Площадь калибра определяется по стороне полосы  $c$ , прокатанной в калибре.

Всего было прокатано около 1000 свинцовых и стальных полос различных размеров. На основании опытных данных была построена зависимость коэффициентов уширения от начального отношения осей (рис. 55, 56, 57). Результаты

опытов прокатки стальных полос приведены в табл. 7.

Результаты опытов позволяют сделать следующие выводы:

1. Уширение в квадратном калибре всегда меньше уширения на гладкой бочке. Таким образом, квадратный калибр «стесняет» уширение полосы.

2. С ростом отношения осей задаваемой в квадратный калибр овальной полосы уширение в калибре приближается по величине к уширению на гладкой бочке. Это свидетельствует о том, что с ростом отношения осей полосы стесняющие усилия, приложенные со стороны стенок калибра к полосе, уменьшаются.

3. Взаимное положение кривых, выражающих зависимость коэффициента относительного уширения от отношения осей в калибрах и на гладкой бочке, приблизительно одинаково. Таким образом, при изменении степени заполнения квадратных калибров в пределах 90—100% последняя на величину уширения полосы в калибре практически не влияет.

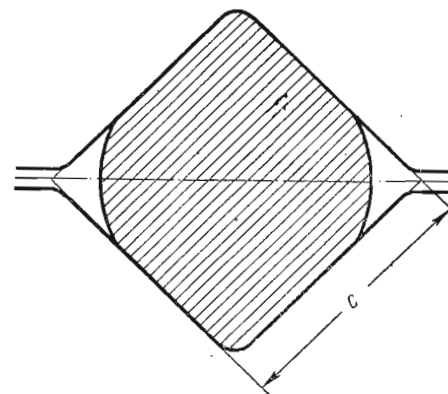


Рис. 54. Квадратный калибр, не заполненный металлом

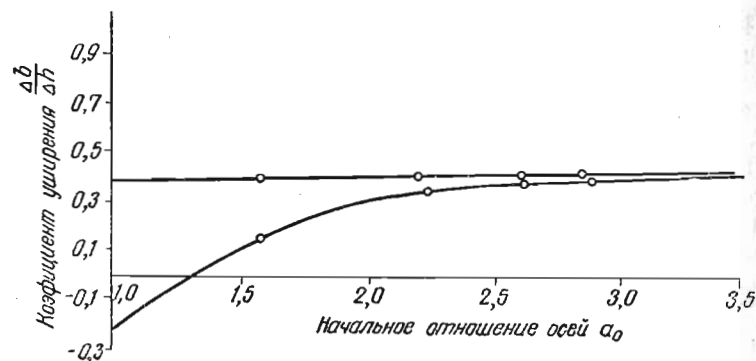


Рис. 55. Зависимость отношения  $\frac{\Delta b}{\Delta h}$  от  $a_0$  в квадратном калибре (нижняя кривая) и на гладкой бочке (верхняя кривая). Квадратный калибр заполнен на 100%. Прокатываемый материал — свинец

Результаты опытов по прокатке овальных полос в квадратных  
(Материал—сталь.

№ по- по- р.	Форма поперечного сечения	$l_0$	$h_0$	$b_0$	$\omega_0$	$V$	$a_0 = \frac{h_0}{b_0}$	$h_{oc}$	$b_{oc}$	$l_1$	$h_1$
СТЕПЕНЬ ЗАПОЛНЕНИЯ											
1	Квадрат . . . .	140	18,50	12,03	160,8	22500	1,54	15,75	10,20	178,8	15,01
	Прямоугольник .	135	15,58	10,48	163,8	22050	1,485	15,58	10,48	158,4	11,41
2	Квадрат . . . .	100	14,54	6,68	67,1	6710	2,18	12,12	5,55	133,6	9,64
	Прямоугольник .	150	12,13	5,38	65,3	9800	2,25	12,13	5,38	176,9	7,41
3	Квадрат . . . .	150	12,23	4,36	36,75	5520	2,80	10,16	3,62	190,0	7,27
	Прямоугольник .	150	10,25	3,65	37,40	5620	2,81	10,25	3,65	177,1	5,62
4	Квадрат . . . .	150	10,91	3,79	29,90	4480	2,87	9,26	3,23	188,8	6,36
	Прямоугольник .	150	9,39	3,10	29,10	4360	3,03	9,39	3,10	176,3	5,34

СТЕПЕНЬ ЗАПОЛНЕНИЯ

5	Квадрат . . . .	140	18,11	12,16	161,4	22580	1,49	15,70	10,41	169,9	14,94
	Прямоугольник .	135	15,55	10,44	162,4	21930	1,49	15,55	10,44	155,7	12,00
6	Квадрат . . . .	100	14,45	6,74	65,7	6570	2,144	11,88	5,54	125,0	9,82
7	Квадрат . . . .	150	11,97	4,31	36,5	5470	2,78	10,1	3,63	186,3	7,45
	Прямоугольник .	150	10,22	3,69	37,7	5550	2,77	10,22	3,69	178,7	5,88
8	Квадрат . . . .	150	10,94	3,79	30,7	4600	2,88	9,38	3,25	185,5	6,50
	Прямоугольник .	150	9,37	3,12	29,2	4380	3,00	9,37	3,12	174,8	5,73

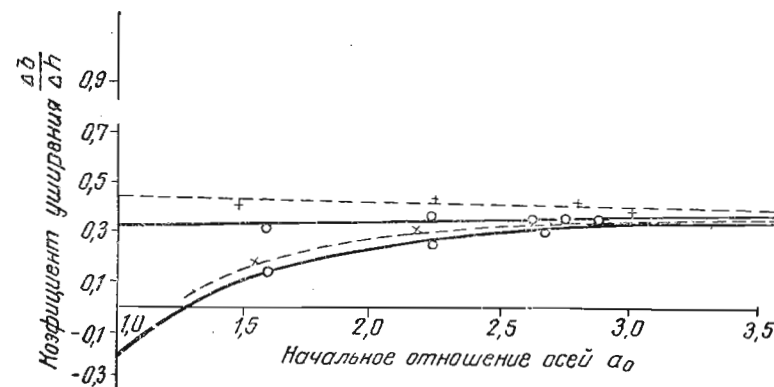


Рис. 56. Зависимость отношения  $\frac{\Delta b}{\Delta h}$  от  $a_0$  в квадратном калибре (нижние кривые) и на гладкой бочке (верхние кривые) при заполнении калибра на 95%. сплошная линия — свинец при комнатной температуре; пунктирная линия — сталь при 1000°

Таблица 7

калибрах и полос, соответственных овальным, на гладкой бочке  
Температура прокатки 1000°)

$b_1$	$a_1 = \frac{b_1}{h_1}$	$\omega_1 = \frac{V}{l_1}$	$h_{1c}$	$b_{1c}$	$b_1$	$\Delta h_c$	$\Delta h$	$\Delta b_c$	$\Delta b$	$\frac{\Delta b}{\Delta h}$	$\alpha$	$\frac{\Delta h}{h_0}$	$\lambda$
КВАДРАТНЫХ КАЛИБРОВ $i = 0,95$													
14,45	0,962	125,8	11,44	11,00	—	4,31	—	0,80	—	0,185	15°35'	0,273	1,278
12,20	1,069	139,2	11,41	—	12,20	—	4,17	—	1,72	0,412	14°45'	0,267	1,173
9,71	1,006	49,9	7,05	7,09	—	5,07	—	1,54	—	0,304	16°40'	0,418	1,345
7,47	1,010	55,3	12,13	—	15,38	—	4,72	—	2,09	0,442	15°40'	0,399	1,180
6,80	0,936	29,0	5,57	5,22	—	4,59	—	1,60	—	0,348	15°45'	0,452	1,269
5,62	1,000	31,7	5,62	—	5,62	—	4,63	—	1,97	0,425	15°30'	0,452	1,180
6,02	0,947	23,7	5,00	4,73	—	4,26	—	1,50	—	0,352	15°10'	0,460	1,262
4,64	0,867	24,8	5,34	—	4,64	—	4,05	—	1,54	0,310	14°00'	0,432	1,175

КВАДРАТНЫХ КАЛИБРОВ  $i = 0,90$ 

13,46	0,901	133,0	12,18	10,96	—	3,54	—	0,55	—	0,157	14°10'	0,225	1,215
11,67	0,970	141,0	12,09	—	11,67	—	3,46	—	1,23	0,354	13°25'	0,222	1,150
8,05	0,82	52,6	8,01	6,57	—	3,87	—	1,08	—	0,265	17°10'	0,326	1,250
6,36	0,854	29,3	5,88	5,02	—	4,22	—	1,39	—	0,329	15°05'	0,417	1,247
5,37	0,913	31,6	5,88	—	5,37	—	4,34	—	1,68	0,385	15°00'	0,424	1,194
5,48	0,835	24,8	5,45	4,55	—	3,93	—	1,29	—	0,328	14,35'	0,419	1,233
4,37	0,762	23,1	5,73	—	4,37	—	3,64	—	1,25	0,343	13°45'	0,389	1,165

Значение поправочного коэффициента уширения  $k_i$  для свинцовых полос, а также для стальных полос, прокатываемых при 1000°

Материал	Степень заполнения $i$	Значение поправочного коэффициента уширения при отношении осей полосы									
		1,00	1,25	1,50	1,75	2,00	2,50	3,00	3,25	3,50	
Свинец	1,0	-0,552	-0,078	0,294	0,582	0,750	0,852	0,910	0,928	0,941	0,945
	0,95	-0,538	-0,027	0,343	0,577	0,727	0,829	0,911	0,945	0,964	0,983
	0,9	-0,666	0,00	0,359	0,582	0,733	0,878	0,943	0,987	1,000	1,000
	Среднее	-0,585	-0,027	0,332	0,580	0,737	0,853	0,915	0,947	0,961	0,976
Сталь	0,95	—	0,095	0,381	0,550	0,659	0,753	0,816	0,853	0,874	0,893
	0,90	—	0,146	0,471	0,618	0,729	0,841	0,910	0,959	0,980	1,010
	Среднее	—	0,119	0,426	0,584	0,694	0,797	0,863	0,906	0,927	0,944
										0,944	0,951

Результаты опытов находятся в полном соответствии с общими соображениями относительно условий деформации в калибрах, изложенными в § 4 гл. I.

Перейдем к определению поправочного коэффициента уширения при прокатке овальных полос в квадратных калибрах.

Разделим опытные коэффициенты относительного уширения в калибрах на коэффициенты при прокатке на гладкой бочке при одинаковых последовательно изменяющихся значениях  $a_0$  и  $i$ .

Результаты деления приведены в табл. 8.

По данным этой таблицы построены кривые поправочного коэффициента уширения при прокатке свинцовых и стальных овальных полос в квадратных калибрах (см. рис. 10). Эти кривые расположены весьма близко друг к другу. Отсюда следует, что влияние степени заполнения при прокатке овальных полос в квадратных калибрах лежит в пределах погрешности опыта, и поправочный коэффициент от величины заполнения калибра практически не зависит.

Учитывая это обстоятельство, в табл. 8 даны средние значения поправочного коэффициента уширения для степени заполнения 90, 95 и 100%, вычисленные для каждого данного отношения осей.

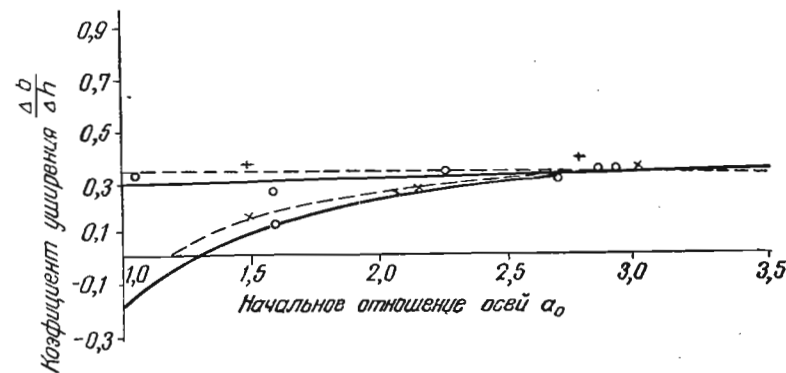


Рис. 57. Зависимость отношения  $\frac{\Delta b}{\Delta h}$  от  $a_0$  в квадратном калибре (нижние кривые) и на гладкой бочке (верхние кривые) при заполнении калибра на 90%: сплошная линия — свинец при комнатной температуре; пунктирная линия — сталь при 1000°

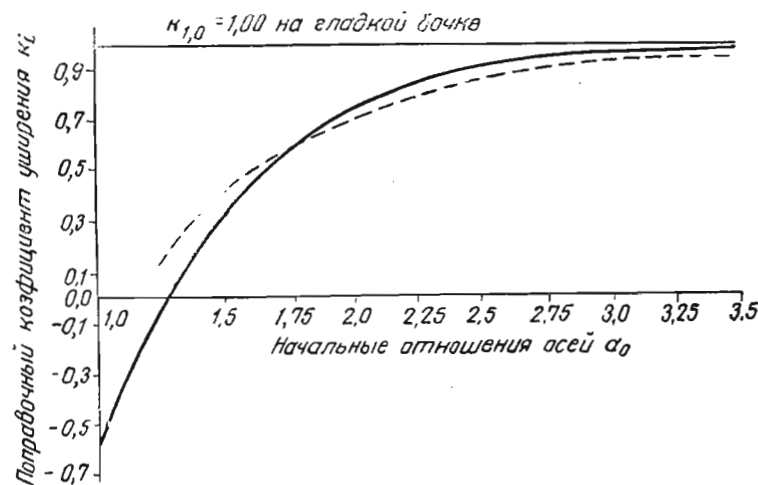


Рис. 58. Поправочный коэффициент уширения при прокатке свинца и стали в квадратных калибрах. Степень заполнения калибров  $i = 0,9-1,0$ : сплошная линия — свинец при комнатной температуре; пунктирная линия — сталь при 1000°

По средним значениям поправочного коэффициента уширения построены кривые (рис. 58), которые наглядно показывают, что зависимость поправочного коэффициента уширения от отношения осей полосы для свинца и стали практически одинакова. На основании анализа опытов прокатки в квадратных калибрах приходим к выводу, что поправочный коэффициент уширения от коэффициента трения зависит мало.

Учитывая все изложенное, для построения кривой поправочного коэффициента уширения воспользуемся расчетными данными средних значений  $k_i$  свинцовых полос при различном отношении осей. Эти данные выбраны потому, что они охватывают большой диапазон значений  $a_0$ . Соответствующая зависимость представ-

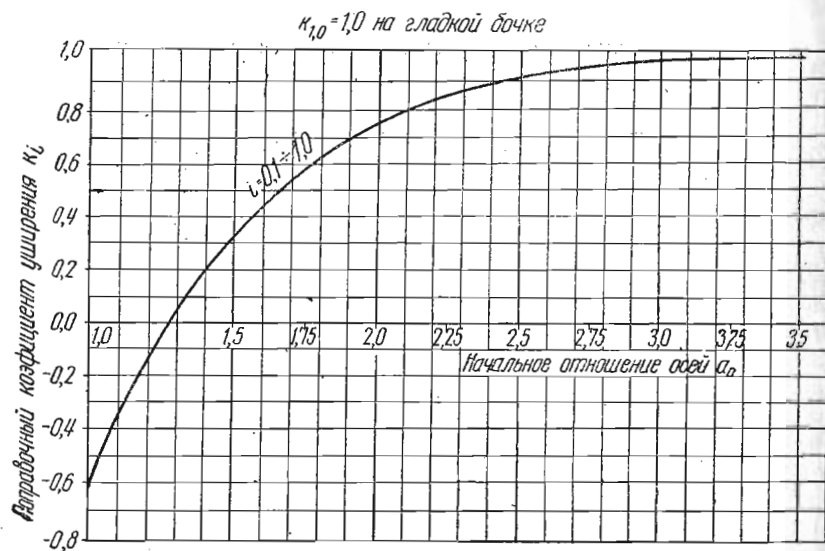


Рис. 59. Номограмма для определения поправочного коэффициента уширения при прокатке свинцовых овальных полос в квадратных калибрах

лена в виде кривой на рис. 59. Кривая поправочного коэффициента уширения может быть выражена для отношения осей полосы в пределах от 1,85 до 3,5 следующей формулой:

$$k_i = \frac{a_0 - 1,26}{0,85 a_0 - 0,68} \quad (3-III)$$

Сравним теперь результаты эксперимента с заводскими данными.

На основании анализа калибровок (см. табл. 5 и 6) построены кривые (рис. 60 и 61), характеризующие зависимость коэффициента уширения в квадратных калибрах и на гладкой бочке от

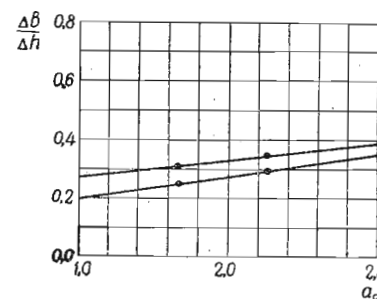


Рис. 60. Зависимость отношения  $\frac{\Delta b}{\Delta h}$  от  $a_0$  в квадратном калибре (нижняя кривая) и на гладкой бочке (верхняя кривая). Сталь ШХ15

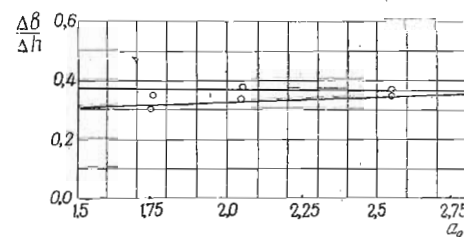


Рис. 61. Зависимость отношения  $\frac{\Delta b}{\Delta h}$  от  $a_0$  в квадратном калибре (нижняя кривая) и на гладкой бочке (верхняя кривая). Сталь ЭР

отношения осей  $a_0$ . На рис. 62 и 63 приведены кривые поправочного коэффициента уширения, построенные по данным завода (рис. 60, 61) и по номограмме (рис. 59). Учитывая точность

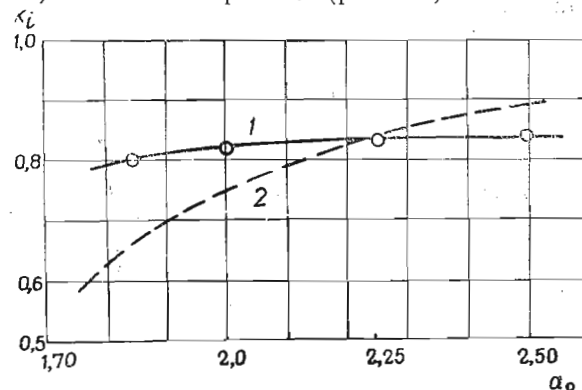


Рис. 62. Зависимость поправочного коэффициента уширения от отношения осей полосы при прокатке ее в квадратных калибрах:  
1 — по данным практики при прокатке стали ШХ15;  
2 — по номограмме (рис. 59)

расчета уширения, составляющую, как уже упоминалось,  $\pm 10\%$ , приходим к выводу, что порядок величин поправочного коэффициента уширения по данным завода и лабораторного эксперимента примерно одинаков.

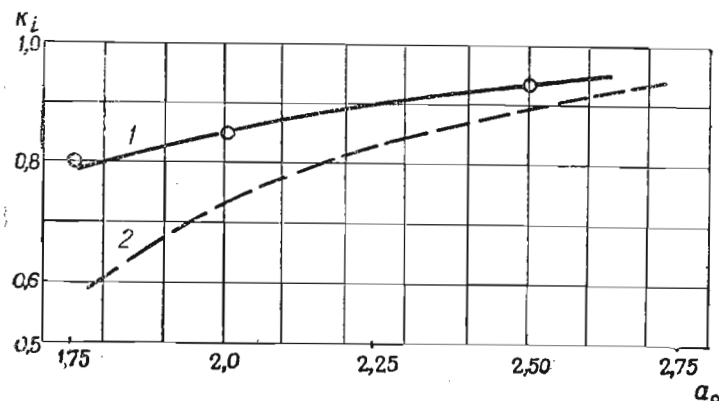


Рис. 63. Зависимость поправочного коэффициента уширения от отношения осей полосы при прокатке ее в квадратных калибрах:

1 — по данным практики при прокатке стали ЭР; 2 — по номограмме (рис. 60)

### § 5. Геометрические соотношения в овальном калибре

Для построения овальных калибров необходимо установить зависимости, связывающие отношение осей, площадь, радиус и высоту овала [6].

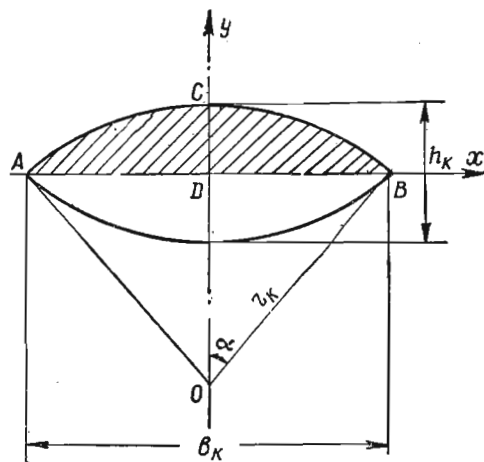


Рис. 64. Нормальный овал, образованный дугами круга

На рис. 64 приведен геометрически правильный овал, очерченный двумя дугами круга, и даны обозначения соответствующ-

щих линейных элементов калибра. Радиус овала  $r_K$ , ширина овала  $b_K$  и высота его  $h_K$  связаны следующей зависимостью:

$$r_K^2 = \left(\frac{b_K}{2}\right)^2 + \left(r_K - \frac{h_K}{2}\right)^2.$$

После простых преобразований получим:

$$\frac{r_K}{h_K} = \frac{\left(\frac{b_K}{h_K}\right)^2 + 1}{4}.$$

Обозначив отношение осей калибра

$$\frac{b_K}{h_K} = a_K,$$

окончательно имеем:

$$\frac{r_K}{h_K} = \frac{a_K^2 + 1}{4}. \quad (4-III)$$

Выведем теперь зависимость, связывающую площадь, высоту и отношение осей овала.

Как видно из рис. 64, площадь калибра:

$$\omega_K = 2 \text{ пл. } ACBD;$$

$$\begin{aligned} \text{пл. } ACBD &= \text{пл. } ACBO - \text{пл. } ADBO = 2 \cdot \frac{1}{2} r_K^2 \alpha - \\ &- \frac{1}{2} b_K \left(r_K - \frac{h_K}{2}\right) = r_K^2 \cdot \alpha - \frac{1}{2} b_K \left(r_K - \frac{h_K}{2}\right). \end{aligned}$$

Таким образом,

$$\omega_K = 2 \left[ r_K^2 \alpha - \frac{1}{2} b_K \left(r_K - \frac{h_K}{2}\right) \right].$$

После простых преобразований получим:

$$\frac{h_K^2}{\omega_K} = \frac{1}{2 \left( \frac{r_K}{h_K} \right)^2 \alpha - \frac{b_K}{h_K} \left( \frac{r_K}{h_K} - \frac{1}{2} \right)}. \quad (5-III)$$

Выразим все величины, входящие в правую часть этого равенства, через отношение осей.

Из рисунка:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\frac{1}{2} b_K}{r_K - \frac{1}{2} h_K} = \frac{\frac{b_K}{h_K}}{2 \frac{r_K}{h_K} - 1}.$$



Подставляя значение  $\frac{r_K}{h_K}$  по формуле (4—III) и  $\frac{b_K}{h_K} = a_K$ , получим:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{a_K}{\frac{a_K^2 + 1}{2} - 1} = \frac{2 a_K}{a_K^2 - 1},$$

откуда:

$$\alpha = \operatorname{arctg} \left( \frac{2 a_K}{a_K^2 - 1} \right). \quad (6\text{—III})$$

Подставляя в равенство (5—III) значения  $\frac{r_K}{h_K}$  и  $\alpha$  по формулам (4—III), (6—III), получим:

$$\frac{h_K^2}{\omega_K} = \frac{1}{2 \left( \frac{a_K^2 + 1}{4} \right) \operatorname{arctg} \left( \frac{2 a_K}{a_K^2 - 1} \right) - a_K \left( \frac{a_K^2 + 1}{4} - \frac{1}{2} \right)};$$

после упрощений:

$$\frac{h_K^2}{\omega_K} = \frac{8}{(a_K^2 + 1) \operatorname{arctg} \left( \frac{2 a_K}{a_K^2 - 1} \right) - 2 a_K (a_K^2 - 1)}. \quad (7\text{—III})$$

По равенствам (4—III) и (7—III) построена номограмма, выражающая зависимость отношений  $\frac{r_K}{h_K}$  и  $\frac{h_K^2}{\omega_K}$  от отношения осей овала  $a_K$  (рис. 65).

Эта номограмма позволяет определить все необходимые для построения овального калибра линейные элементы, если известна его площадь и отношение осей.

#### § 6. Зависимость между отношением осей овального калибра, отношением осей полосы и степенью заполнения

При степени заполнения калибра, равной единице, размеры овальной полосы равны размерам овального калибра. В этом случае все элементы, необходимые для построения калибра, т. е. линейные размеры его вертикальной оси, горизонтальной оси и радиус дуг овала, легко находятся по номограмме (рис. 65). Если калибр не заполнен металлом, то указанную номограмму для построения калибра уже применить нельзя, так как площадь поперечного сечения полосы и ее отношение осей меньше площади и отношения осей калибра, в котором прокатывается овальная полоса.

Поэтому, так же как и при прокатке в ромбических калибрах, необходимо установить зависимость между отношением осей полосы, отношением осей калибра и степенью его заполнения для построения калибра по известному отношению осей прокатываемой в нем полосы и выбранной степени заполнения.

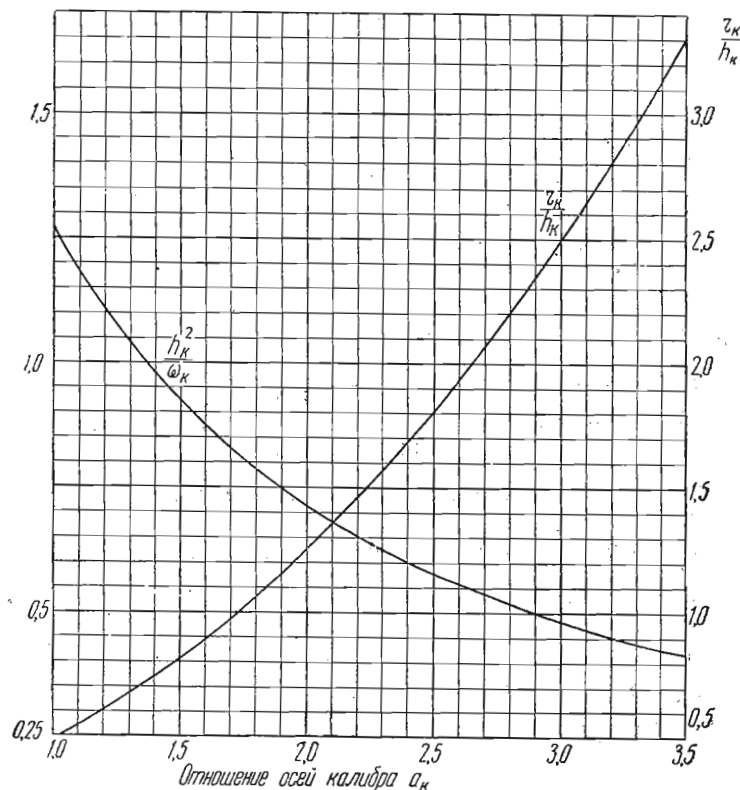


Рис. 65. Номограмма для определения линейных размеров овального калибра

Аналитическое решение такой задачи для овальных калибров получается весьма громоздким. Поэтому удобнее пользоваться более простым, хотя и приближенным графическим методом, при этом имея в виду, что вертикальная ось овального калибра и полосы, выходящей из него, равны между собой при любой степени заполнения.

Площади, соответствующие различным степеням заполнения калибра, фиксируются таким образом, чтобы они распределялись поровну справа и слева от вертикальной оси калибра.

Длина горизонтальной оси полосы, соответствующая различной степени заполнения калибра, определяется непосредственным измерением. Приближенность этого метода, помимо точности подсчета площадей и измерений, обуславливается еще и тем обстоятельством, что боковые кромки незаполненной овальной полосы рассматриваются как вертикальные, в то время как они могут быть выпуклыми или вогнутыми (рис. 66).

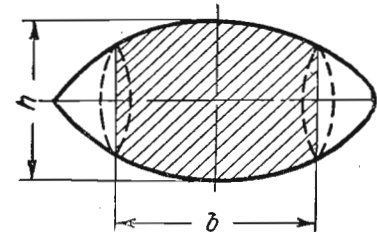


Рис. 66. Схема, поясняющая способ определения отношения осей в незаполненной овальной полосе

рис. 67. По этой номограмме, задавшись двумя величинами, можно определить третью величину.

#### § 7. Зависимость между радиусом закругления при вертикальной диагонали квадратного калибра и степенью его заполнения

В главе II (§ 3) были даны зависимости и номограмма, с помощью которых осуществляется построение ромбических калибров [см. равенства (2—II) — (6—II)], а также номограммы на рис. 28, 29, 30 и 31].

Указанными зависимостями можно пользоваться и в случае расчета размеров квадратного калибра, полагая в соответствующих равенствах отношение осей калибра и полосы равным единице. Но, учитывая простую геометрическую форму квадратного калибра, можно получить и особые, более точные, равенства специально для расчета квадратных калибров, не делая таких упрощенных предположений, какие были введены для случая ромбических калибров.

В частности, вместо зависимости (5—II), связывающей отношение  $\frac{r_k^2}{\omega_k}$  с отношением осей полосы и степенью заполнения, можно вывести более простую зависимость между отношением  $\frac{r_k}{c}$  и степенью заполнения калибра, исходя из следующих соображений.

Если квадратный калибр не заполнен металлом, то сечение полосы отличается от формы правильного квадрата, т. е. вертикальная диагональ полосы получается больше горизонтальной диагонали. Между тем при прокатке по системе овал — квадрат

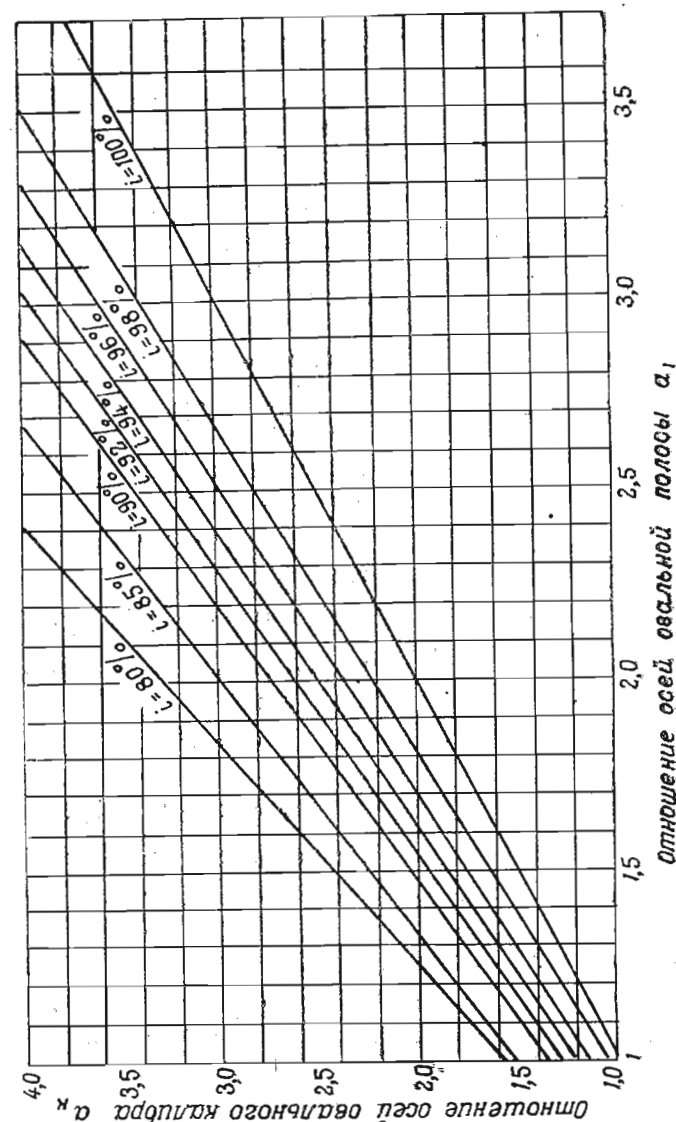


Рис. 67. Зависимость отношения осей овальной полосы от отношения осей овального калибра при различной степени заполнения

необходимо в овальный калибр задавать полосу правильного квадратного сечения. Поэтому углы при вертикальной диагонали калибра закругляются.

Если площадь, теряемая вследствие закругления углов калибра при вертикальной диагонали калибра, равна площади, соответствующей незаполненным частям калибра при горизонтальной диагонали калибра, то сечение прокатываемой полосы имеет форму правильного квадрата с закругленными углами.

Таким образом, задача сводится к тому, чтобы найти соотношение между радиусом закругления, площадью, теряемой в закруглениях калибра, и степенью заполнения.

Рассмотрим рис. 68, на котором изображено поперечное сечение полосы и калибра с закруглением углов радиусом  $r_k$ . Площадь одного закругления равна:

$$\omega_x = \text{пл. } cdlo - \text{пл. } clo = \\ = r_k^2 - \frac{1}{4} \pi r_k^2 = \left(1 - \frac{\pi}{4}\right) r_k^2 \approx 0,215 r_k^2.$$

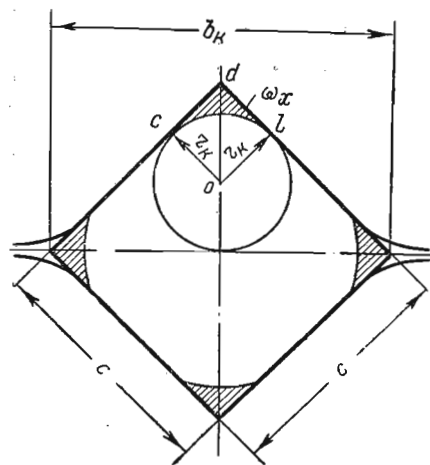


Рис. 68. Схема, поясняющая вывод зависимости между степенью заполнения  $i$  и отношением  $\frac{r_k}{c}$  квадратного калибра

Площадь поперечного сечения полосы:

$$\omega = c^2 - 4 \omega_x$$

или

$$\omega = c^2 - 0,86 r_k^2.$$

Площадь поперечного сечения калибра:

$$\omega_k = c^2 - 2 \omega_x$$

или

$$\omega_k = c^2 - 0,43 r_k^2.$$

Степень заполнения калибра:

$$i = \frac{\omega}{\omega_k},$$

или

$$i = \frac{c^2 - 0,86 r_k^2}{c^2 - 0,43 r_k^2}.$$

Поделив числитель и знаменатель правой части на величину  $c^2$ , получим:

$$i = \frac{1 - 0,86 \left(\frac{r_k}{c}\right)^2}{1 - 0,43 \left(\frac{r_k}{c}\right)^2}.$$

После простых преобразований будем иметь:

$$\frac{r_k}{c} = \sqrt{\frac{1-i}{0,86-0,43 i}}. \quad (8-III)$$

По этому равенству построена номограмма (рис. 69), с помощью которой можно определить по заданной степени заполнения радиус закругления  $r_k$ .

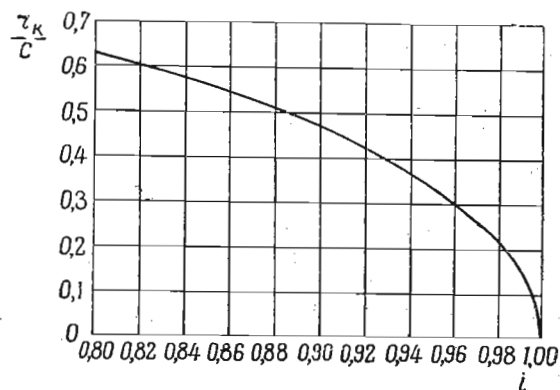


Рис. 69. Номограмма для определения отношения  $\frac{r_k}{c}$  в квадратном калибре

ПРИМЕР 9. Площадь поперечного сечения полосы, выходящей из квадратного калибра, равна  $200 \text{ мм}^2$ . Степень заполнения калибра  $i = 0,98$ . Требуется определить радиус закругления при вертикальной диагонали калибра.

По номограмме (рис. 69) при  $i = 0,98$  отношение радиуса закругления калибра к стороне  $c$  равно:

$$\frac{r_k}{c} = 0,213.$$

Площадь калибра:

$$\omega_k = \frac{\omega}{i} = \frac{200}{0,98} = 204 \text{ мм}^2.$$

Сторона калибра:

$$c = \sqrt{\frac{\omega_k}{i}} = \sqrt{\frac{204}{0,98}} = 14,40 \text{ мм}.$$

Радиус закругления калибра:

$$r_k = 0,213 c = 0,213 \cdot 14,40 = 3 \text{ мм}.$$

Для того, чтобы дать понятие о степени точности приближенного равенства (5—II) и номограммы (рис. 31), построенной по этому равенству для случая прокатки в ромбическом калибре, произведем параллельный расчет.

По номограмме (рис. 31) при  $i = 0,98$  и  $a_k = 1,1$  отношение

$$\frac{r_K^2}{\omega_K} = 0,04,$$

откуда:

$$r_k = \sqrt{0,04 \omega_k} = \sqrt{0,04 \cdot 204} = 2,9 \text{ мм.}$$

## § 8. Расчет овальных калибров

Пусть квадратная полоса прокатывается в овальном калибре. Пересчитаем полученную овальную полосу на соответственную ей прямоугольную и сравним ее уширение с уширением прямоугольной полосы, прокатанной на гладкой бочке из квадратной полосы тех же размеров, что и овальная, на высоту, равную высоте соответственной овальной полосы. Уширение соответственной овальной полосы окажется меньше. уширения прямоугольной полосы, что можно учесть поправочным коэффициентом уширения  $k_i$ . Отсюда вытекает метод расчета овальных калибров. Очевидно, что для расчета уширения в овальных калибрах необходимо воспользоваться формулами (27—I); (29—I); (30—I) и (32—I). Эти формулы для случая прокатки квадратных полос в овальных калибрах упрощаются потому что для квадратных сечений

$$h_{0c} = b_{0c} = h_0 = b_0$$

M

$$h_{1c} = b_{1c} = h_1 = b_1,$$

где  $h_0=b_0$  — высота и ширина квадратного сечения до пропуска;

$h_1=b_1$  —        „     „     „                      „                      „     после     „

Указанные соотношения легко получить из формул (9—I) и (11—I) гл. I, если предположить, что в них  $a_0 = 1$  или  $a_1 = 1$ .

При расчете овальных калибров возможны два случая.

1. По размерам данной квадратной полосы (большого сечения) рассчитать следующую овальную (меньшего сечения). В этом случае равенства (27—I) и (30—I) для расчета деформации приобретают такой вид:

а) на гладкой бочке:

$$\Delta h = \frac{(a_1 - 1) h_0}{a_1 + \frac{\Delta b}{\Delta h}};$$

б) в овальном калибре:

$$\Delta h_c = \frac{(a_1 - 1)h_0}{a_1 + \frac{\Delta b_c}{\Delta h_c}},$$

В этих равенствах:

$$h_0 = b_0.$$

2. По размерам данной квадратной полосы (меньшего сечения) рассчитать предыдущую овальную (большого сечения).

При этом равенства (29—I) и (32—I) для расчета деформации приобретают такой вид:

а) на гладкой бочке:

$$\Delta h = \frac{(a_0 - 1) h_1}{1 + a_0 \frac{\Delta b}{\Delta h}};$$

б) в квадратном калибре:

$$\Delta h_c = \frac{(a_0 - 1) h_1}{1 + a_0 \frac{\Delta b_c}{\Delta h_c}}.$$

В этих равенствах:

$$h_1 = b_1.$$

ПРИМЕР 10. Рассчитать овалный калибр по следующим данным: сторона поступающей в калибр квадратной полосы  $h_0 = b_0 = 30$  мм; отношение осей выходящей из калибра овалной полосы  $a_1 = 2$ ; степень заполнения овалного калибра  $i = 0,98$ ; начальный диаметр валков  $D = 300$  мм; коэффициент трения при прокатке  $\mu = 0,3$ .

1. Сначала рассчитаем деформацию полосы размерами  $h_0 = b_0 = 30$  мм при условии, что она прокатывается на гладкой бочке.

Предварительно задаемся коэффициентом уширения  $\frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,5$ .

Тогда по равенству (27—I) обжатие

$$\Delta h = \frac{(a_1 - 1) h_0}{a_1 + \frac{\Delta b}{\Delta h}} = \frac{(2 - 1) 30}{2 + 0,5} = 12 \text{ мм.}$$

Высота полосы после прокатки

$$h_1 = h_0 - \Delta h = 30 - 12 = 18 \text{ мм.}$$

Рабочий диаметр валков

$$D_p = D - h_1 = 300 - 18 = 282 \text{ мм.}$$

Отношения:

$$\frac{D_p}{h_0} = \frac{282}{30} = 9,4; \quad \frac{\Delta h}{h_0} = 0,4.$$

По номограмме (рис. 14):

$$\frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,74.$$

Таким образом, предварительный расчет деформации полосы при прокатке в овальных калибрах ничем не отличается от приведенного выше расчета деформации полосы тех же исходных размеров на гладкой бочке.

2. Находим поправочный коэффициент уширения. По номограмме (рис. 46) при степени заполнения овального калибра  $i = 0,98$  и отношении осей полосы  $a_1 = 2$  поправочный коэффициент уширения

$$k_i = 0,48.$$

3. Определим коэффициент уширения при прокатке в калибре:

$$\frac{\Delta b_c}{\Delta h_c} = k_i \frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,48 \cdot 0,74 = 0,355.$$

4. Рассчитываем деформацию при прокатке в калибре.

По равенству (30—I) обжатие соответственной полосы:

$$\Delta h_c = \frac{(a_1 - 1) h_0}{a_1 + \frac{\Delta b_c}{\Delta h_c}} = \frac{(2 - 1) 30}{2 + 0,355} = 12,75 \text{ мм.}$$

Высота соответственной полосы после прокатки:

$$h_{1c} = h_0 - \Delta h_c = 30 - 12,75 = 17,25 \text{ мм.}$$

Ширина соответственной полосы после прокатки:

$$b_{1c} = a_1 h_{1c} = 2 \cdot 17,25 = 34,5 \text{ мм.}$$

Площадь поперечного сечения овальной полосы:

$$\omega_1 = h_{1c} b_{1c} = 17,25 \cdot 34,5 = 595 \text{ мм}^2.$$

Коэффициенты деформации овальной полосы:

$$\frac{1}{\eta} = \frac{h_0}{h_{1c}} = \frac{30}{17,25} = 1,740;$$

$$\beta = \frac{b_{1c}}{b_0} = \frac{34,5}{30} = 1,150;$$

$$\lambda = \frac{1}{\eta \beta} = \frac{1,740}{1,150} = 1,515.$$

5. Определим размеры калибра.

Площадь овального калибра:

$$\omega_k = \frac{\omega_1}{i} = \frac{595}{0,98} = 608 \text{ мм}^2.$$

По номограмме (рис. 67) при отношении осей полосы  $a_1 = 2$  и степени заполнения  $i = 0,98$  отношение осей калибра

$$a_k = 2,21.$$

По номограмме (рис. 65) при отношении осей калибра  $a_k = 2,21$  имеем:

$$\frac{h_k^2}{\omega_k} = 0,64 \quad \text{и} \quad \frac{r_k}{h_k} = 1,46.$$

Отсюда высота, ширина и радиусы дуг овального калибра:

$$h_k = \sqrt{0,64 \omega_k} = \sqrt{0,64 \cdot 608} = 19,7 \text{ мм};$$

$$b_k = a_k h_k = 2,21 \cdot 19,7 = 43,6 \text{ мм};$$

$$r_k = 1,46 h_k = 1,46 \cdot 19,7 = 24,4 \text{ мм.}$$

ПРИМЕР 11. Рассчитать овальный калибр по следующим данным: сторона полосы, выходящей из квадратного калибра, следующего за овальным равна  $h_1 = b_1 = 20 \text{ мм}$ ; отношение осей овальной полосы  $a_0 = 2$ ; степень заполнения овального калибра  $i = 0,98$ ; начальный диаметр валков  $D = 300 \text{ мм}$ ; коэффициент трения при прокатке  $\mu = 0,3$ .

1. Рассчитываем деформацию полосы размерами  $h_1 = b_1 = 20 \text{ мм}$  при условии, что она прокатывается на гладкой бочке.

Предварительно задаемся  $\frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,5$ , тогда по равенству (29—I):

$$\Delta h = \frac{(a_0 - 1) h_1}{1 + a_0 \frac{\Delta b}{\Delta h}} = \frac{(2 - 1) 20}{1 + 2 \cdot 0,5} = 10 \text{ мм.}$$

Высота полосы до прокатки:

$$h_0 = h_1 + \Delta h = 20 + 10,0 = 30,0 \text{ мм.}$$

Рабочий диаметр равен:

$$D_p = D - h_1 = 300 - 20 = 280 \text{ мм.}$$

Отношения:

$$\frac{D_p}{h_0} = \frac{280}{30,0} = 9,3; \quad \frac{\Delta h}{h_0} = \frac{10,0}{30,0} = 0,33; \quad \frac{b_0}{h_0} = \frac{1}{a_0} = 0,5.$$

По номограмме (рис. 14):

$$\frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,34.$$

2. Находим поправочный коэффициент уширения.

По номограмме (рис. 59) при отношении осей полосы  $a_0 = 2$  поправочный коэффициент уширения равен:

$$k_i = 0,74.$$

3. Определяем коэффициент уширения при прокатке в квадратном калибре:

$$\frac{\Delta b_c}{\Delta h_c} = k_i \frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,74 \cdot 0,34 = 0,25.$$

4. Рассчитываем деформацию полосы при прокатке в калибре.

По равенству (32—I):

$$\Delta h_c = \frac{(a_0 - 1) h_1}{1 + a_0 \frac{\Delta b_c}{\Delta h_c}} = \frac{(2 - 1) 20}{1 + 2 \cdot 0,25} = 13,4 \text{ мм.}$$

Высота соответственной полосы до прокатки:

$$h_{0c} = h_1 + \Delta h_c = 20 + 13,4 = 33,4 \text{ мм.}$$

Ширина соответственной полосы:

$$b_{0c} = \frac{h_{0c}}{a_0} = \frac{33,4}{2} = 16,7 \text{ мм.}$$

Коэффициенты деформации полосы:

$$\frac{1}{\eta} = \frac{h_{0c}}{h_1} = \frac{33,4}{20} = 1,67;$$

$$\beta = \frac{b_{1c}}{b_{0c}} = \frac{20}{16,7} = 1,20;$$

$$\lambda = \frac{1}{\eta \beta} = \frac{1,67}{1,20} = 1,39.$$

Площадь поперечного сечения овальной полосы до прокатки равна:

$$\omega_0 = \omega_{0c} = h_{0c} b_{0c} = 33,4 \cdot 16,7 = 558,0 \text{ мм}^2.$$

5. Определяем размеры калибра.

Площадь овального калибра:

$$\omega_k = \frac{\omega_0}{i} = \frac{558,0}{0,98} = 569,0 \text{ мм}^2.$$

По номограмме (рис. 67) при отношении  $a_0 = 2$  и  $i = 0,98$   $a_k = 2,21$ .

По номограмме (рис. 65) при  $a_k = 2,21$  находим:

$$\frac{h_k^2}{\omega_k} = 0,64 \text{ и } \frac{r_k}{h_k} = 1,46.$$

Таким образом:

$$h_k = \sqrt{0,64 \omega_k} = \sqrt{0,64 \cdot 569,0} = 19,1 \text{ мм};$$

$$b_k = a_k h_k = 2,21 \cdot 19,1 = 42,2 \text{ мм};$$

$$r_k = 1,46 h_k = 1,46 \cdot 19,1 = 28,8 \text{ мм.}$$

## § 9. Расчет квадратных калибров

Пусть из овальной полосы прокатывается квадратная полоса. Если размеры полос пересчитаны на соответственные, то, очевидно, нужно рассчитать уширение соответственной прямоугольной полосы, прокатываемой в квадратную полосу на гладкой бочке. Уширение в калибре меньше уширения полосы на гладкой бочке. Это можно учесть поправочным коэффициентом уширения  $k_i$ .

Отсюда следует, что деформации в квадратных калибрах нужно рассчитывать по формулам (27—I); (30—I); (29—I) и (32—I).

Проще рассчитывать не диагонали, а сразу сторону квадратной полосы.

При расчете квадратных калибров возможны два случая:

1. По размерам данной овальной полосы (большого сечения) рассчитать следующую квадратную (меньшего сечения). В этом случае при условии, что для квадратной полосы  $a_1 = 1$ , равенства (27—I) и (30—I) для расчета деформации полосы приобретают следующий вид:

а) на гладкой бочке:

$$\Delta h = \frac{h_0 - b_0}{1 + \frac{\Delta b}{\Delta h}},$$

где  $h_0 = h_{0c}$  и  $b = b_{0c}$ :

б) в квадратном калибре:

$$\Delta h_c = \frac{h_{0c} - b_{0c}}{1 + \frac{\Delta b_c}{\Delta h_c}}.$$

2. По размерам данной овальной полосы (меньшего сечения) рассчитать предшествующую квадратную (большого сечения). В этом случае равенства (29—I) и (32—I) для расчета деформации полосы приобретают следующий вид:

а) на гладкой бочке:

$$\Delta h = \frac{b_1 - h_1}{1 + \frac{\Delta b}{\Delta h}},$$

где  $b_1 = b_{1c}$  и  $h_1 = h_{1c}$ .

б) в калибре:

$$\Delta h_c = \frac{b_{1c} - h_{1c}}{1 + \frac{\Delta b_c}{\Delta h_c}}.$$

ПРИМЕР 12. Рассчитать квадратный калибр, следующий за рассчитанным в примере 10 овальным калибром. Степень заполнения квадратного калибра  $i = 0,98$ . Коэффициент трения при прокатке  $\mu = 0,3$ . Начальный диаметр валков  $D = 300$  мм.

1. Рассчитываем деформацию полосы размерами  $b_0 = 17,25$  мм и  $h_0 = 34,5$  мм, при условии, что она прокатывается на гладкой бочке.

Предварительно примем  $\frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,5$ .

По равенству (30—I):

$$\Delta h = \frac{h_0 - b_0}{1 + \frac{\Delta b}{\Delta h}} = \frac{34,5 - 17,25}{1 + 0,5} = 10,87 \text{ мм.}$$

Высота полосы после прокатки равна:

$$h_1 = h_0 - \Delta h = 34,5 - 10,87 = 23,63 \text{ мм.}$$

Рабочий диаметр валков:

$$D_p = D - h_1 = 300 - 23,63 \approx 276 \text{ мм;}$$

$$\frac{D_p}{h_0} = \frac{276}{34,5} = 8,0; \quad \frac{\Delta h}{h_0} = \frac{10,87}{34,5} = 0,315; \quad \frac{b_0}{h_0} = \frac{17,25}{34,5} = 0,5.$$

По номограмме (рис. 14) имеем:

$$\frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,33.$$

2. Определяем поправочный коэффициент уширения. По номограмме (рис. 59) при отношении осей полосы  $a_0 = 2$  поправочный коэффициент уширения равен:

$$k_i = 0,74.$$

3. Определяем коэффициент уширения при прокатке в калибре:

$$\frac{\Delta b_c}{\Delta h_c} = k_i \frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,74 \cdot 0,33 = 0,244.$$

4. Рассчитываем деформацию полосы при прокатке в калибре. По равенству (30—I) имеем:

$$\Delta h_c = \frac{h_{0c} - b_{0c}}{1 + \frac{\Delta b_c}{\Delta h_c}} = \frac{34,5 - 17,25}{1 + 0,244} = 13,3 \text{ мм.}$$

Высота и ширина полосы после прокатки равны:

$$h_{1c} = b_{1c} = h_1 = b_1 = h_{0c} - \Delta h_c = 34,5 - 13,3 = 21,2 \text{ мм.}$$

Коэффициенты деформации полосы:

$$\frac{1}{\eta} = \frac{h_{0c}}{h_1} = \frac{34,5}{21,2} = 1,627;$$

$$\beta = \frac{b_1}{b_{0c}} = \frac{21,2}{17,25} = 1,229;$$

$$\lambda = \frac{1}{\eta\beta} = \frac{1,627}{1,229} = 1,323.$$

Площадь поперечного сечения квадратной полосы равна:

$$\omega_1 = h_1 b_1 = 21,2 \cdot 21,2 = 450 \text{ мм}^2.$$

5. Определяем размеры калибра.

Площадь калибра равна:

$$\omega_k = \frac{\omega_1}{i} = \frac{450}{0,98} = 459 \text{ мм}^2.$$

Сторона квадратного калибра равна:

$$c = \sqrt{\frac{\omega_k}{i}} = \sqrt{\frac{459}{0,98}} = 21,60 \text{ мм.}$$

По номограмме (рис. 96) при  $i = 0,98$

$$\frac{r_k}{c} = 0,213.$$

Радиус закруглений  $r_k$  при вертикальной диагонали калибра равен:

$$r_k = 0,213 c = 0,213 \cdot 21,60 = 4,60 \text{ мм.}$$

ПРИМЕР 13. Рассчитать квадратный калибр, предшествующий рассчитанному в примере 10 овальному калибру. Степень заполнения квадратного калибра  $i = 0,98$ . Начальный диаметр валков 300 мм. Коэффициент трения  $\mu = 0,3$ .

1. Рассчитываем деформацию полосы размерами  $h_1 = 34,5$  мм и  $b = 17,25$  мм при условии, что она прокатывается на гладкой бочке.

Предварительно принимаем  $\frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,7$ .

По равенству (32—I):

$$\Delta h = \frac{b_1 - h_1}{1 + \frac{\Delta b}{\Delta h}} = \frac{34,5 - 17,25}{1 + 0,7} = 8,90 \text{ мм.}$$



Отсюда высота полосы до прокатки:

$$h_0 = h_1 + \Delta h = 17,25 + 8,90 = 26,15 \text{ мм};$$

$$\frac{\Delta h}{h_0} = \frac{8,90}{26,15} = 0,342;$$

$$D_p = D - h_1 = 300 - 17,25 \approx 283 \text{ мм};$$

$$\frac{D_p}{h_0} = \frac{283}{26,15} = 10,8; \quad \frac{b_0}{h_0} = 1.$$

По номограмме (рис. 14) находим, что  $\frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,78$ .

2. Находим поправочный коэффициент уширения по номограмме (рис. 46) при  $a_1 = 2$  и степени заполнения  $i = 0,98$ :

$$k_i = 0,48.$$

3. Определяем коэффициент уширения при прокатке в калибре:

$$\frac{\Delta b_c}{\Delta h_c} = k_i \frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,48 \cdot 0,78 = 0,375.$$

4. Рассчитываем деформацию при прокатке в калибре:

$$\Delta h_c = \frac{b_{1c} - h_{1c}}{1 + \frac{\Delta b_c}{\Delta h_c}} = \frac{34,5 - 17,25}{1 + 0,375} = 12,75 \text{ мм};$$

$$h_{0c} = b_{0c} = h_0 = b_0 = h_{1c} + \Delta h_c = 17,25 + 12,75 = 30,0 \text{ мм}.$$

Площадь квадратной полосы равна:

$$\omega_0 = h_0 b_0 = 30,0 \cdot 30,0 = 900 \text{ мм}^2.$$

5. Определяем размеры калибра.

Площадь квадратного калибра:

$$\omega_k = \frac{\omega_0}{i} = \frac{900}{0,98} = 919 \text{ мм}^2.$$

Сторона квадратного калибра:

$$c = \sqrt{\frac{\omega_k}{i}} = \sqrt{\frac{919}{0,98}} = 36,0 \text{ мм}.$$

По номограмме (рис. 69) при  $i = 0,98$  имеем:

$$\frac{r_k}{c} = 0,213.$$

Радиус закруглений  $r_k$  при вертикальной диагонали калибра равен:

$$r_k = 0,213 \cdot 30,6 = 6,5 \text{ мм}.$$

## § 10. Предельное отношение осей овальных калибров

Отношение осей овального калибра определяет собой величину обжатия и уширения прокатываемой в нем квадратной полосы п, следовательно, — величину вытяжки. Чем больше вытяжка в каждом данном проходе, тем меньше число проходов, необходимое для получения заданного профиля, тем выше производительность стана и лучше все технико-экономические показатели его работы. Поэтому правильный выбор отношения осей овального калибра является одной из основных задач калибровки системы овал — квадрат.

При малом отношении осей овальных калибров вытяжка в них очень невелика, несмотря на то, что вследствие сильного стесняющего действия таких калибров уширение небольшое.

При слишком большом отношении осей овальных калибров углы захвата могут превысить допустимые величины, тогда и процесс прокатки осуществляться не будет из-за отсутствия захвата металла валками.

Предельное отношение осей овальной полосы получим в том случае, когда степень заполнения примем равной ее предельно допустимой величине. Предельно возможная степень заполнения калибра  $i = 1,0$ . При этой степени заполнения вытяжка имеет максимально возможную величину для калибра с данным отношением осей. Однако опасность переполнения и связанные с ним дефекты не позволяют практически осуществлять такое заполнение калибра. Чем совершеннее оборудование, технологический процесс и метод управления последним, тем больше по величине допустимая степень заполнения. На основании анализа существующих калибровок в качестве предельно допустимой степени заполнения для современных высокопроизводительных станов можно принять величину

$$i = 0,98.$$

Следует заметить, что на практике степени заполнения калибров не придают должного значения. Размеры овалов часто выбирают так, что они оказываются слишком большими для предшествующих квадратов. Этим устраняют опасность переполнения калибров, но одновременно уменьшают и вытяжку в них, что снижает производительность стана. На это обстоятельство указывал еще в 1936 г. А. Ф. Головин [6].

Перейдем теперь к определению предельного отношения осей овальных калибров, исходя из предельных условий захвата полосы валками.

Выведем необходимые для этого соотношения.

Когда известны размеры предшествующего квадратного сечения, размеры полосы после прокатки на гладкой бочке опре-

деляются из соотношения (27—I), которое для данного случая можно записать так:

$$\frac{\Delta h}{h_0} = \frac{a-1}{a + \frac{\Delta b}{\Delta h}} \quad (9-III)$$

Известно, что:

$$\frac{\Delta h}{D_p} = 1 - \cos \alpha.$$

Поделим обе части этого равенства на  $h_0$ , решим его совместно с уравнением (9—III):

$$\frac{D_p}{h_0} = \frac{1}{1 - \cos \alpha} \cdot \frac{\Delta h}{h_0} \quad (10-III)$$

На основании равенства (30—I) обжатие при прокатке в овальных калибрах определяется выражением:

$$\left(\frac{\Delta h_c}{h_0}\right)_{об} = \frac{a-1}{a + \left(\frac{\Delta b_c}{\Delta h_c}\right)_{об}} \quad (11-III)$$

где

$$\left(\frac{\Delta b_c}{\Delta h_c}\right)_{об} = k_i \frac{\Delta b}{\Delta h};$$

$\left(\frac{\Delta b_c}{\Delta h_c}\right)_{об}$  — коэффициент уширения в овальном калибре.

Далее

$$\Delta h_{c. об} = (1 - \cos \alpha_{об}) (D - h_1),$$

или

$$\Delta h_{c. об} = (1 - \cos \alpha_{об}) [D - (h_0 - \Delta h_c)].$$

Отсюда:

$$\Delta h_{c. об} = \frac{1 - \cos \alpha_{об}}{\cos \alpha_{об}} (D - h_0), \quad (12-III)$$

или

$$\left(\frac{\Delta h_c}{h_0}\right)_{об} = \frac{1 - \cos \alpha_{об}}{\cos \alpha_{об}} \left(\frac{D}{h_0} - 1\right),$$

откуда:

$$\frac{h_0}{D} = \frac{1}{1 + \frac{\cos \alpha_{об}}{1 - \cos \alpha_{об}} \left(\frac{\Delta h_c}{h_0}\right)_{об}} \quad (13-III)$$

где  $\cos \alpha_{об}$  — угол захвата в овальном калибре.

Равенства (9—III) — (13—III) дают возможность определить величину  $\frac{h_0}{D}$  при прокатке квадратной полосы в овальном калибре, если задано отношение осей овальной полосы и угол захвата.

ПРИМЕР 14. Определить отношение высоты исходной квадратной заготовки к начальному диаметру валков, если отношение осей овальной полосы  $a=2,0$  и угол захвата  $\alpha=26^\circ$ . Степень заполнения овального калибра  $i=0,98$ . Коэффициент трения при прокатке  $\mu=0,3$ .

Предварительно задаемся отношением  $\frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,5$ . По равенству (9—III) находим, что

$$\frac{\Delta h}{h_0} = \frac{a-1}{a + \frac{\Delta b}{\Delta h}} = \frac{2-1}{2+0,5} = 0,4.$$

По равенству (10—III) имеем:

$$\frac{D_p}{h_0} = \frac{1}{1 - \cos 26^\circ} \frac{\Delta h}{h_0} = \frac{0,4}{1 - 0,9} = 4.$$

По номограмме (рис. 14) при  $\frac{\Delta h}{h_0} = 0,4$ ,  $\frac{D_p}{h_0} = 4,0$  находим;

$$\frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,4.$$

По номограмме (рис. 46) при  $a=2$  и  $i=0,98$  находим:

$$k_i = 0,48.$$

Коэффициент уширения в овальном калибре:

$$\left(\frac{\Delta b_c}{\Delta h_c}\right)_{об} = k_i \frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,48 \cdot 0,4 = 0,192.$$

По равенству (11—III) при  $a=2$  и  $\left(\frac{\Delta b_c}{\Delta h_c}\right)_{об} = 0,192$  находим, что

$$\left(\frac{\Delta h_c}{h_0}\right)_{об} = \frac{a-1}{a + \left(\frac{\Delta b_c}{\Delta h_c}\right)_{об}} = \frac{2-1}{2+0,192} = 0,46.$$

По равенству (13—III) при  $\left(\frac{\Delta h_c}{h_0}\right)_{об} = 0,46$  и  $\cos 26^\circ = 0,90$  находим, что:

$$\frac{h_0}{D} = \frac{1}{1 + \frac{0,90}{1-0,90} \cdot 0,46} = 0,196.$$

Таким образом, углу захвата  $\alpha = 26^\circ$  и отношению осей овальной полосы  $a = 2$  соответствует отношение высоты задаваемого в калибр квадратного сечения к начальному диаметру валков  $\frac{h_0}{D} = 0,196$ .

Иначе: углу захвата  $\alpha = 26^\circ$  и отношению  $\frac{h_0}{D} = 0,196$  соответствует отношение осей овального калибра  $a = 2$ . Если угол захвата рассматривать как предельный, то при  $\frac{h_0}{D} = 0,196$  предельное отношение осей полосы  $a = 2$ . При значениях  $a \leq 2$  захват полосы валками будет осуществляться беспрепятственно. При  $a > 2$  захват полосы, для которой  $\frac{h_0}{D} = 0,196$ , уже невозможен.

Вычисления, аналогичные приведенным выше, произведены для различного отношения осей полосы  $a$  при углах захвата, равных 26, 28, 30 и  $32^\circ$ , и затем построены кривые (рис. 70).

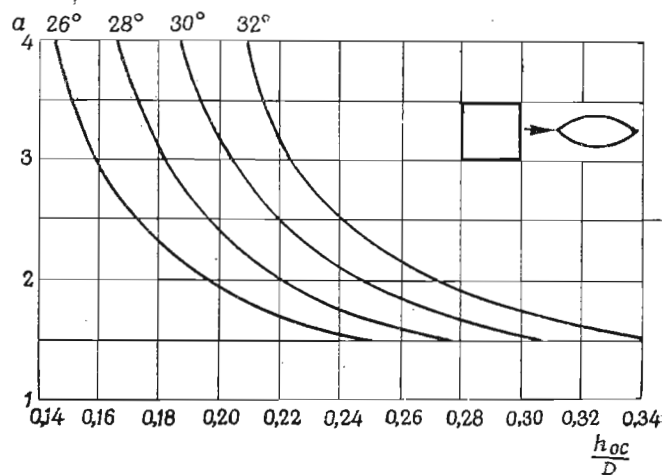


Рис. 70. Зависимость предельного отношения осей овальной полосы при прокатке квадратной полосы в овальном калибре от отношения высоты исходного квадратного сечения к диаметру валков при различных углах захвата

Возьмем теперь следующие два очевидные соотношения:

$$\left(\frac{\Delta h_c}{h_{1c}}\right)_{\text{ов}} = \frac{1}{\eta} - 1$$

и

$$\left(\frac{\Delta h_c}{h_{0c}}\right)_{\text{ов}} = 1 - \eta.$$

После их совместного решения получим следующую зависимость:

$$\left(\frac{\Delta h_c}{h_{1c}}\right)_{\text{ов}} = \frac{\left(\frac{\Delta h_c}{h_{0c}}\right)_{\text{ов}}}{1 - \left(\frac{\Delta h_c}{h_{0c}}\right)_{\text{ов}}}. \quad (14-III)$$

Но

$$\left(\frac{\Delta h_c}{h_{1c}}\right)_{\text{ов}} = \left(\frac{D}{h_1} - 1\right) (1 - \cos \alpha).$$

Отсюда после простых преобразований получим:

$$\frac{h_{1c}}{D} = \frac{1}{1 + \frac{1}{1 - \cos \alpha} \left(\frac{\Delta h_c}{h_{1c}}\right)_{\text{ов}}}. \quad (15-III)$$

Если принять угол захвата в овальном калибре равным его предельному значению, то по равенствам (14—III) и (15—III) можно определить отношение высоты сечения, выходящего из овального калибра, к диаметру валков при прокатке квадратной полосы в овальном калибре.

**ПРИМЕР 15.** Определить отношения высоты полосы, выходящей из овального калибра, к диаметру валков, если отношение осей овальной полосы  $a = 2,0$  и угол захвата  $\alpha = 26^\circ$ . Степень заполнения овального калибра  $i = 0,98$ . Коэффициент трения при прокатке  $\mu = 0,3$ .

Согласно примеру 14 имеем:

$$\left(\frac{\Delta h_c}{h_{0c}}\right)_{\text{ов}} = 0,46.$$

По формуле (14—III) получаем:

$$\left(\frac{\Delta h_c}{h_{1c}}\right)_{\text{ов}} = \frac{\left(\frac{\Delta h_c}{h_{0c}}\right)_{\text{ов}}}{1 - \left(\frac{\Delta h_c}{h_{0c}}\right)_{\text{ов}}} = \frac{0,46}{1 - 0,46} = 0,85.$$

По равенству (15—III) имеем:

$$\frac{h_{1c}}{D} = \frac{1}{1 + \frac{1}{1 - \cos \alpha_{\text{ов}}} \left(\frac{\Delta h_c}{h_{1c}}\right)_{\text{ов}}} = \frac{1}{1 + \frac{0,85}{1 - 0,9}} = 0,106.$$

Аналогичные вычисления произведены для различного отношения осей полосы  $a$  при углах захвата, равных 26, 28, 30 и  $32^\circ$ , и затем построены кривые (рис. 71).

Полоса, выходящая из овального калибра, кантуется на  $90^\circ$  и затем прокатывается в квадратном калибре. Обжатие здесь также лимитируется углом захвата. Поэтому определим предель-

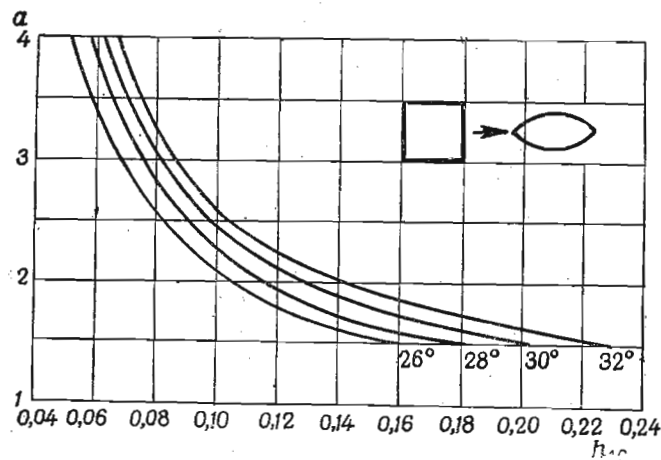


Рис. 71. Зависимость предельного отношения осей овальной полосы при прокатке квадратной полосы в овальном калибре от отношения высоты овальной полосы к диаметру валков при различных углах захвата

ное отношение осей овальной полосы при прокатке ее в квадратном калибре. Пусть известны соответственные размеры овальной полосы  $h_{0c.n}$  и  $b_{0c.n}$ . Для того чтобы рассчитать деформацию ее в последующем квадратном калибре, производим сначала расчет в предположении, что прямоугольная полоса размерами  $h_0 = b_{0c.n}$ ,  $b_0 = h_{0c.n}$  прокатывается на гладкой бочке (рис. 72).

По равенству (27—I):

$$\Delta h = \frac{a_1 h_0 - b_0}{a_1 + \frac{\Delta b}{\Delta h}}$$

Принимая во внимание, что

$$a_1 = 1 \quad \text{и} \quad b_0 = \frac{h_0}{a_0},$$

и полагая для упрощения обозначений  $a_0 = a$ , преобразуем это равенство:

$$\frac{\Delta h}{h_0} = \frac{a - 1}{a \left( 1 + \frac{\Delta b}{\Delta h} \right)}. \quad (16\text{—III})$$

На основании равенства (30—I) по аналогии с (16—III) обжатие при прокатке в квадратном калибре определяется по равенству:

$$\left( \frac{\Delta h_c}{h_{0c}} \right)_{KB} = \frac{a - 1}{a \left[ 1 + \left( \frac{\Delta b_c}{\Delta h_c} \right)_{KB} \right]} \quad (17\text{—III})$$

где  $\left( \frac{\Delta b_c}{\Delta h_c} \right)_{KB} = k_i \frac{\Delta b}{\Delta h}$  — коэффициент уширения в квадратном калибре.

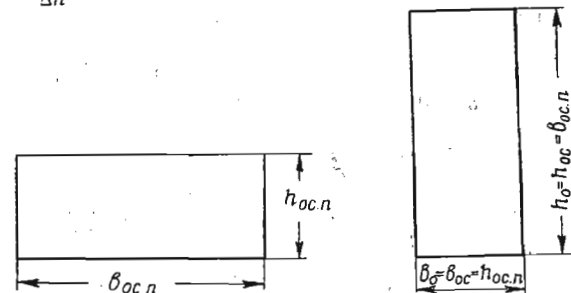


Рис. 72. Полоса, соответственная овальной, по выходе из калибра (слева) и перед прокаткой ее в последующем овальном калибре (справа)

Как и при выводе равенства (13—III), получим такое соотношение:

$$\frac{h_{0c}}{D} = \frac{1}{1 + \frac{\cos \alpha_{KB}}{1 - \cos \alpha_{KB}} \left( \frac{\Delta h_c}{h_{0c}} \right)_{KB}}, \quad (18\text{—III})$$

где  $\cos \alpha_{KB}$  — угол захвата в квадратном калибре.

Далее, как и при выводе равенств (14—III) и (15—III), придем к таким соотношениям:

$$\left( \frac{\Delta h_c}{h_{1c}} \right)_{KB} = \frac{\left( \frac{\Delta h_c}{h_{0c}} \right)_{KB}}{1 - \left( \frac{\Delta h_c}{h_{0c}} \right)_{KB}} \quad (19\text{—III})$$

$$\frac{h_{1c}}{D} = \frac{1}{1 + \frac{1}{1 - \cos \alpha_{KB}} \left( \frac{\Delta h_c}{h_{1c}} \right)_{KB}}. \quad (20\text{—III})$$

Равенства (14—III) — (20—III) дают возможность определить величины  $\frac{h_{0c}}{D}$  и  $\frac{h_{1c}}{D}$  при прокатке овальной полосы в квадрат-

ном калибре, если задано отношение осей овальной полосы и угол захвата.

**ПРИМЕР 16.** Определить отношение  $\frac{h_{oc}}{D}$  при прокатке овальной полосы в квадратном калибре, если отношение осей овальной полосы  $a=2$  и угол захвата  $\alpha=26^\circ$ . Степень заполнения овального калибра  $i=0,98$ . Коэффициент трения при прокатке  $\mu=0,3$ .

Предварительно задаемся отношением  $\frac{\Delta b}{\Delta h}=0,5$ . По равенству (16—III):

$$\frac{\Delta h}{h_0} = \frac{a-1}{a \left(1 + \frac{\Delta b}{\Delta h}\right)} = \frac{2-1}{2(1+0,5)} = 0,333.$$

По равенству: (10—III):

$$\frac{D_p}{h_0} = \frac{1}{1 - \cos 26^\circ} \cdot \frac{\Delta h}{h_0} = \frac{0,333}{1 - 0,90} = 3,33.$$

По номограмме (рис. 14) при  $\frac{\Delta h}{h_0}=0,333$  и  $\frac{D_p}{h_0}=3,33$  и

$\frac{b_0}{h_0}=0,5$  находим, что  $\frac{\Delta b}{\Delta h}=0,17$ .

По номограмме (рис. 58) при  $a=2$  находим, что  $k_i=0,73$ . Коэффициент уширения в квадратном калибре:

$$\left(\frac{\Delta b_c}{\Delta h_c}\right)_{KB} = k_i \frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,73 \cdot 0,17 = 0,124.$$

По равенству (17—III) находим:

$$\left(\frac{\Delta h_c}{h_{oc}}\right)_{KB} = \frac{a-1}{a \left[1 + \left(\frac{\Delta b_c}{\Delta h_c}\right)_{KB}\right]} = \frac{2-1}{2(1+0,124)} = 0,445.$$

Наконец, по равенству (18—III):

$$\frac{h_{oc}}{D} = \frac{1}{1 + \frac{0,9 \cdot 0,445}{1 - 0,9}} = 0,204.$$

Аналогичные вычисления проведены для различного отношения осей полосы при углах захвата  $26^\circ, 28^\circ, 30^\circ, 32^\circ$  и затем построены соответствующие кривые (рис. 73).

**ПРИМЕР 17.** Определить отношение  $\frac{h_{ic}}{D}$  при прокатке овальной полосы в квадратном калибре, если отношение осей овальной полосы  $a=2$  и угол захвата  $\alpha_{KB}=26^\circ$ . Степень заполнения

овального калибра  $i=0,98$ . Коэффициент трения при прокатке  $\mu=0,3$ .

Согласно примеру 16, имеем:

$$\left(\frac{\Delta h_c}{h_{oc}}\right)_{KB} = 0,445.$$

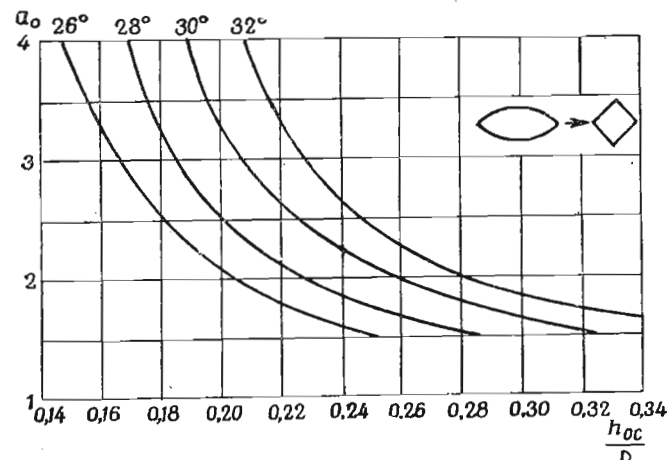


Рис. 73. Зависимость предельного отношения осей овальной полосы при прокатке ее в квадратном калибре, от отношения высоты овальной полосы к диаметру валков, при различных углах захвата

По равенству (19—III):

$$\left(\frac{\Delta h_c}{h_{ic}}\right)_{KB} = \frac{\left(\frac{\Delta h_c}{h_{oc}}\right)_{KB}}{1 - \left(\frac{\Delta h_c}{h_{oc}}\right)_{KB}} = \frac{0,445}{1 - 0,445} = 0,803.$$

По равенству (20—III):

$$\frac{h_{ic}}{D} = \frac{1}{1 + \frac{1}{1 - \cos \alpha_{KB}} \left(\frac{\Delta h_c}{h_{ic}}\right)_{KB}} = \frac{1}{1 + \frac{0,803}{1 - 0,9}} = 0,112.$$

Аналогичные вычисления произведены для различного отношения осей полосы  $a$  при углах захвата  $26^\circ, 28^\circ, 30^\circ, 32^\circ$  и затем построены кривые (рис. 74).

Сопоставим теперь предельное отношение осей полосы при прокатке ее в овальном и квадратном калибре. Для этого сравним величины отношения осей полосы для указанных калибров при одинаковых отношениях  $\frac{h_0}{D}$ .

Допустим, что высота квадратной полосы, задаваемой в овальный калибр,  $h_0 = 45$  мм, диаметр валков  $D = 300$  мм и угол захвата  $\alpha = 26^\circ$ . Тогда отношение  $\frac{h_0}{D} = \frac{45}{300} = 0,15$ . Этому отношению по номограмме (рис. 70) соответствует при прокатке в овальном калибре предельное отношение осей полосы  $a = 3,60$ . При прокатке же в квадратном калибре по номо-

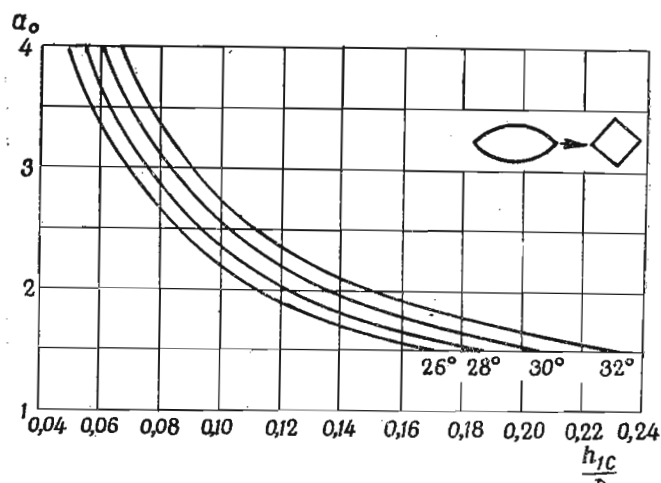


Рис. 74. Зависимость предельного отношения осей овальной полосы при прокатке ее в квадратном калибре от отношения высоты квадратной полосы, следующей за овальной, к диаметру валков при различных углах захвата

грамме (рис. 73)  $a = 3,85$ . Разумеется, одна и та же полоса не может иметь двух различных отношений осей. Таким образом, по условиям захвата в овальном калибре необходимо взять овальную полосу с отношением осей  $a = 3,60$ , при этом условии в квадратном калибре предельный угол захвата достигнут не будет.

Итак, при одинаковых значениях предельного угла захвата в овальных и квадратных калибрах обжатие при прокатке лимитируется условиями захвата в овальных калибрах, на которые и следует ориентироваться.

Выше мы ориентировочно приняли предельный угол захвата в овальных калибрах на стальных валках равным  $26^\circ$ .

Из приведенных данных видно, что в квадратных калибрах системы овал—квадрат предельный угол захвата больше предельного угла захвата в овальных калибрах.

На основании изложенного ориентировочно можем принять предельный угол захвата при прокатке овальных полос в квадратных калибрах равным  $28^\circ$ .

Понятно, что указанные здесь величины предельных углов захвата следует рассматривать как грубо ориентировочные, поскольку предельный угол захвата зависит от коэффициента трения при прокатке, который в свою очередь является функцией большого числа факторов (температура, скорость прокатки, состояние поверхности и др.), изменяющихся в широких пределах.

Номограммы, приведенные на рис. 70—74, дают возможность непосредственно, минуя промежуточные вычисления, определять размеры прокатываемых полос и калибров в системе овал—квадрат. Конечно, не следует забывать, что номограмма получена для случая, когда коэффициент трения при прокатке  $\mu = 0,3$  и степень заполнения овальных калибров  $i = 0,98$ .

**ПРИМЕР 18.** Определить размеры овального и следующего за ним квадратного калибра, если сторона квадратного сечения, задаваемого в овальный калибр, равна 50 мм, диаметр валков 300 мм и угол захвата в овальном и квадратном калибрах равен  $26^\circ$ .

#### 1. Овальный калибр

По номограмме (рис. 70) при  $\frac{h_{0c}}{D} = \frac{50}{300} = 0,167$  и  $\alpha = 26^\circ$  отношение осей овальной полосы  $a = 2,7$ .

По номограмме (рис. 71) при  $a = 2,7$  и  $\alpha = 26^\circ$  отношение  $\frac{h_{1c}}{D} = 0,076$ .

Высота овальной полосы:

$$h_{1c} = 0,076 D = 0,076 \cdot 300 = 22,8 \text{ мм.}$$

Ширина овальной полосы:

$$b_{1c} = ah_{1c} = 2,7 \cdot 22,8 = 61,5 \text{ мм.}$$

Площадь овальной полосы:

$$\omega = 22,8 \cdot 61,5 = 1400 \text{ мм}^2.$$

Площадь овального калибра:

$$\omega_k = \frac{\omega}{i} = \frac{1400}{0,98} = 1430 \text{ мм}^2.$$

По номограмме (рис. 67) при отношении осей полосы  $a = 2,7$  и степени заполнения  $i = 0,98$  отношение осей калибра  $a_k = 3,05$ .

По номограмме (рис. 65) при  $a_k = 3,05$  имеем:

$$\frac{h_k^2}{\omega_k} = 0,482$$

и

$$\frac{r_K}{h_K} = 2,58.$$

Откуда:

$$h_K = \sqrt{0,482 \omega_K} = \sqrt{0,482 \cdot 1430} = 26,2 \text{ мм};$$

$$b_K = a_K h_K = 3,05 \cdot 26,2 = 80 \text{ мм};$$

$$r_K = 2,58 h_K = 2,58 \cdot 26,2 = 67,6 \text{ мм}.$$

## II. Квадратный калибр

При  $a = 2,7$  и  $\alpha = 26^\circ$  по номограмме (рис. 74)  $\frac{h_{1c}}{D} = 0,079$ ,

откуда:

$$h_{1c} = 0,079 D = 0,079 \cdot 300 = 24 \text{ мм} \approx h_1 = b_1.$$

Площадь поперечного сечения полосы:

$$\omega_1 = h_1 b_1 = 24 \cdot 24 = 576 \text{ мм}^2.$$

Площадь калибра:

$$\omega_K = \frac{\omega}{i} = \frac{576}{0,98} = 588 \text{ мм}^2.$$

Сторона калибра:

$$c = \sqrt{\frac{\omega_K}{i}} = \sqrt{\frac{588}{0,98}} = 24,5 \text{ мм}.$$

По номограмме (рис. 69) при  $i = 0,98$ 

$$\frac{r_K}{c} = 0,123.$$

Радиус закругления при вертикальной диагонали калибра:

$$r_K = 0,123 \cdot 24,5 = 5,2 \text{ мм}.$$

ПРИМЕР 19. Определить размеры овального и предшествующего ему квадратного калибра, если сторона квадратного сечения, выходящего из квадратного калибра, следующего за овальным, равна 30 мм. Диаметр валков  $D = 400$  мм, угол захвата в овальном и квадратном калибрах  $\alpha = 26^\circ$ .

## I. Овальный калибр

По номограмме (рис. 74) при  $\frac{h_{1c}}{D} = \frac{30}{400} = 0,075$  и  $\alpha = 26^\circ$  отношение осей овальной полосы  $a = 2,75$ .

По номограмме (рис. 73) при  $a = 2,75$  и  $\alpha = 26^\circ$  отношение  $\frac{h_{0c}}{D} = 0,167$ .

Исходные высота и ширина овальной полосы в положении прокатки:

$$h_{0c} = 0,167 D = 0,167 \cdot 400 = 66,8 \text{ мм};$$

$$b_{0c} = \frac{h_{0c}}{a} = \frac{66,8}{2,75} = 24,3 \text{ мм}.$$

Площадь овальной полосы:

$$\omega_0 = 66,8 \cdot 24,3 = 1620 \text{ мм}^2.$$

Площадь овального калибра:

$$\omega_K = \frac{\omega}{i} = \frac{1620}{0,98} = 1655 \text{ мм}^2.$$

По номограмме (рис. 67) при  $a = 2,75$  и  $i = 0,98$  отношение осей калибра

$$a_K = 3,10.$$

По номограмме (рис. 65) при  $a_K = 3,1$  имеем:

$$\frac{h_K^2}{\omega_K} = 0,475$$

и

$$\frac{r_K}{h_K} = 2,65.$$

Отсюда:

$$h_K = \sqrt{0,475 \cdot 1655} = 28 \text{ мм};$$

$$b_K = a_K h_K = 3,1 \cdot 28 = 87 \text{ мм};$$

$$r_K = 2,65 h_K = 2,65 \cdot 28 = 74 \text{ мм}.$$

## II. Квадратный калибр

При  $a = 2,75$  и  $\alpha = 26^\circ$  по номограмме (рис. 70)  $\frac{h_{0c}}{D} = 0,166$ ,

откуда:

$$h_{0c} = 0,166; D = 0,166 \cdot 400 = 66,5 \approx h_0 = b_0.$$

Площадь поперечного сечения полосы:

$$\omega_0 = h_0 b_0 = 66,5^2 = 4420 \text{ мм}^2.$$

Площадь калибра:

$$\omega_K = \frac{\omega_0}{i} = \frac{4420}{0,98} = 4510 \text{ мм}^2.$$

Сторона квадратного калибра

$$c = \sqrt{\frac{\omega_K}{i}} = \sqrt{\frac{4510}{0,98}} = 67,9 \text{ мм}.$$

По номограмме (рис. 69) при  $i = 0,98$ 

$$\frac{r_K}{c} = 0,213$$

или

$$r_K = 0,213 h_K = 0,213 \cdot 67,9 = 14,5 \text{ мм}.$$



## § 11. Оптимальное отношение осей овальных калибров

На рис. 75 и 76 приведены величины коэффициента вытяжки при прокатке в овальных калибрах (при различной их степени заполнения) и на гладкой бочке в зависимости от отношения осей полосы.

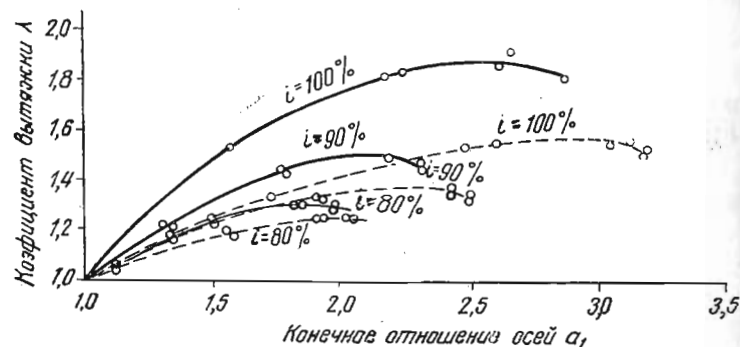


Рис. 75. Зависимость коэффициента вытяжки в овальных калибрах при различной степени заполнения от конечного отношения осей: сплошная линия — вытяжка в калибре; пунктирная линия — вытяжка соответственных полос на гладкой бочке. Прокатываемый материал — свинец

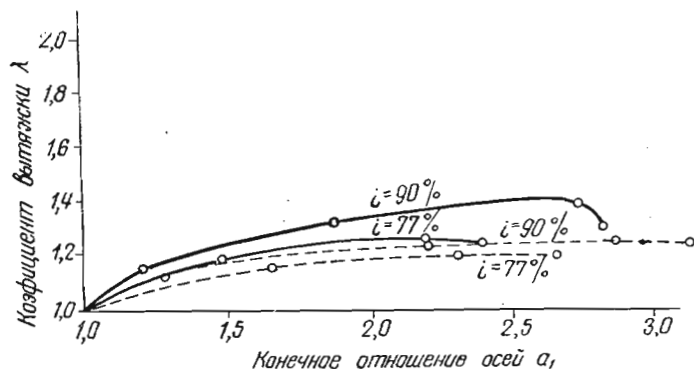


Рис. 76. Зависимость коэффициента вытяжки в овальных калибрах при различной степени заполнения от конечного отношения осей: сплошная линия — вытяжка в калибре, пунктирная линия — вытяжка соответственных полос на гладкой бочке. Прокатываемый материал — сталь. Температура прокатки 1000°.

Опыты показывают, что чем больше степень заполнения овальных калибров, тем больше вытяжка в них по сравнению с вытяжкой на гладкой бочке. При этом с уменьшением степени

заполнения вытяжка в калибрах уменьшается сначала весьма сильно, а затем медленнее. При заполнении на 77—80% вытяжка в калибрах по величине близка к вытяжке на гладкой бочке. Таким образом, на основании результатов опытов можно сделать вывод: чтобы обеспечить высокую производительность стана необходимо прокатывать металл с наибольшим заполнением калибров.

Рассмотрение кривых дает основание утверждать, что с увеличением отношений осей полосы вытяжка при прокатке и в калибре, и на гладкой бочке увеличивается до некоторого определенного предела, а затем уменьшается.

Рассмотрим результаты опытов при прокатке овальных полос в квадратных калибрах. На основании опытных данных были построены кривые, характеризующие зависимость вытяжки от отношения осей исходной полосы при прокатке в калибрах и на гладкой бочке (рис. 77).

В этом случае, так же как и при прокатке в овальных калибрах, вытяжка уменьшается с уменьшением степени заполнения,

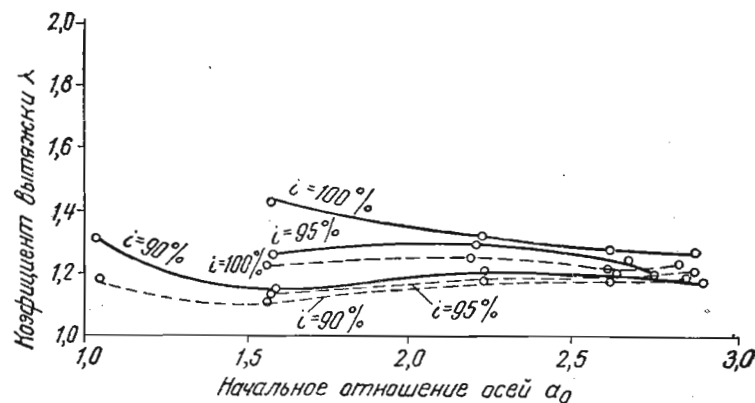


Рис. 77. Зависимость коэффициента вытяжки в квадратных калибрах при различной степени заполнения от отношения осей исходной полосы: сплошная линия — вытяжка в калибре; пунктирная линия — вытяжка соответственных полос на гладкой бочке. Прокатываемый материал — свинец

приближаясь по величине к вытяжке на гладкой бочке. При заполнении на 90% вытяжка в квадратном калибре по величине близка к вытяжке на гладкой бочке. Следовательно, с увеличением заполнения квадратных калибров производительность стана растет.

Кроме того, на основании результатов опытов устанавливаем, что с ростом отношения осей овальной полосы вытяжка в квадратных калибрах уменьшается.

Вытяжка при прокатке на гладкой бочке в рассматриваемых опытах несколько уменьшается с увеличением отношения осей.

Итак, с увеличением отношения осей полосы вытяжка в овальном калибре сначала возрастает, а потом уменьшается, а в квадратном калибре — только уменьшается. Разберем более подробно причины этого явления.

На рис. 78 приведены кривые, построенные на основании опытных данных, характеризующие зависимость относительного

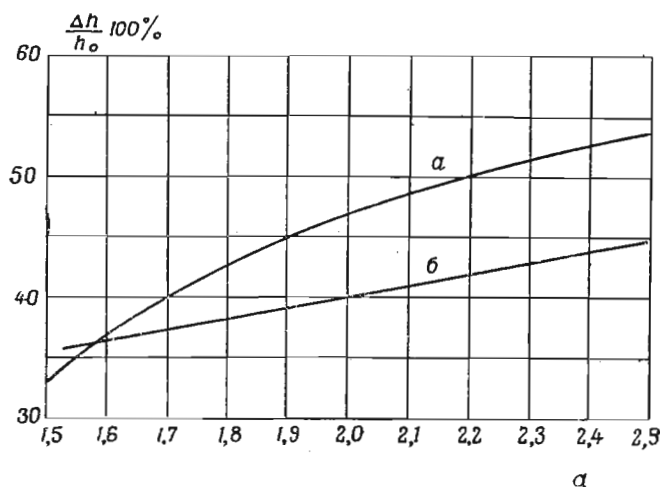


Рис. 78. Зависимость относительного обжатия от отношения осей полос: а — овальная полоса; б — квадратная полоса. Степень заполнения калибров  $i = 1,0$

обжатия от отношения осей полосы при прокатке в овальных и квадратных калибрах при заполнении их на 100%. Данные рисунка показывают, что в рассматриваемых опытах обжатие возрастает с ростом отношения осей прокатываемых полос. Таким образом, результаты опытов (рис. 75, 77 и 78) свидетельствуют о том, что увеличение обжатия не обязательно должно сопровождаться увеличением вытяжки. При прокатке возможны такие случаи, при которых, начиная с некоторого обжатия, дальнейшее его увеличение уменьшает вытяжку. Такие условия наступают тогда, когда уширение приобретает значительную величину.

В рассматриваемых опытах с ростом обжатия длина очага деформации по сравнению с его шириной постепенно возрастает. При этом силы трения, препятствующие перемещению частиц материала вдоль оси полосы, постепенно возрастают по сравнению с силами трения, действующими в поперечном направлении. По этой причине уширение полосы увеличивается, а вытяжка соответственно уменьшается. При больших обжатиях с дальней-

шим их ростом уширение возрастает быстрее вытяжки и поэтому вытяжка уменьшается.

На рис. 79 приведены кривые, построенные по опытным данным, характеризующие зависимость вытяжки от отношения осей

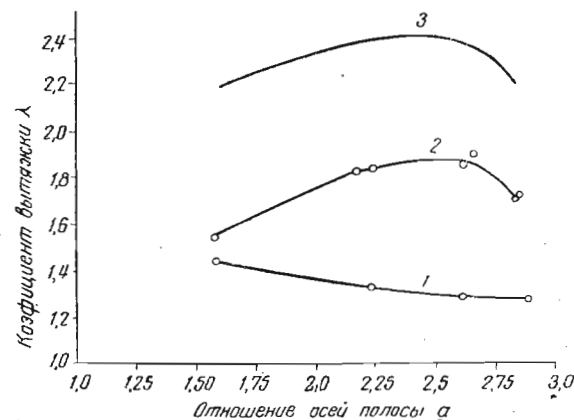


Рис. 79. Зависимость коэффициента вытяжки от отношения осей полосы:

1 — овальный калибр; 2 — квадратный калибр; 3 — суммарная вытяжка. Прокатываемый материал — свинец

в овальном и квадратном калибрах при заполнении их на 100%. На этом же рисунке показана суммарная вытяжка в овальных и квадратных калибрах. Поскольку кривая вытяжки в овальном калибре имеет максимум, а в квадратном калибре она непрерывно уменьшается, то кривая суммарной вытяжки имеет максимум, который сдвинут по отношению к максимуму в овальном калибре в сторону меньшего отношения осей.

Отношение осей полосы, при котором суммарная вытяжка в овальном и квадратном калибрах имеет наибольшую величину, назовем оптимальным отношением осей.

Из опытных данных (рис. 79) видно, что суммарная вытяжка имеет наибольшую величину при отношении осей полосы 2,4; следовательно, это отношение осей является оптимальным, в условиях данного опыта.

Понятно, чем больше величина исходного квадратного сечения, тем больше должно быть оптимальное отношение осей. Следовательно, оптимальное отношение осей является функцией отношения  $\frac{h_0}{D}$ . Принимая во внимание, что отношение  $\frac{h_0}{D}$ , в свою очередь, связано с отношением  $\frac{h_1}{D}$  зависимостью (10—11), при-

ходим к выводу, что оптимальное отношение осей является также функцией отношения  $\frac{h_1}{D}$ : чем больше величина  $\frac{h_1}{D}$ , тем больше будет и оптимальное отношение осей.

Анализ практических данных показывает, что на мелкосортных станах оптимальное отношение осей овальной полосы для последних (чистовых) линий обычно лежит в пределах 2,5—3,0. На черновых же и обжимных линиях отношение осей никогда не достигает оптимального значения, здесь вытяжка лимитируется уже другими факторами: предельным углом захвата, иногда — прочностью валков.

Функциональную зависимость между оптимальным отношением осей и отношениями  $\frac{h_0}{D}$  и  $\frac{h_1}{D}$  целесообразнее всего установить экспериментальным путем.

Знание такой зависимости крайне желательно, так как она позволяет спроектировать такую калибровку валков, при которой

была бы обеспечена максимальная вытяжка в каждом данном проходе, а значит, и максимальная производительность прокатного стана.

Поясним это несколько подробнее.

На рис. 80 и 81 схематически показана зависимость оптимального отношения осей и предельного отношения осей овальной полосы от отношения высоты квадратного сечения, задаваемого в овальный калибр, к начальному диаметру валков:  $\frac{h_0}{D}$  и  $\frac{h_1}{D}$ , где  $h_0$  — стороны квадратного сечения, задаваемого в овальный калибр, и  $h_1$  — сторона квадратного сечения, выходящего из калибра, следующего за овальным.

Из данных рис. 80 и 81 видно, что абсциссы  $x_1$  и  $x_2$ , соответствующие точкам пересечения кривых оптималь-

ного и предельного отношения осей, делят все поле диаграмм на две части. При значениях  $\frac{h_0}{D} < x_1$  или  $\frac{h_1}{D} < x_2$  оптимальное отношение осей меньше предельного. Чтобы в указанных обла-

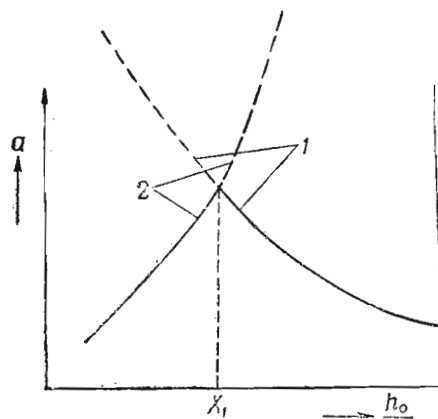


Рис. 80. Зависимость предельного и оптимального отношения осей овальной полосы от отношения высоты квадратного сечения, задаваемого в овальный калибр, к начальному диаметру валков: 1 — предельное отношение осей; 2 — оптимальное отношение осей

стях значений  $\frac{h_0}{D}$  и  $\frac{h_1}{D}$  получить максимальную вытяжку и, следовательно, большую производительность прокатного стана, следует величину  $a$  выбирать по кривой для оптимального отношения осей.

При значениях  $\frac{h_0}{D} > x_1$  или  $\frac{h_1}{D} > x_2$  оптимальное отношение осей больше предельного. Поэтому, чтобы в процессе расчета рациональной калибровки иметь максимально возможные в данных условиях вытяжки, следует выбирать величину  $a$  по кривой для предельного отношения осей. В указанной области условия захвата лимитируют обжатие за проход и не дают возможности достичь оптимального отношения осей.

При значениях  $\frac{h_0}{D} = x_1$  или  $\frac{h_1}{D} = x_2$  оптимальное отношение осей равно предельному отношению осей. При этом резервы прокатного стана для обеспечения максимальной вытяжки оказываются использованными до конца.

Из изложенного становится очевидным, насколько важно проведение соответствующих исследований, касающихся определения величины оптимального отношения осей в сопоставлении с предельным отношением осей для различных условий прокатки.

## § 12. Характеристика системы шестиугольник — квадрат

Схема калибров системы шестиугольник — квадрат приведена на рис. 82. Как видно из рисунка, метод кантовки при прокатке в этой системе калибров такой же, как и в системе овал — квадрат, т. е. 90° между шестиугольным и квадратным калибрами и 45° между квадратным и шестиугольным калибрами. Как было уже указано, такой метод кантовки позволяет получить относительно равномерную температуру по всему периметру полосы, так как происходит поочередное закатывание ребер в грани и граней в ребра полосы.

Условия захвата шестиугольной полосы в квадратном калибре несколько лучше, чем овальной. Это объясняется тем, что со-

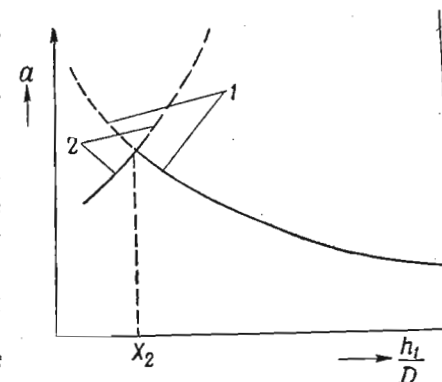


Рис. 81. Зависимость предельного и оптимального отношения осей овальных полос от отношения высоты квадратного сечения, следующего за овальным, к начальному диаметру валков:

1 — предельное отношение осей; 2 — оптимальное отношение осей

ответствующие элементы шестиугольной полосы и квадратного калибра параллельны (рис. 82).

Если ширина задаваемой в шестиугольный калибр квадратной заготовки не превышает длины горизонтальной грани шести-

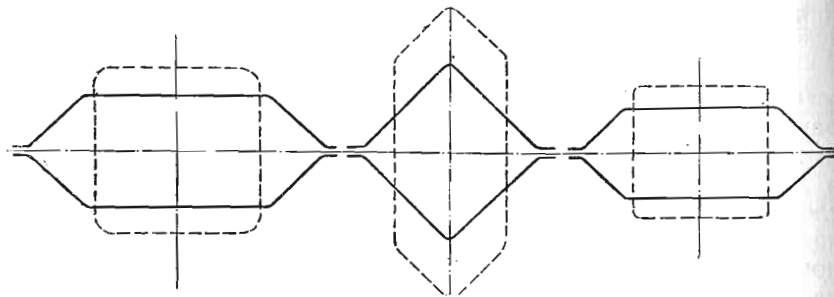


Рис. 82. Схема калибров системы шестиугольник — квадрат

угольного калибра, то условия захвата в шестиугольном калибре не отличаются от условий захвата на гладкой бочке. Если указанное условие не соблюдается, то условия захвата шестиугольной полосы в квадратном калибре примерно такие же, как и в овальном калибре.

Наличие ребер в шестиугольной полосе увеличивает опасность образования морщин и не позволяет использовать шестиугольные калибры в качестве предотделочных при прокатке круглых профилей. Повидимому, по этим причинам система шестиугольник — квадрат применяется относительно редко. Шестиугольные калибры применяются лишь при массовой прокатке шестиугольных профилей. Довольно часто в проволочных станках шестиугольные калибры используются как переходные между системой ящичных калибров и системой овал — квадрат.

На практике отношение осей шестиугольных калибров обычно лежит в пределах от 2,5 до 4,0 и вытяжка в них — от 1,35 до 2,10.

### § 13. Геометрические соотношения в шестиугольном калибре

На рис. 83 приведена схема шестиугольного калибра. В нем обычно наклонные грани расположены под углом  $45^\circ$  к его горизонтальной оси и под углом  $90^\circ$  друг к другу.

Горизонтальные и наклонные грани калибра сопрягаются радиусом  $r_k$ . При таком условии площадь калибра:

$$\omega_k = \text{пл. } ABCB'A'C' - 4 \text{ пл. } IBF.$$

Но

$$\text{пл. } ABCB'A'C' = (b_k - h_k) h_k + 0,5 h_k^2 = b_k h_k - 0,5 h_k^2;$$

$$\text{пл. } IBF = \text{пл. } EFG - \text{пл. } IFG - \text{пл. } EIB.$$

При этом:

$$\text{пл. } EFG = \frac{1}{2} r_k^2;$$

$$\text{пл. } IFG = \frac{\pi}{360} r_k^2 \alpha = \frac{\pi}{8} r_k^2;$$

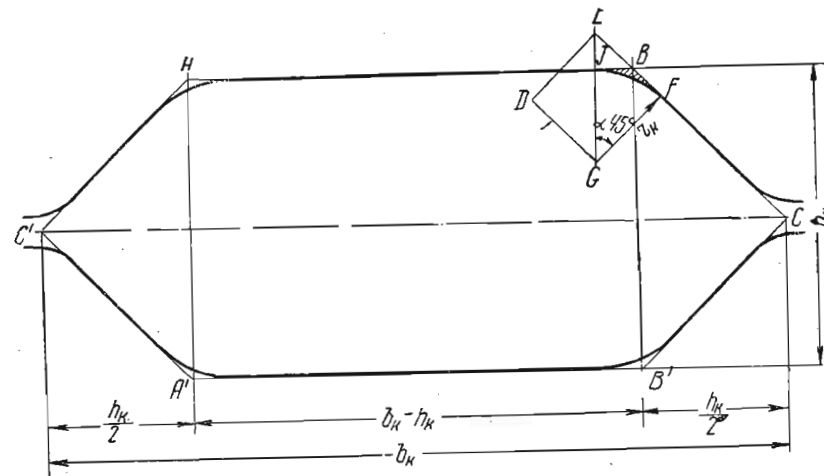


Рис. 83. Схема шестиугольного калибра

$$\text{пл. } EIB = \frac{1}{2} EI \cdot IB = \frac{1}{2} (\sqrt{2} - 1)^2 r_k^2.$$

Таким образом:

$$\text{пл. } IBF = \frac{1}{2} r_k^2 - \frac{\pi}{8} r_k^2 - \frac{1}{2} (\sqrt{2} - 1)^2 r_k^2 =$$

$$= \frac{1}{2} r_k^2 \left[ 1 - \frac{\pi}{4} - (\sqrt{2} - 1)^2 \right].$$

$$4 \text{ пл. } IBF = 2 \left[ 1 - \frac{\pi}{4} - (\sqrt{2} - 1)^2 \right] r_k^2.$$

или

$$4 \text{ пл. } IBF = 0,09 r_k^2.$$

Следовательно:

$$\omega_k = b_k h_k - 0,5 h_k^2 - 0,09 r_k^2.$$

Поделим обе части равенства на  $h_K^2$ .

$$\frac{\omega_K}{h_K^2} = \left( \frac{b_K}{h_K} \right) - 0,5 - 0,09 \left( \frac{r_K}{h_K} \right)^2.$$

Принимая во внимание, что  $\frac{b_K}{h_K} = a_K$ , окончательно получим:

$$\frac{h_K^2}{\omega_K} = \frac{1}{a_K - 0,5 - 0,09 \left( \frac{r_K}{h_K} \right)^2}. \quad (20-III)$$

По этому равенству подсчитана табл. 9. Из данных таблицы видно, что при отношении осей калибра  $a_K \geq 2$  отношение  $\frac{h_K^2}{\omega_K}$

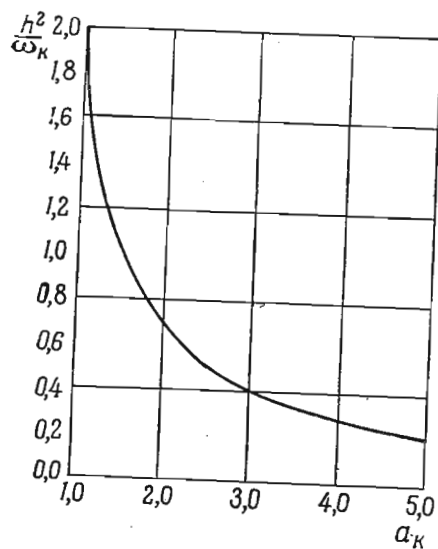


Рис. 84. Номограмма для построения шестиугольного калибра

По этому равенству построена номограмма (рис. 84), которой можно пользоваться для определения геометрических размеров шестиугольного калибра.

практически не зависит от отношения  $\frac{r_K}{h_K}$ . Действительно, при изменении отношения  $\frac{r_K}{h_K}$  от нуля до 0,5 величина отношения  $\frac{h_K^2}{\omega_K}$  изменяется не более чем на 0,02. Таким образом, принимая во внимание, что отношение осей шестиугольных калибров, применяемых на практике, обычно более двух, выражение (20—III) можно заменить такой приближенной формулой:

$$\frac{h_K^2}{\omega_K} = \frac{1}{a_K - 0,5}. \quad (21-III)$$

Таблица 9

Значение отношения  $\frac{h_K^2}{\omega_K}$  в зависимости от отношения осей калибра  $a_K$  и  $\frac{r_K}{h_K}$  при прокатке в шестиугольном калибре

$\frac{r_K}{h_K}$	Значение отношения $\frac{h_K^2}{\omega_K}$ при $a_K$				
	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0
0,00	2,000	0,668	0,400	0,286	0,222
0,50	2,097	0,691	0,409	0,290	0,225

#### § 14. Зависимость между отношением осей полосы, отношением осей и степенью заполнения шестиугольного калибра

На рис. 85 приведено поперечное сечение шестиугольного калибра и заполняющее его сечение шестиугольной полосы. Заштрихованные участки калибра полоса не заполняет.

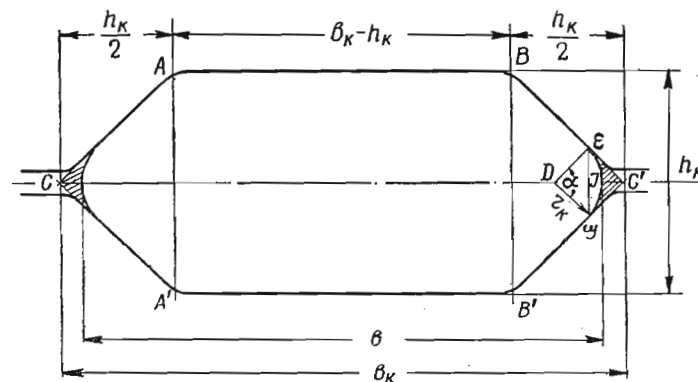


Рис. 85. Шестиугольный калибр и полоса, заполняющая его

В предыдущем параграфе было показано, что площадь шестиугольного калибра:

$$\omega_K = b_K h_K - 0,5 h_K^2 - 0,09 r_K^2.$$

Из рис. 85 видно, что площадь поперечного сечения полосы:

$$\omega = \omega_k - 2 \text{ пл. } EIGC'.$$

Но

$$\begin{aligned} \text{пл. } EIGC' &= \text{пл. } DEC'G - \text{пл. } DEIG = \\ &= r_k^2 - \frac{\pi}{4} r_k^2 = r_k^2 \left(1 - \frac{\pi}{4}\right) = 0,215 r_k^2. \end{aligned}$$

Следовательно:

$$2 \text{ пл. } EIGC' = 0,43 r_k^2$$

и

$$\omega = b_k h_k - 0,5 h_k^2 - 0,09 r_k^2 - 0,43 r_k^2,$$

или

$$\omega = b_k h_k - 0,5 h_k^2 - 0,52 r_k^2.$$

Таким образом:

$$i = \frac{b_k h_k - 0,5 h_k^2 - 0,52 r_k^2}{b_k h_k - 0,5 h_k^2 - 0,09 r_k^2},$$

или

$$i = \frac{\frac{b_k}{h_k} - 0,5 - 0,52 \left(\frac{r_k}{h_k}\right)^2}{\frac{b_k}{h_k} - 0,5 - 0,09 \left(\frac{r_k}{h_k}\right)^2}$$

и

$$i = \frac{a_k - 0,5 - 0,52 \left(\frac{r_k}{h_k}\right)^2}{a_k - 0,5 - 0,09 \left(\frac{r_k}{h_k}\right)^2}. \quad (22-III)$$

Выразим отношение  $\frac{r_k}{h_k}$  через отношение осей калибра и полосы. Из рис. 85 видно, что

$$\frac{1}{2} (b_k - b) = DC' - DI,$$

или

$$\frac{1}{2} (b_k - b) = (\sqrt{2} - 1) r_k.$$

Отсюда

$$r_k = \frac{b_k - b}{2(\sqrt{2} - 1)}.$$

Поделив обе части этого выражения на  $h_k$ , получаем:

$$\frac{r_k}{h_k} = 1,22 \left( \frac{b_k}{h_k} - \frac{b}{h_k} \right),$$

или

$$\frac{r_k}{h_k} = 1,22 (a_k - a). \quad (23-III)$$

Подставляя выражение  $\frac{r_k}{h_k}$  по формуле (23-III) в равенство (22-III), получим:

$$i = \frac{a_k - 0,5 - 0,774 (a_k - a)^2}{a_k - 0,5 - 0,134 (a_k - a)^2}.$$

Отсюда после простых преобразований получим квадратное уравнение:

$$a_k^2 - \left[ \frac{7,46(1-i)}{5,77-i} + 2a \right] a_k + \left[ \frac{3,73(1-i)}{5,77-i} + a^2 \right] = 0.$$

Действительный корень этого уравнения:

$$\begin{aligned} a_k &= \left[ \frac{3,73(1-i)}{5,77-i} + a \right] + \\ &+ \sqrt{\left[ \frac{3,73(1-i)}{5,77-i} + a \right]^2 - \left[ \frac{3,73(1-i)}{5,77-i} + a^2 \right]}. \quad (24-III) \end{aligned}$$

По этому равенству построена номограмма, приведенная на рис. 86, выражающая связь между отношениями осей калибра и полосы и степенью заполнения. По номограмме можно определить одну из указанных величин, если известны две другие.

По равенству (23-III), выражающему связь между отношением  $\frac{r_k}{h_k}$  и отношениями осей калибра и полосы, построена номограмма (рис. 87).

Номограммы, приведенные на рис. 84, 86 и 87 позволяют определить все элементы шестиугольного и квадратного калибров, необходимые для их построения.

ПРИМЕР 20. Площадь поперечного сечения шестиугольной полосы  $\omega = 600 \text{ мм}^2$ . Отношение осей полосы  $a = 2,0$ . Степень заполнения  $i = 0,98$ . Определить линейные элементы, необходимые для построения калибра.

Площадь калибра

$$\omega_k = \frac{\omega}{i} = \frac{600}{0,98} = 612 \text{ мм}^2.$$

При  $a = 2$  и  $i = 0,98$  по номограмме (рис. 86)  $a_k = 2,23$ .

При  $a_k = 2,23$  по номограмме (рис. 84).

$$\frac{h_k^2}{\omega_k} = 0,581.$$

Высота калибра:

$$h_k = \sqrt{0,581 \omega_k} = \sqrt{0,581 \cdot 612} = 18,8 \text{ мм.}$$

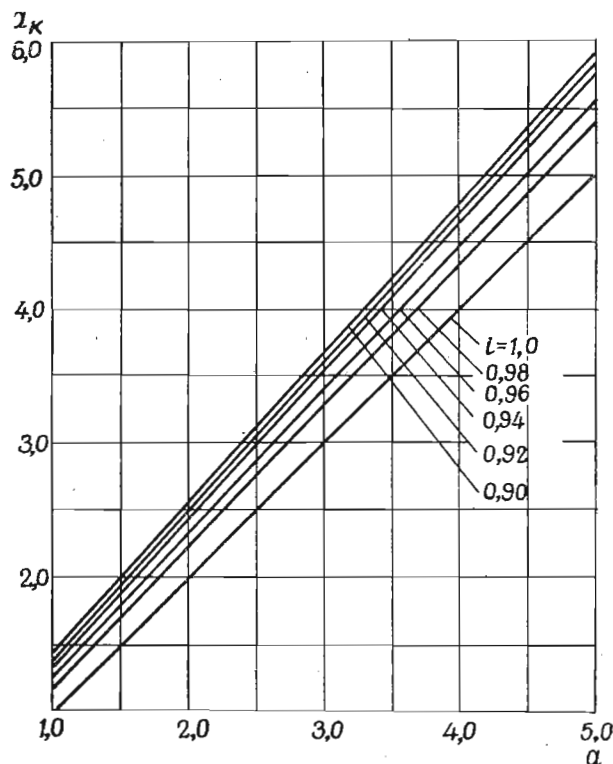


Рис. 86. Зависимость между отношениями осей шестиугольного калибра и полюсы и степенью заполнения

Ширина калибра:

$$b_k = a_k h_k = 2,23 \cdot 18,8 = 42 \text{ мм.}$$

При  $a_k - a = 2,23 - 2,0 = 0,23$  по номограмме (рис. 87)

$$\frac{r_k}{h_k} = 0,277.$$

Радиус закруглений:

$$r_k = 0,277 h_k = 0,277 \cdot 18,8 = 5,2 \text{ мм.}$$

Длина горизонтальной грани калибра

$$b_k - h_k = 42 - 18,8 = 23,2 \text{ мм.}$$

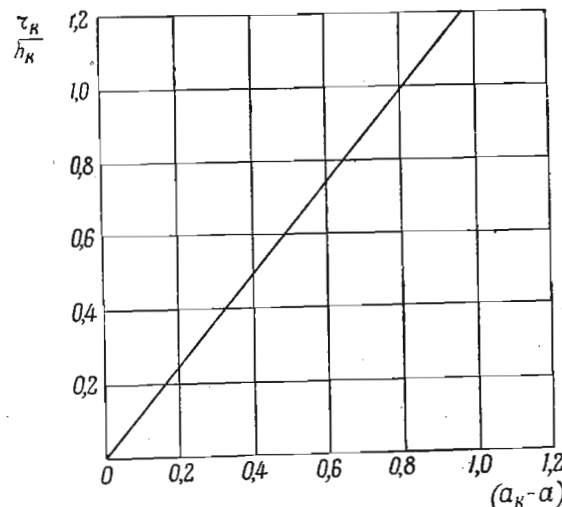


Рис. 87. Зависимость между  $\frac{r_k}{h_k}$  и  $(a_k - a)$  для шестиугольного калибра

ПРИМЕР 21. Площадь поперечного сечения квадратной полосы  $\omega = 400 \text{ мм}^2$ . Степень заполнения калибра  $i = 0,98$ . Определить линейные элементы, необходимые для построения калибра:

$$\omega_k = \frac{\omega}{i} = \frac{400}{0,98} = 408 \text{ мм}^2.$$

При  $a = 1$ ,  $i = 0,98$  по номограмме (рис. 86)  $a_k = 1,160$ . При  $a_k = 1,160$  по номограмме (рис. 84)

$$\frac{h_k^2}{\omega_k} = 1,58.$$

$$h_k = \sqrt{1,58 \omega_k} = \sqrt{1,58 \cdot 408} = 25,4 \text{ мм;}$$

$$b_k = a_k h_k = 1,160 \cdot 25,4 = 29,3 \text{ мм.}$$



При  $a_k - a = 1,160 - 1,0 = 0,160$  по номограмме (рис. 87)

$$\frac{r_k}{h_k} = 0,200;$$

$$r_k = 0,200 h_k = 0,200 \cdot 25,4 = 5,1 \text{ мм.}$$

В заключение обратим внимание на следующее обстоятельство.

Из рис. 68 видно, что сторона  $c$  квадратного сечения, выходящего из калибра, равна:

$$c = \frac{b_k}{\sqrt{2}}$$

или

$$c = \frac{a_k h_k}{\sqrt{2}}.$$

Отсюда

$$h_k = \frac{\sqrt{2} c}{a_k}.$$

Но по равенству (23—III)

$$\frac{r_k}{h_k} = 1,22 (a_k - a).$$

Подставляя сюда  $h_k$ , выраженное предыдущим равенством, получим:

$$\frac{r_k}{c} = \sqrt{2} \cdot 1,22 \left(1 - \frac{a}{a_k}\right),$$

или

$$\frac{r_k}{c} = 1,72 \left(1 - \frac{1}{1,160}\right).$$

Для случая задачи, решенной в примере 20, имеем:

$$\frac{r_k}{c} = 1,72 \left(1 - \frac{1}{1,160}\right) \approx 0,213.$$

Но по номограмме (рис. 69) непосредственно получаем, что  $\frac{r_k}{c} = 0,213$ .

Далее, по номограмме (рис. 31) найдем, что при  $a = 1,0$  отношение  $\frac{r_k^2}{\omega_k} = 0,035$ . Отсюда

$$r_k = \sqrt{0,035 \omega_k} = \sqrt{0,035 \cdot 408,0} \approx 4,0 \text{ мм.}$$

Таким образом, для вычисления геометрических элементов квадратного калибра можно пользоваться любой из номограмм, изображенных на рис. 31, 69 и 87, поскольку зависимости, по которым они построены, вытекают одна из другой.

### § 15. Поправочный коэффициент уширения при прокатке квадратных полос в шестиугольных калибрах и шестиугольных полос в квадратных калибрах

Рассматривая конструкцию шестиугольного калибра (см. рис. 85), легко понять, что когда прокатка осуществляется только на горизонтальных участках калибра  $AB$  и  $A'B'$ , поправочный коэффициент уширения равен единице. Это следует из того, что в таком случае прокатка осуществляется на гладкой бочке и, следовательно, стесняющее действие наклонных участков калибра ( $ACA'$  и  $BC'B'$ ) отсутствует.

Рассмотрим теперь более сложный случай, когда степень заполнения калибра такова, что в деформации участвуют наклонные стенки калибра.

В § 12 было указано, что отношение осей в шестиугольных калибрах изменяется от 2,5 до 4,0. При степени заполнения  $i = 0,98$ , обычно применяющейся на практике, этому соответствует отношение осей шестиугольных полос 2,25—3,75. При указанном отношении осей шестиугольный калибр можно рассматривать как ящичный калибр, выпуск которого равен 100%. Стесняющее действие ящичных калибров невелико, так как в них на большей части периметра полоса подвергается только прямому давлению, перпендикулярному горизонтальной оси полосы. В таких калибрах роль бокового давления, приложенного к полосе, по ее наклонным граням относительно невелика по сравнению с прямым давлением даже при условии, если степень заполнения калибра равна 1,0. Когда же степень заполнения меньше единицы, стесняющее действие наклонных граней

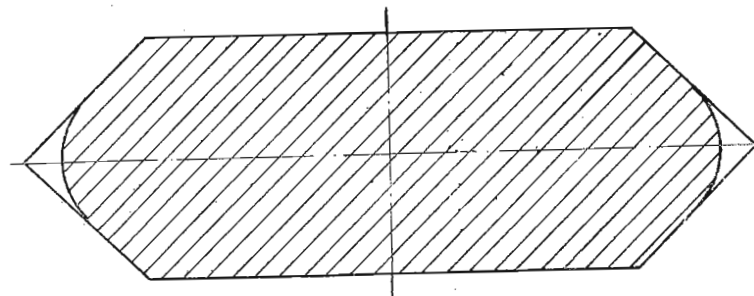


Рис. 88. Шестиугольная полоса в калибре при степени заполнения  $i = 0,98$

уменьшается еще больше в связи с уменьшением поверхности, по которой происходит соприкосновение полосы с наклонными гранями. Это наглядно иллюстрирует рис. 88, на котором изоб-

ражен шестиугольный калибр и полоса при степени заполнения калибра 0,98.

Таким образом, на основании изложенного можно принять, что в первом приближении при прокатке квадратных полос в шестиугольных калибрах поправочный коэффициент уширения равен единице.

Попытаемся теперь оценить величину поправочного коэффициента уширения при прокатке в квадратных калибрах.

На рис. 89 приведены кривые, выражающие зависимость  $\frac{h_K^2}{\omega_K}$  от отношения осей шестиугольного и овального калибров.

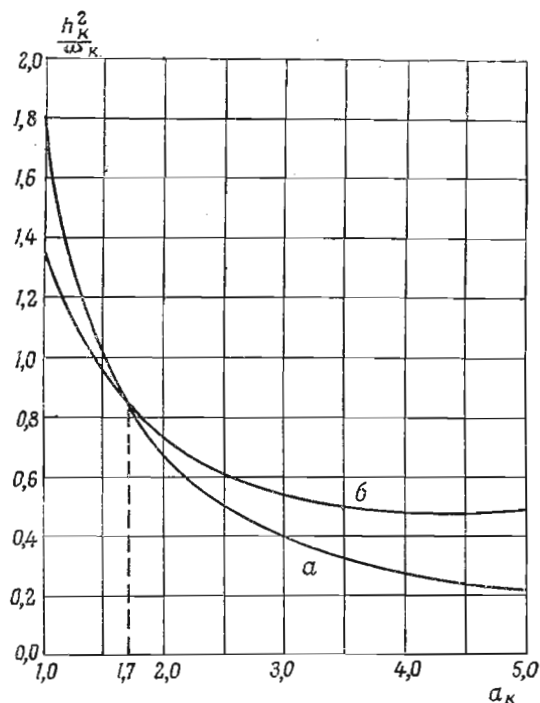


Рис. 89. Зависимость  $\frac{h_K^2}{\omega_K}$  от отношения осей для шестиугольного (а) и овального (б) калибров

Рис. 89 показывает, что указанные кривые пересекаются при отношении осей калибра 1,7.

Пусть у овального и шестиугольного калибров оси одинаковы по величине. Тогда их отношения тоже одинаковы. При этом,

когда  $a_K < 1,7$ , площадь овала будет больше площади шестиугольника. Если же  $a_K > 1,7$ , то площадь овала меньше площади шестиугольника. Это видно из рис. 90, где изображены наложенные друг на друга шестиугольные и овальные сечения.

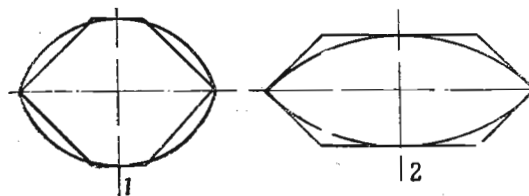


Рис. 90. Овальные и шестиугольные сечения, положенные друг на друга: 1 — отношение осей равно 1,3; 2 — отношение осей равно 2,25

Как уже было сказано, отношение осей шестиугольных калибров обычно находится в пределах 2,5 — 4,0, вследствие чего в практических условиях площадь поперечного сечения шестиугольных полос больше площади поперечного сечения овальных полос, конечно, при условии, что оси их одинаковы.

На рис. 91 показаны сечения шестиугольной и овальной полос при задаче их в квадратный калибр. Рисунок наглядно показывает, что условия деформации овальных и шестиугольных полос весьма схожи. Главное различие заключается в следующем.

Если в одном и том же квадратном калибре прокатать овальную и шестиугольную полосы с равновеликими осями, то стесняющее действие квадратного калибра при прокатке шестиугольной полосы будет больше, чем при прокатке овальной полосы. Это следует из того, что площадь поперечного сечения шестиугольной полосы больше, чем овальной.

Таким образом, при прочих равных условиях опасность переполнения квадратного калибра при прокатке шестиугольных полос больше, чем при прокатке овальных полос.

Рассматривая номограмму (рис. 59), видим, что при прокатке овальных полос с отношением осей от 2,25 до 3,75 (которое соответствует отношению осей калибра 2,5—4,0) поправочный коэффициент уширения лежит в пределах от 0,82 до 0,97, т. е.

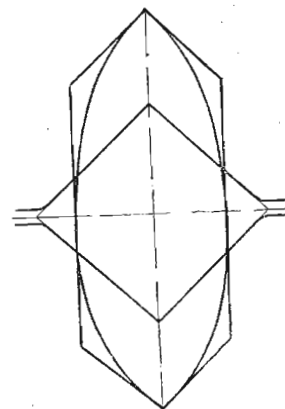


Рис. 91. Шестиугольная и овальная полосы при задаче их в квадратный калибр

верхний предел весьма близок к единице. На основании производенного анализа можно сделать вывод: чтобы избежать переполнения квадратных калибров при прокатке шестиугольных полос, поправочный коэффициент уширения следует брать равным единице.

Итак, при расчете калибровки системы шестиугольник—квадрат поправочный коэффициент уширения в первом приближении можно принимать равным единице.

## § 16. Расчет калибров системы шестиугольник—квадрат

Формулы для расчета деформации полосы в системе шестиугольник—квадрат аналогичны формулам для расчета деформации полосы в системе овал—квадрат. Однако в связи с тем, что для указанной системы калибров поправочный коэффициент уширения численно равен единице, расчет калибров несколько упрощается.

При расчете системы шестиугольник—квадрат, как и при расчете системы овал—квадрат, возможны следующие четыре случая.

1. По размерам данной квадратной полосы (большого сечения) рассчитать следующую шестиугольную (меньшего сечения).

При этом согласно равенствам (27—I) и (30—I), принимая во внимание, что  $k_i = 1$ , имеем:

$$\Delta h = \frac{(a_1 - 1) h_0}{a_1 + \frac{\Delta b}{\Delta h}} \quad \text{и} \quad \Delta h_c = \frac{(a_1 - 1) h_{0c}}{a_1 + \frac{\Delta b_c}{\Delta h_c}},$$

где

$$h_0 = b_0 \quad \text{и} \quad \frac{\Delta b}{\Delta h} = \frac{\Delta b_c}{\Delta h_c}.$$

2. По размерам данной квадратной полосы (меньшего сечения) рассчитать предыдущую шестиугольную (большого сечения).

В этом случае согласно равенствам (29—I) и (32—I), принимая во внимание, что  $k_i = 1$ , получаем:

$$\Delta h = \frac{(a_0 - 1) h_1}{1 + a_0 \frac{\Delta b}{\Delta h}} \quad \text{и} \quad \Delta h_c = \frac{(a_0 - 1) h_{1c}}{1 + a_0 \frac{\Delta b_c}{\Delta h_c}},$$

где

$$h_1 = b_1 \quad \text{и} \quad \frac{\Delta b_c}{\Delta h_c} = \frac{\Delta b}{\Delta h}.$$

3. По размерам данной шестиугольной полосы (большого сечения) рассчитать следующую квадратную (меньшего сечения). При этом согласно равенствам (27—I) и (30—I), принимая во внимание, что  $k_i = 1$ , получаем:

$$\Delta h = \frac{a_1 h_0 - b_0}{a_1 + \frac{\Delta b}{\Delta h}} \quad \text{и} \quad \Delta h_c = \frac{a_1 h_{0c} - b_{0c}}{a_1 + \frac{\Delta b_c}{\Delta h_c}},$$

где

$$h_0 = h_{0c}; \quad b_0 = b_{0c}; \quad \frac{\Delta b}{\Delta h} = \frac{\Delta b_c}{\Delta h_c}; \quad a_1 = 1.$$

4. По размерам данной шестиугольной полосы (меньшего сечения) рассчитать предшествующую квадратную (большого сечения). При этом согласно равенствам (29—I) и (32—I), принимая во внимание, что  $k_i = 1$ , получаем:

$$\Delta h = \frac{a_0 b_1 - h_1}{1 + a_0 \frac{\Delta b}{\Delta h}} \quad \text{и} \quad \Delta h_c = \frac{a_0 b_{1c} - h_{1c}}{1 + a_0 \frac{\Delta b_c}{\Delta h_c}},$$

где

$$h_1 = h_{1c}; \quad b_1 = b_{1c}; \quad \frac{\Delta b}{\Delta h} = \frac{\Delta b_c}{\Delta h_c}; \quad a_0 = 1.$$

**ПРИМЕР 22.** Рассчитать шестиугольный калибр по следующим данным. Сторона поступающей в калибр квадратной полосы  $h_0 = b_0 = 30$  мм. Отношение осей выходящей из калибра шестиугольной полосы  $a_1 = 2,5$ . Степень заполнения шестиугольного калибра  $i = 0,98$ . Начальный диаметр валков  $D = 300$  мм. Коэффициент трения при прокатке  $\mu = 0,3$ .

1. Рассчитываем уширение полосы при прокатке на гладкой бочке.

Предварительно задаемся  $\frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,75$ .

По формуле (27—I):

$$\Delta h = \frac{a_1 h_0 - b_0}{a_1 + \frac{\Delta b}{\Delta h}} = \frac{(2,5 - 1) 30}{2,5 + 0,75} = 13,9 \text{ мм};$$

$$h_1 = h_0 - \Delta h = 30,0 - 13,9 = 16,1 \text{ мм};$$

$$D_p = D - h_1 = 300,0 - 16,1 = 284 \text{ мм};$$

$$\frac{\Delta h}{h_0} = \frac{13,9}{30,0} = 0,46; \quad \frac{D_p}{h_0} = \frac{284,0}{30,0} = 9,5;$$

$$\frac{b_0}{h_0} = \frac{30,0}{30,0} = 1,0.$$

По формуле (22—I) или по номограмме (рис. 14):

$$\frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,87.$$

2. Находим поправочный коэффициент уширения.

При прокатке квадратной полосы в шестиугольном калибре:

$$k_i = 1,0.$$

3. Определяем коэффициент уширения при прокатке в калибре:

$$\frac{\Delta b_c}{\Delta h_c} = k_i \frac{\Delta b}{\Delta h} = 1,0 \cdot 0,87 = 0,87.$$

4. Рассчитываем деформацию полосы при прокатке в калибре по формуле (30—I):

$$\Delta h_c = \frac{a_1 h_{0c} - b_{0c}}{a_1 + \frac{\Delta b_c}{\Delta h_c}} = \frac{(2,5 - 1) 30}{2,5 + 0,87} = 13,3 \text{ мм};$$

$$\Delta b_c = \frac{\Delta b_c}{\Delta h_c} \Delta h_c = 0,87 \cdot 13,3 = 11,6 \text{ мм};$$

$$h_{1c} = h_{0c} - \Delta h_c = 30,0 - 13,3 = 16,7 \text{ мм};$$

$$b_{1c} = b_{0c} + \Delta b_c = 30,0 + 11,6 = 41,6 \text{ мм}.$$

Проверка:

$$a_1 = \frac{b_{1c}}{h_{1c}} = \frac{41,6}{16,7} = 2,5;$$

$$\omega_1 = b_{1c} h_{1c} = 41,6 \cdot 16,7 = 695 \text{ мм}^2.$$

5. Определяем размеры калибра:

$$\omega_K = \frac{\omega_1}{i} = \frac{695}{0,98} = 709 \text{ мм}^2.$$

По номограмме (рис. 86):

$$a_K = 2,75.$$

По номограмме (рис. 84):

$$\frac{h_K^2}{\omega_K} = 0,50,$$

откуда:

$$h_K = \sqrt{0,50 \omega_K} = \sqrt{0,50 \cdot 709,0} = 18,8 \text{ мм};$$

$$b_K = a_K h_K = 2,75 \cdot 18,8 = 51,8 \text{ мм}.$$

По номограмме (рис. 87) при  $a_K - a = 0,25$ :

$$\frac{r_K}{h_K} = 0,30,$$

откуда:

$$r_K = 0,30 h_K = 0,30 \cdot 18,8 = 5,64 \approx 6 \text{ мм}.$$

ПРИМЕР 23. Рассчитать шестиугольный калибр по следующим данным. Сторона полосы, выходящей из квадратного калибра, следующего за шестиугольным, равна  $h_1 = b_1 = 30 \text{ мм}$ . Отношение осей шестиугольной полосы  $a_0 = 2,5$ . Степень заполнения шестиугольного калибра  $i = 0,98$ . Начальный диаметр валков  $D = 300 \text{ мм}$ . Коэффициент трения при прокатке  $\mu = 0,3$ .

1. Рассчитываем уширения полосы при прокатке на гладкой бочке.

Предварительно задаемся  $\frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,5$ .

По формуле (29—I):

$$\Delta h = \frac{a_0 b_1 - h_1}{1 + a_0 \frac{\Delta b}{\Delta h}} = \frac{2,5 \cdot 30,0 - 30,0}{1 + 2,5 \cdot 0,5} = 20 \text{ мм};$$

$$h_0 = h_1 + \Delta h = 30,0 + 20,0 = 50,0 \text{ мм};$$

$$D_p = D - h_1 = 300,0 - 30,0 = 270,0 \text{ мм};$$

$$\frac{\Delta h}{h_0} = \frac{20,0}{50,0} = 0,40; \quad \frac{D_p}{h_0} = \frac{270,0}{50,0} = 5,4;$$

$$\frac{b_0}{h_0} = \frac{1}{a_0} = \frac{1}{2,5} = 0,4.$$

По формуле (22—I) или по номограмме (рис. 14)

$$\frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,20.$$

2. При прокатке шестиугольной полосы в квадратном калибре:

$$k_i = 1,0.$$

3. Определяем коэффициент уширения при прокатке в калибре

$$\frac{\Delta b_c}{\Delta h_c} = k_i \frac{\Delta b}{\Delta h} = 1,0 \cdot 0,20 = 0,20.$$

4. Рассчитываем деформацию полосы при прокатке в калибре по формуле (32—I):

$$\Delta h_c = \frac{a_0 b_{1c} - h_{1c}}{1 + a_0 \frac{\Delta b_c}{\Delta h_c}} = \frac{2,5 \cdot 30,0 - 30,0}{1 + 2,5 \cdot 0,20} = 30 \text{ мм};$$

$$\Delta b_c = \frac{\Delta b_c}{\Delta h_c} \Delta h_c = 0,20 \cdot 30,0 = 6,0 \text{ мм};$$

$$b_{0c.п} = h_{0c} = h_{1c} + \Delta h_c = 30,0 + 30,0 = 60,0 \text{ мм};$$

$$h_{0c.п} = b_{0c} = b_{1c} - \Delta b_c = 30,0 - 6,0 = 24,0 \text{ мм}.$$

Проверка:

$$a_0 = \frac{b_{0c.п}}{h_{0c.п}} = \frac{60,0}{24,0} = 2,5;$$

$$\omega_0 = b_{0c.п} h_{0c.п} = 60,0 \cdot 24,0 = 1440 \text{ мм}^2.$$

5. Определяем размеры калибра:

$$\omega_K = \frac{\omega_0}{i} = \frac{1440}{0,98} = 1470 \text{ мм}^2.$$

По номограмме (рис. 86):

$$a_K = 2,75.$$

По номограмме (рис. 84):

$$\frac{h_K^2}{\omega_K} = 0,50,$$

откуда:

$$h_K = \sqrt{0,50 \omega_K} = \sqrt{0,50 \cdot 1470} = 27,1 \text{ мм};$$

$$b_K = a_K h_K = 2,75 \cdot 27,1 = 74,5 \text{ мм}.$$

По номограмме (рис. 87) при  $a_K - a = 0,25$ :

$$\frac{r_K}{h_K} = 0,80,$$

откуда:

$$r_K = 0,80 h_K = 0,80 \cdot 27,1 = 21,7 \text{ мм}.$$

**ПРИМЕР 24.** Рассчитать квадратный калибр, следующий за рассчитанным в примере 22 шестиугольным калибром. Степень заполнения квадратного калибра  $i = 0,98$ . Коэффициент трения при прокатке  $\mu = 0,3$ . Начальный диаметр валков  $D = 300 \text{ мм}$ .

1. Рассчитываем уширение полосы при прокатке на гладкой бочке.

Предварительно задаемся  $\frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,25$ .

По формуле (27—I):

$$\Delta h = \frac{a_1 h_0 - b_0}{a_1 + \frac{\Delta b}{\Delta h}} = \frac{1,0 \cdot 41,6 - 16,7}{1,0 + 0,25} = 20 \text{ мм};$$

$$h_1 = h_0 - \Delta h = 41,6 - 20 = 21,6 \text{ мм};$$

$$D_p = D - h_1 = 300,0 - 21,6 \approx 278,0 \text{ мм};$$

$$\frac{\Delta h}{h_0} = \frac{20,0}{41,6} = 0,48; \quad \frac{D_p}{h_0} = \frac{278,0}{41,6} = 6,7;$$

$$\frac{b_0}{h_0} = \frac{16,7}{41,6} = 0,4.$$

По формуле (22—I) или по номограмме (рис. 14):

$$\frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,26.$$

2. При прокатке шестиугольной полосы в квадратном калибре

$$k_i = 1,0.$$

3. Определяем коэффициент уширения при прокатке в калибре

$$\frac{\Delta b_c}{\Delta h_c} = k_i \frac{\Delta b}{\Delta h} = 1,0 \cdot 0,26 = 0,26.$$

4. Рассчитываем деформацию полосы при прокатке в калибре по формуле (30—I):

$$\Delta h_c = \frac{a_1 h_{0c} - b_{0c}}{a_1 + \frac{\Delta b_c}{\Delta h_c}} = \frac{1,0 \cdot 41,6 - 16,7}{1,0 + 0,26} = 19,8 \text{ мм};$$

$$\Delta b_c = \frac{\Delta b_c}{\Delta h_c} \Delta h_c = 0,26 \cdot 19,8 = 5,1 \text{ мм};$$

$$h_{1c} = h_{0c} - \Delta h_c = 41,6 - 19,8 = 21,8 \text{ мм};$$

$$b_{1c} = b_{0c} + \Delta b_c = 16,7 + 5,1 = 21,8 \text{ мм};$$

$$\omega_1 = b_{1c} h_{1c} = 21,8 \cdot 21,8 \approx 475 \text{ мм}^2.$$

5. Определяем размеры калибра:

$$\omega_K = \frac{\omega_1}{i} = \frac{475}{0,98} = 485 \text{ мм}^2.$$

По номограмме (рис. 86):

$$a_K = 1,16.$$

По номограмме (рис. 84):

$$\frac{h_K^2}{\omega_K} = 1,52,$$

откуда:

$$h_K = \sqrt{1,52 \omega_K} = \sqrt{1,52 \cdot 485} = 27,2 \text{ мм};$$

$$b_K = a_K h_K = 1,16 \cdot 27,2 = 31,5 \text{ мм}.$$

По номограмме (рис. 87) при  $a_K - a = 0,16$ :

$$\frac{r_K}{h_K} = 0,2,$$

откуда:

$$r_k = 0,2 h_k = 0,2 \cdot 27,2 = 5,4 \text{ мм.}$$

ПРИМЕР 25. Рассчитать квадратный калибр, предшествующий рассчитанному в примере 23 шестиугольному калибру. Степень заполнения квадратного калибра  $i = 0,98$ . Начальный диаметр валков  $D = 300 \text{ мм}$ . Коэффициент трения при прокатке  $\alpha = 0,3$ .

1. Рассчитываем уширение при прокатке на гладкой бочке.

$$\text{Предварительно задаем } \frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,5.$$

По формуле (29—I):

$$\Delta h = \frac{a_0 b_1 - h_1}{1 + a_0 \frac{\Delta b}{\Delta h}} = \frac{1,0 \cdot 60,0 - 24,0}{1 + 1,0 \cdot 0,5} = 24,0 \text{ мм;}$$

$$h_0 = h_1 + \Delta h = 24,0 + 24,0 = 48,0 \text{ мм;}$$

$$D_p = D - h_1 = 300,0 - 24,0 = 276,0 \text{ мм;}$$

$$\frac{\Delta h}{h_0} = \frac{24,0}{48,0} = 0,50; \quad \frac{D_p}{h_0} = \frac{276,0}{48,0} = 5,75; \quad \frac{b_0}{h_0} = 1,0.$$

По формуле (22—I) или по номограмме (рис. 14):

$$\frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,58.$$

2. Поправочный коэффициент уширения при прокатке квадратной полосы в шестиугольном калибре

$$k_i = 1,0.$$

3. Определяем коэффициент уширения при прокатке в калибре

$$\frac{\Delta b_c}{\Delta h_c} = k_i \frac{\Delta b}{\Delta h} = 1,0 \cdot 0,58 = 0,58.$$

4. Рассчитываем деформацию полосы при прокатке в калибре по формуле (32—I):

$$\Delta h_c = \frac{a_0 b_{1c} - h_{1c}}{1 + a_0 \frac{\Delta b_c}{\Delta h_c}} = \frac{1,0 \cdot 60,0 - 24,0}{1 + 1,0 \cdot 0,58} = 22,8 \text{ мм;}$$

$$\Delta b_c = \frac{\Delta b_c}{\Delta h_c} \Delta h_c = 0,58 \cdot 22,8 = 13,4 \text{ мм;}$$

$$b_{0\cdot n} = h_{0\cdot n} = h_{1c} + \Delta h_c = 24,0 + 22,8 = 46,8 \text{ мм;}$$

$$h_{0\cdot n} = b_{0\cdot n} = b_{1c} - \Delta b_c = 60,0 - 13,4 = 46,8 \text{ мм;}$$

$$\omega_0 = b_{0\cdot n} h_{0\cdot n} = 46,8 \cdot 46,8 = 2185 \text{ мм}^2.$$

5. Определяем размеры калибра:

$$\omega_k = \frac{\omega_0}{i} = \frac{2185}{0,98} = 2235 \text{ мм}^2.$$

По номограмме (рис 86):

$$a_k = 1,16.$$

По номограмме (рис. 84):

$$\frac{h_k^2}{\omega_k} = 1,52;$$

$$h_k = \sqrt{1,52 \omega_k} = \sqrt{1,52 \cdot 2235} = 58,4 \text{ мм;}$$

$$b_k = a_k h_k = 1,16 \cdot 58,4 = 73,5 \text{ мм.}$$

По номограмме (рис. 87) при  $a_k - a = 0,16$ :

$$\frac{r_k}{h_k} = 0,20.$$

откуда:

$$r_k = 0,20 h_k = 0,20 \cdot 58,4 = 11,7 \text{ мм.}$$

## § 17. Предельное и оптимальное отношение осей шестиугольного калибра

Для системы шестиугольник — квадрат таким же путем, как и для системы овал — квадрат (§ 10), получим следующие соотношения:

$$\frac{h_{0c}}{D} = \frac{1}{1 + \frac{\cos \alpha_{ш}}{1 - \cos \alpha_{ш}} \left( \frac{\Delta h_c}{h_{0c}} \right)_{ш}}; \quad (25\text{—III})$$

$$\frac{h_{1c}}{D} = \frac{1}{1 + \frac{1}{1 - \cos \alpha_{ш}} \left( \frac{\Delta h_c}{h_{1c}} \right)_{ш}}, \quad (26\text{—III})$$

где  $\alpha_{ш}$  — предельный угол захвата в шестиугольном калибре;  
 $\left( \frac{\Delta h_c}{h_{0c}} \right)_{ш}$  — относительное обжатие полосы квадратного сечения в шестиугольном калибре.  
 $\left( \frac{\Delta h_c}{h_{1c}} \right)_{ш}$

Равенство (25—III) дает возможность определять зависимость между предельным отношением осей шестиугольной полосы и отношением высоты квадратного сечения, задаваемого в шестиугольный калибр, к диаметру валков.

Равенство (26—III) позволяет определить зависимость между предельным отношением осей шестиугольной полосы и отноше-

нием высоты сечения, выходящего из шестиугольного калибра, к диаметру валков.

Соответствующие зависимости для случая прокатки шестиугольных полос в квадратных калибрах определяются по равенствам (18—III) и (20—III).

Предельные углы захвата при прокатке квадратных полос в шестиугольных калибрах и шестиугольных полос в квадратных калибрах специальным исследованием, повидимому, не подвергались. Практические данные, касающиеся углов захвата при прокатке в указанных калибрах, также немногочисленны. Пока величину предельных углов захвата в системе шестиугольник — квадрат можно в первом приближении полагать равной величине предельных углов захвата в системе овал — квадрат.

Далее, как уже упоминалось, шестиугольные калибры имеют обычно большое отношение осей, величина которого достигает 4,0. При этом поправочный коэффициент уширения можно полагать равным единице. Но при указанном отношении осей овального калибра поправочный коэффициент уширения в овальных и квадратных калибрах также близок к единице. Отсюда следует, что приближенно предельное отношение осей шестиугольной полосы можно определять по соответствующим номограммам, которые были получены для системы овал — квадрат (рис. 70—74).

На основании опытных данных, приведенных в § 11 настоящей главы, можно утверждать, что при прокатке в системе шестиугольник — квадрат существует также оптимальное отношение осей шестиугольной полосы (калибра), при котором в данных условиях прокатки вытяжка имеет максимальную величину по сравнению со всеми другими ее значениями, получаемыми при иных (больших или меньших по величине) значениях отношения осей полосы. Повидимому, оптимальное отношение осей шестиугольной полосы лежит в области малых значений  $\frac{h_0}{D}$ , не имеющих для случая прокатки в системе шестиугольник — квадрат практического значения.

## § 18. Характеристика систем овал—круг

Первые опыты, проведенные с целью изучения и последующего внедрения калибровки овал — круг, производились Харьковским институтом металлов в 1932—33 гг. [24]. Изучению подвергались системы овальных и круглых калибров, приведенные на рис. 92. Было установлено, что при задаче круга в нормальный овал (рис. 92, а) особых затруднений при захвате металла не возникает. При задаче же нормального овала в круглый калибр уже при вытяжке, равной 1,3—1,4, возникают затруднения при захвате. Это связано с тем, что в момент захвата площадь соприкосновения полосы и калибра относительно невели-

ка. При меньшей вытяжке захват осуществляется без затруднений.

Таким образом, в системе овал — круг при нормальной конструкции овального калибра, образованного двумя круговыми дугами, и степени заполнения калибра, равной единице, нельзя

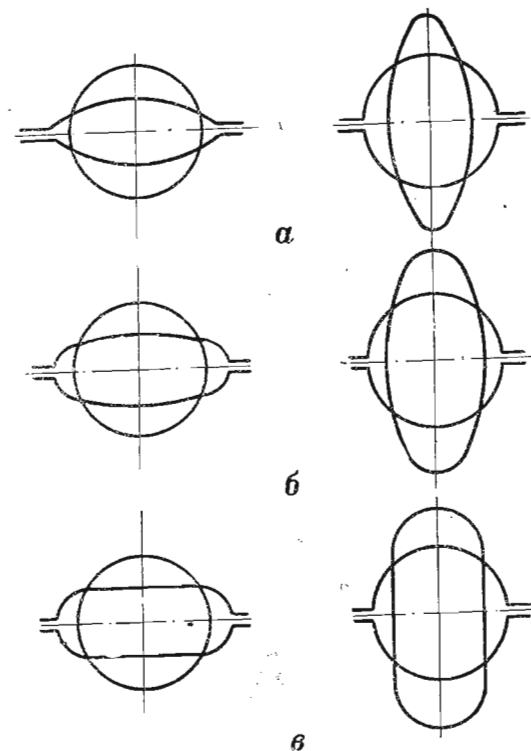


Рис. 92. Калибровка в системе овал — круг:  
а — нормальный овальный калибр; б — эллиптический овальный калибр; в — усеченный овальный калибр

обеспечить столь больших вытяжек, как в системах овал — квадрат и шестиугольник — квадрат.

Для улучшения условий захвата кромки овальной полосы следует притуплять. Этого можно достичь путем некоторого незаполнения овального калибра или же путем применения, как это предлагает Харьковский институт металлов, эллиптических (рис. 92, б) и усеченных овальных калибров с прямыми боками (рис. 92, в). Притупления кромок овальной полосы не только



улучшают захват ее, но обеспечивают относительно равномерное обжатие полосы по ширине.

Коэффициент вытяжки при прокатке круга в овале и овала в круге обычно равен 1,3—1,5.

Коэффициент вытяжки круга в овале можно было бы довести до двух, если бы не лимитировали условия захвата при прокатке получаемой овальной полосы в последующем круглом калибре.

В системе овал — круг кантовка круглой полосы на 45° перед задачей ее в овальный калибр необязательна. Передача полосы из круглого калибра в овальный осуществляется без затруднений.

Калибровка овал — круг чаще всего применяется для прокатки качественного металла. Объясняется это следующими обстоятельствами:

1) при прокатке качественных сталей проблема получения больших вытяжек по проходам не имеет такого первостепенного значения, как при прокатки сталей рядовых марок;

2) отсутствие острых ребер на полосе обеспечивает равномерное остывание ее по всему периметру поперечного сечения, что уменьшает опасность образования морщин и трещин;

3) круглые калибры выполняют роль ребровых пропусков; круглая и овальная формы прокатываемых полос облегчают удаление окалины с поверхности их и обеспечивают получение полос с чистой поверхностью;

4) обжатие круглых полос в овальных калибрах и овальных полос в круглых калибрах более равномерно по ширине их, чем при прокатке в системах овал — квадрат и шестиугольник — квадрат; поэтому при прокатке в системе овал — круг внутренние напряжения в прокатываемой полосе меньше, чем при прокатке в других вытяжных системах, что также благоприятно отражается на качестве металла.

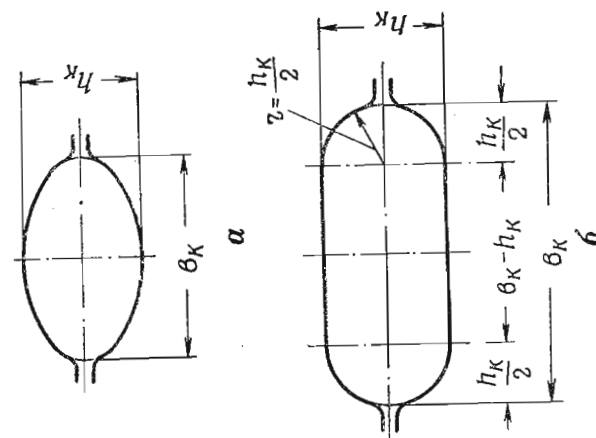
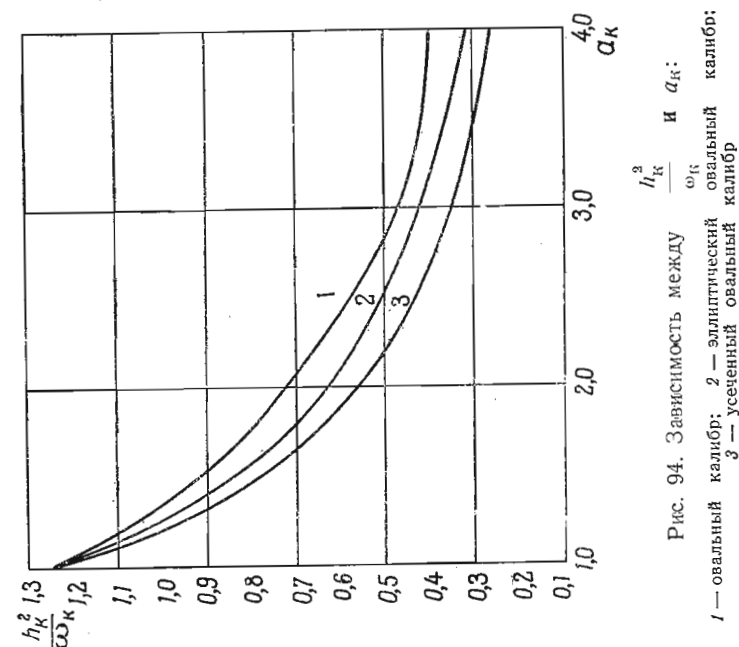
### § 19. Геометрические соотношения в овальном, эллиптическом и усеченном овальном калибрах

На рис. 93 приведены эллиптический и усеченный овальный калибры, а также даны обозначения размеров.

Для эллиптического калибра имеем такие соотношения:

$$\omega_k = \frac{\pi}{4} h_k b_k;$$

$$\frac{\omega_k}{h_k^2} = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{b_k}{h_k};$$



$$\frac{h_R^2}{\omega_R} = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{1}{\frac{b_R}{h_R}}$$

и окончательно:

$$\frac{h_R^2}{\omega_R} = \frac{1,273}{a_K} \quad (27-III)$$

Для усеченного овального калибра имеем такие соотношения:

$$\begin{aligned} \omega_K &= (b_K - h_K) h_K + \frac{\pi h_K^2}{4}; \\ \omega_K &= b_K h_K - h_K^2 \left(1 - \frac{\pi}{4}\right); \\ \frac{\omega_K}{h_K^2} &= \frac{b_K}{h_K} - 0,215 \end{aligned}$$

и окончательно:

$$\frac{h_R^2}{\omega_R} = \frac{1}{a_K - 0,215} \quad (28-III)$$

По формулам (27—III) и (28—III) построены кривые, изображенные на рис. 94. На этом же рисунке построена для сравнения соответствующая кривая, выражающая зависимость между  $\frac{h_R^2}{\omega_R}$  и  $a_K$  для нормального овала.

## § 20. Зависимость между отношением осей калибра, степенью заполнения и отношением осей полосы в системах овал—круг

Зависимость между отношением осей полосы, отношением осей калибра и степенью заполнения для нормальных овалов была установлена ранее (рис. 67), а для эллиптических и усеченных овальных калибров она легко получается графическим методом по способу, описанному в § 6 настоящей главы. Соответствующие номограммы изображены на рис. 95 и 96.

Заметим, что при отношении осей калибра  $a = 1$  и любой данной степени заполнения отношение осей полосы можно определять по любой из номограмм, изображенных на рис. 67, 95 и 96.

По всем указанным номограммам получим одинаковое значение отношения осей полосы. Это объясняется тем, что при  $a_K = 1$  площадь нормального овала и эллипса обращается в круг.

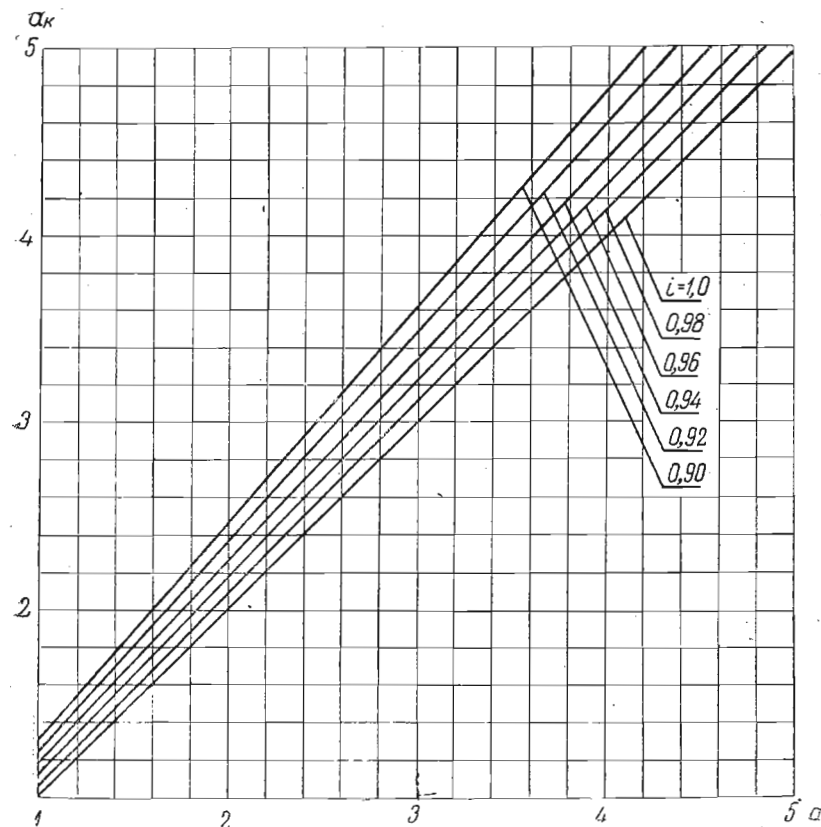


Рис. 95. Зависимость между отношением осей полосы, отношением осей эллиптического калибра и степенью его заполнения

## § 21. Поправочный коэффициент уширения при прокатке круглых полос в овальных калибрах и овальных полос в круглых калибрах

В табл. 10, 11 и 12 дан анализ калибровок для прокатки кругов диаметром 20 и 16 мм из сталей марок 3ХВГ и ШХ15, произведенный нами по данным одного из заводов. На рис. 97, 98 и 99 приведены поперечные сечения полос по проходам. По этим данным была построена зависимость коэффициента относительного уширения от отношения осей овальных полос (рис. 100) и рабочая номограмма для определения поправочного коэффициента уширения при прокатке круглых полос в овальных калибрах при степени заполнения  $i = 0,88 - 0,93$  (рис. 101).

Для других степеней заполнения номограмма не построена, поскольку в практических условиях в системах овал—круг прокатку производят в незаполненных калибрах в связи с плохими условиями захвата (см. § 18).

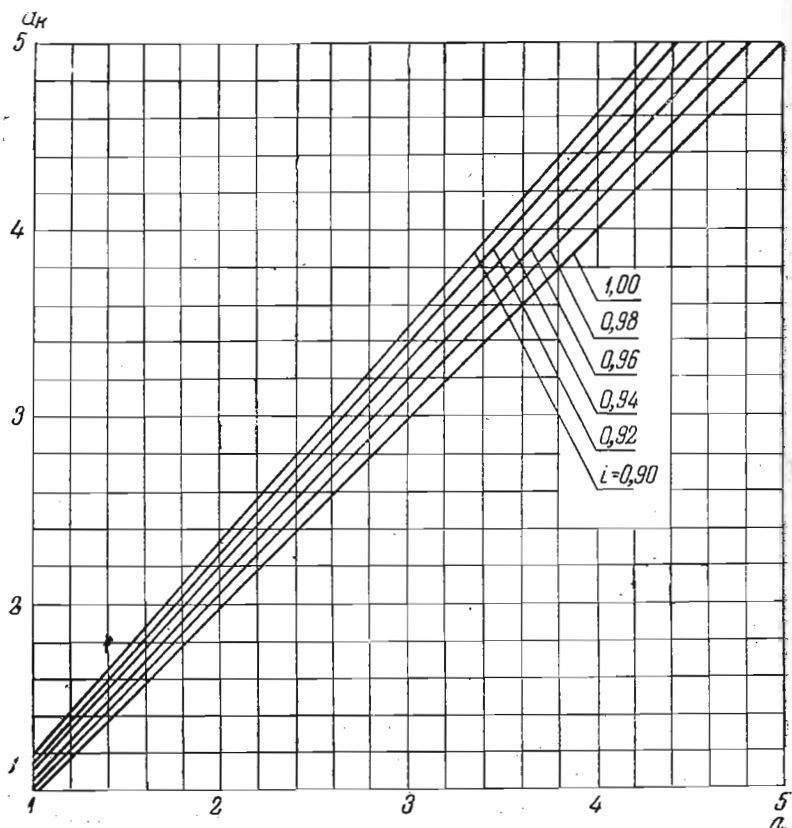


Рис. 96. Зависимость между отношением осей полосы, отношением осей усеченного овального калибра и степенью его заполнения

По данным табл. 10, 11 и 12 построены кривые, характеризующие зависимость коэффициента относительного уширения от отношения осей, задаваемых в круглые калибры овальных полос (рис. 102), и кривая, характеризующая поправочный коэффициент уширения при степени заполнения  $i = 0,97 - 1,0$  (рис. 103). Из рис. 103 видно, что поправочный коэффициент уширения при прокатке овальных полос в круглых калибрах близок к единице при любом отношении осей овальных полос, задаваемых в круглый

Анализ калибровки системы круг—овал для прокатки круга диаметром 16 мм из стали марки ШХ15

Порядок прокатки	Д а н н ы е   п р а к т и к и								А н а л и з   к а л и б р о в к и							
	$h_0$ мм	$b_0$ мм	$h_1$ мм	$b_1$ мм	$a_0$	$a_1$	$\omega_0$ мм <sup>2</sup>	$\omega_1$ мм <sup>2</sup>	$a_K$	$\frac{h_K^2}{\omega_K}$	$\omega_K$ мм <sup>2</sup>	$i$	$h_{0C}$ мм	$b_{0C}$ мм	$h_{1C}$ мм	$b_{1C}$ мм
Квадрат—овал	36,5	36,3	25,7	43,2	0,998	1,68	1233	916	—	—	—	—	—	—	—	—
Овал—круг . .	25,7	43,2	31,5	30,1	1,68	0,957	916	771	1,00	1,273	778	~1,0	39,2	23,3	28,4	27,1
Круг—овал . .	30,1	31,5	18,3	39,3	1,050	2,150	771	570	2,75	0,517	648	0,88	27,1	28,4	16,25	35,0
Овал—круг . .	18,3	39,3	24,1	23,6	2,150	0,98	570	461	1,00	1,273	457	0,99	35,0	16,25	21,60	21,3
Круг—овал . .	23,6	24,1	13,7	32,5	1,020	2,37	461	338	2,83	0,51	368	0,92	21,3	21,6	11,95	28,3
Овал—круг . .	13,7	32,5	18,3	18,1	2,37	0,99	338	265	1,00	1,273	263	0,99	28,3	11,95	16,35	16,2
Круг—овал . .	18,1	18,3	13,9	21,5	1,01	1,55	265	228	1,85	0,760	255	0,895	16,20	16,35	12,1	18,75
Овал—круг . .	13,9	21,5	16,2	16,0	1,55	0,99	228	204	1,00	1,273	206	~1,0	18,75	12,10	14,35	14,2

Порядок проналки	Анализ калибровки				Результаты расчета для случая проналки на гладкой бочке											
	$\Delta h_c$ мм	$\Delta b_c$ мм	$\frac{\Delta b_c}{\Delta h_c}$	$\alpha$	$D_p$ мм	$h_0 = h_{0c}$ мм	$b_0 = b_{0c}$ мм	$h_1 = h_c$ мм	$\Delta h = \Delta h_c$ мм	$\frac{\Delta h}{h_0}$	$\frac{D_p}{h_0}$	$\frac{\Delta b}{\Delta h}$	$\Delta b$ мм	$b_1$ мм	$a_0$	$a_1$
Квадрат—овал	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Овал—круг . .	10,8	3,80	0,352	16°30'	272	39,2	23,30	28,4	10,8	0,276	9,60	0,363	6,6	29,9	1,68	1,050
Круг—овал . .	10,85	6,60	0,609	15°30'	284	27,1	28,40	16,25	10,85	0,40	10,48	0,82	8,9	37,3	1,05	2,30
Овал—круг . .	13,4	5,05	0,377	17°30'	278	35,0	16,25	21,60	13,40	0,383	7,96	0,30	8,7	24,95	2,15	1,160
Круг—овал . .	9,35	6,70	0,716	14°30'	288	21,3	21,60	11,95	9,35	0,44	13,52	1,010	9,45	31,05	1,02	2,60
Овал—круг . .	11,95	4,25	0,355	16°30'	284	28,3	11,95	16,35	11,95	0,423	10,04	0,37	9,80	21,75	2,37	1,33
Круг—овал . .	4,10	2,30	0,561	10°00'	288	16,20	16,35	12,10	4,10	0,253	17,86	0,810	3,3	19,65	1,01	1,62
Овал—круг . .	4,4	2,100	0,478	11°00'	286	18,75	12,10	14,35	4,4	0,235	15,26	0,465	5,5	17,6	1,55	1,23

Таблица 11

Анализ калибровки системы овал—круг для прокатки круга  
диаметром 20 мм из стали марки ЗХВГ

Порядок прокатки	Д а н н ы е   п р а к т и к и								Анализ калибровки		
	$h_0$	$b_0$	$h_1$	$b_1$	$a_0$	$a_1$	$\omega_0$	$\omega_1$	$a_K$	$\frac{h^2}{\omega_K}$	$\omega_K$
	мм	мм	мм	мм			мм <sup>2</sup>	мм <sup>2</sup>		мм <sup>2</sup>	
Квадрат—овал	38,4	38,4	26,9	45,0	1,0	1,675	1360	995	—	—	—
Овал—круг . .	26,9	45,0	32,5	31,5	1,675	0,97	995	805	1,0	1,273	830
Круг—овал . .	31,5	32,5	18,6	40,7	1,03	2,18	805	574	2,75	0,56	620
Овал—круг . .	18,6	40,7	24,5	23,8	2,18	0,97	574	470	1,0	1,273	472
Круг—овал . .	23,8	24,5	17,7	27,4	1,03	1,55	470	360	1,75	0,81	387
Овал—круг . .	17,7	27,4	20,4	20,4	1,55	1,00	360	327	1,0	1,273	327

Продолжение табл. 11

Порядок прокатки	А н а л и з   к а л и б р о в к и									$D_p$ мм
	$i$	$h_{0c}$ мм	$b_{0c}$ мм	$h_{1c}$ мм	$b_{1c}$ мм	$\Delta h_c$ мм	$\Delta b_c$ мм	$\frac{\Delta b_c}{\Delta h_c}$	$\alpha$	
Квадрат—овал	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Овал—круг . .	0,972	40,8	24,4	28,4	27,5	12,4	3,1	0,25	18°00'	272
Круг—овал . .	0,928	27,5	28,4	16,25	35,5	11,25	7,1	0,631	16°00'	284
Овал—круг . .	0,995	35,5	16,25	22,00	21,3	13,5	5,05	0,374	17°30'	278
Круг—овал . .	0,93	21,3	22,00	15,2	23,6	6,1	1,60	0,262	12°00'	275
Овал—круг . .	1,00	23,6	15,2	18,1	18,1	5,5	2,9	0,528	11°30'	282

Продолжение табл. 11

Порядок прокатки	Результаты расчета для случая прокатки на гладкой бочке										
	$h_0$ мм	$b_0$ мм	$h_1$ мм	$\Delta h$ мм	$\frac{\Delta h}{h_0}$	$\frac{D_p}{h_0}$	$\frac{\Delta b}{\Delta h}$	$\Delta b$ мм	$b_1$ мм	$a_0$	$a_1$
Квадрат—овал	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Овал—круг . .	40,8	24,4	28,4	12,4	0,304	6,6	0,293	3,6	28,0	1,675	0,99
Круг—овал . .	27,5	28,4	16,25	11,25	0,408	10,4	0,82	9,2	37,2	2,29	2,29
Овал—круг . .	35,5	16,25	22,0	13,5	0,380	7,8	0,300	4,0	20,25	2,18	0,925
Круг—овал . .	21,3	22,0	15,2	6,1	0,287	12,90	0,750	4,6	26,6	1,75	1,75
Овал—круг . .	23,6	15,2	18,1	5,5	0,303	12,00	0,483	2,6	17,8	1,55	0,99

Таблица 12

Анализ калибровки системы овал — круг для прокатки круга диаметром 16 мм из стали марки ЭР

Порядок прокатки	Данные практики								Анализ калибровки		
	$h_0$ мм	$b_0$ мм	$h_1$ мм	$b_1$ мм	$a_0$	$a_1$	$\omega_0$ мм <sup>2</sup>	$\omega_1$ мм <sup>2</sup>	$a_K$	$\frac{h_K^2}{\omega_K}$	$\omega_K$ мм <sup>2</sup>
Квадрат—овал	29,2	29,3	18	38,5	0,997	2,14	825	570	—	—	—
Овал—круг	18,0	38,5	24,8	21,6	2,14	0,87	570	432	1,0	1,273	483
Круг—овал	21,6	24,8	14,4	29,4	1,15	2,04	432	339	2,60	0,545	381
Овал—круг	14,4	29,4	18,8	18,5	2,04	0,985	339	283	1,0	1,273	278
Круг—овал	18,5	18,8	14,5	21,1	1,015	1,45	283	231	1,70	0,83	254
Овал—круг	14,5	21,1	16,1	16,1	1,45	1,00	231	205	1,0	1,273	204

Продолжение табл. 12

Порядок прокатки	Анализ калибровки								$D_p$ мм
	$i$	$h_{0C}$ мм	$b_{0C}$ мм	$h_{1C}$ мм	$b_{1C}$ мм	$\Delta h_C$ мм	$\Delta b_C$ мм	$\frac{\Delta b_C}{\Delta h_C}$	
Квадрат—овал	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Овал—круг	0,91	34,9	16,3	22,3	19,4	12,6	3,10	0,246	17,5
Круг—овал	0,89	19,4	22,3	12,9	26,3	6,5	4,00	0,615	12
Овал—круг	~1,0	26,3	12,9	17,0	16,75	9,3	3,85	0,414	15
Круг—овал	~0,91	16,75	17,0	12,6	18,3	4,15	1,3	0,313	10
Овал—круг	1,0	18,3	12,6	14,3	14,3	4,0	1,70	0,425	10

Продолжение табл. 12

Порядок прокатки	Результаты расчета для случая прокатки на гладной бочке										
	$h_0$	$b_0$	$h_1$	$\Delta h$	$\frac{\Delta h}{h_0}$	$\frac{D_p}{h_0}$	$\frac{\Delta b}{\Delta h}$	$\Delta b$	$b_1$	$a_0$	$a_1$
	мм	мм	мм	мм				мм	мм		
Квадрат—овал	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Овал—круг	34,9	16,3	22,3	12,6	0,361	8,0	0,290	3,65	19,95	2,14	0,9
Круг—овал	19,4	22,3	12,9	5,5	0,335	14,8	0,835	5,4	27,7	0,87	2,14
Овал—круг	26,3	12,9	17,0	9,3	0,357	10,8	0,380	3,5	16,4	2,04	0,97
Круг—овал	16,75	17,0	12,6	4,15	0,248	17,2	0,800	3,3	20,3	1,015	1,61
Овал—круг	18,3	12,6	14,3	4,0	0,218	16,0	0,500	2,00	14,6	1,45	1,02

калибр. Это означает, что при прокатке овальных полос в круглых калибрах стесняющее действие последних практически отсутствует. Указанный результат не является неожиданным, если принять во внимание, что геометрические формы полос (овал) и калибров (круг) близки друг к другу.

Но если стесняющее действие в заполненных круглых калибрах невелико, то еще в меньшей мере оно будет сказываться в незаполненных калибрах.

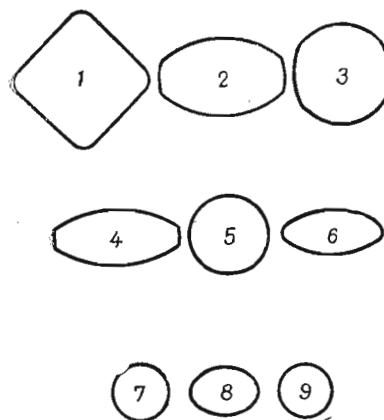


Рис. 97. Поперечные сечения полос по проходам при прокатке круга диаметром 16 мм из стали ШХ15

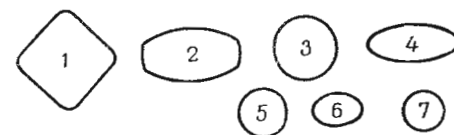


Рис. 98. Поперечные сечения полос по проходам при прокатке круга диаметром 20 мм из стали 3ХВГ

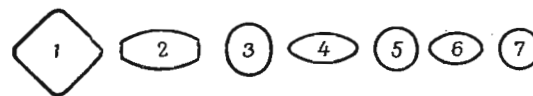


Рис. 99. Поперечные сечения полос по проходам при прокатке круга диаметром 16 мм из стали ЭР

Поправочный коэффициент уширения при прокатке овальных полос в круглых калибрах можно принять численно равным единице. Это обстоятельство упрощает расчет круглых калибров.

Попытаемся оценить величину поправочного коэффициента уширения при прокатке в эллиптических и усеченных овальных калибрах. Для этого прежде всего обратимся к рис. 94, где показана зависимость  $\frac{h_K^2}{\omega_K}$  от отношения осей для овального, эллиптического и усеченного овального калибров. Из рис. 94 видно, что кривая  $\frac{h_K^2}{\omega_K}$  для эллиптического калибра во всем интервале значений  $a_K$  располагается ниже кривой для овального калибра. Кривая для усеченного овального калибра во всем интервале значений  $a_K$  располагается ниже кривых для нормального овала и эллипса.



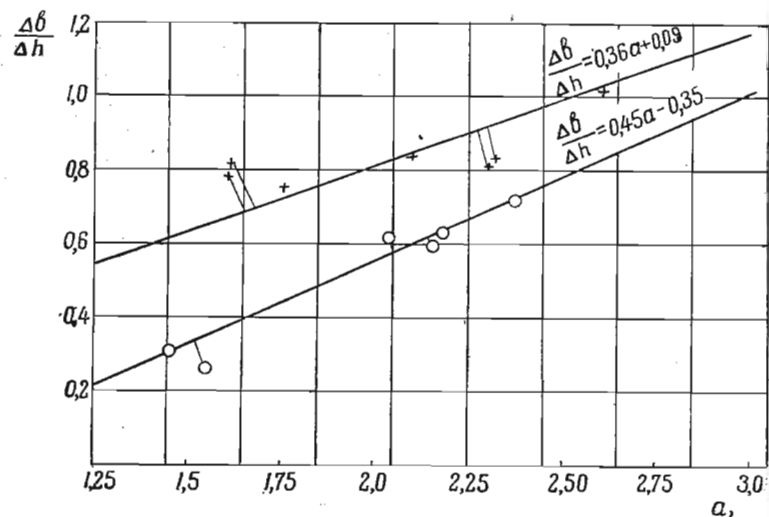


Рис. 100. Зависимость между  $\frac{\Delta b}{\Delta h}$  и  $a_1$  при прокатке круглой полосы в овальном калибре (нижняя линия) и полосы, соответственной круглой, на гладкой бочке (верхняя линия). Стали: ШХ15, ЗХВГ, ЭР

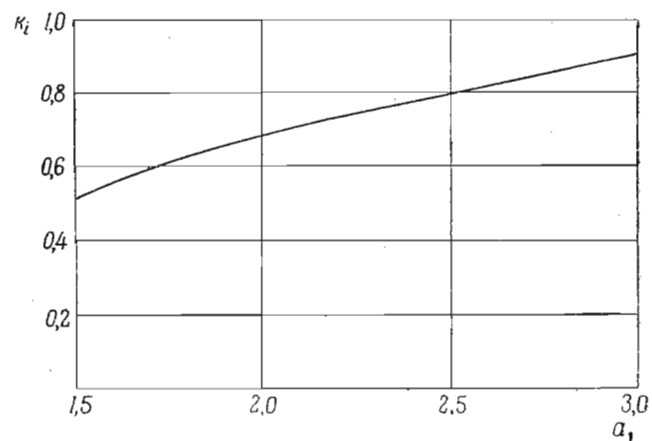


Рис. 101. Зависимость поправочного коэффициента уширения от отношения осей при прокатке круглых полос в овальных калибрах

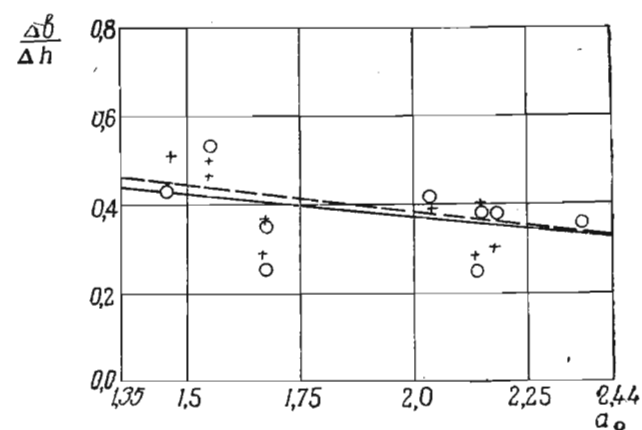


Рис. 102. Зависимость между  $\frac{\Delta b}{\Delta h}$  и  $a_0$  при прокатке овальной полосы в круглом калибре (сплошная линия) и полосы, соответственной овальной, на гладкой бочке (пунктирная линия). Стали: ШХ15, ЗХВГ, ЭР

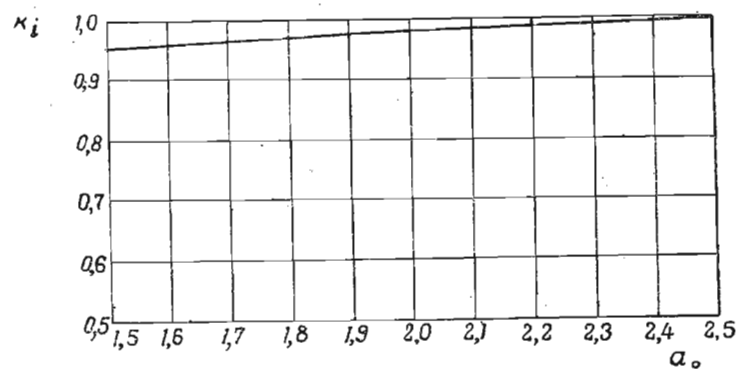


Рис. 103. Зависимость поправочного коэффициента уширения от отношения осей при прокатке овальных полос в круглых калибрах

Допустим, что линейные размеры, а значит и отношение осей у овального, эллиптического и усеченного овального калибров одинаковы. В таком случае площадь овального калибра оказывается меньше площади эллиптического калибра, а площадь эллиптического калибра меньше площади усеченного овального калибра во всем интервале значений  $a_k$  (рис. 104). Отсюда сле-

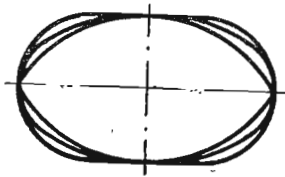


Рис. 104. Овальное, эллиптическое и усеченное овальное сечения, наложенные друг на друга

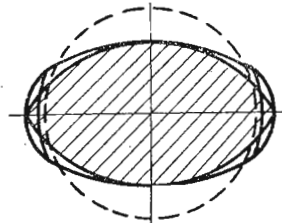


Рис. 105. Незаполненные овальный и эллиптический калибры, наложенные друг на друга

дует, что если форма и площадь поперечного сечения полос, задаваемых в овальный, эллиптический и усеченный овальные калибры, одинаковы, то стесняющее действие овального калибра будет наибольшим, усеченного овального калибра — наименьшим и эллиптического калибра — промежуточным.

Соответственно этому поправочный коэффициент уширения будет иметь наименьшее значение для овального калибра, наибольшее значение — для усеченного овального и промежуточное — для эллиптического.

В незаполненном овальном калибре условия деформации будут мало отличаться от условий деформации в незаполненном эллиптическом и усеченном овальном калибрах, разумеется, если форма и размеры исходных полос одинаковы (рис. 105). Но прокатку в овальных (эллиптических, усеченных овальных) калибрах описываемой системы всегда умышленно ведут при некотором незаполнении калибра. Поэтому нет нужды в том, чтобы проводить специальные опыты по прокатке круглых полос для определения поправочного коэффициента уширения в эллиптических и усеченных овальных калибрах. Здесь можно использовать номограмму, полученную для случая прокатки круглых полос в овальных калибрах (рис. 101).

Учитывая, что при прокатке в овальных, эллиптических, усеченных овальных калибрах последние всегда не заполнены, приходим к выводу, что при наличии равновеликих осей форма и

площадь поперечного сечения полос, полученных в результате прокатки в этих калибрах, мало отличаются друг от друга.

Поэтому при прокатке овальных, эллиптических и усеченных овальных полос с равновеликими осями в круглых калибрах стесняющее действие последних можно принять одинаковым. Следовательно, в первом приближении и поправочные коэффициенты уширения при прокатке указанных сечений в круглых калибрах также одинаковы.

Выше мы получили, что при прокатке овальных полос в круглых калибрах поправочный коэффициент уширения равен единице.

Следовательно, можно принять, что при прокатке эллиптических и усеченных овальных полос в круглых калибрах поправочный коэффициент уширения тоже равен единице.

Заметим, что при расчетах систем эллипс—круг и усеченный овал—круг при условии использования приведенных выше номограмм будем получать фактически несколько меньшее заполнение калибров, чем по расчету. Для указанных систем это не представляет опасности, и, наоборот, гарантируя калибровщика от переполнения калибров, дает ему уверенность в том, что он получит продукцию надлежащего качества. Некоторое несоответствие между фактическими размерами полосы и размерами их, получаемыми по расчету, легко устраняется путем соответствующей настройки стана.

## § 22. Расчет калибров в системах овал — круг

Равенства для расчета деформации полосы в системах овал—круг аналогичны равенствам для расчета в системах овал—квадрат и шестиугольник — квадрат. Здесь возможно также четыре случая:

1. По размерам данной круглой полосы большего сечения рассчитать следующую овальную (эллиптическую, усеченную овальную) меньшего сечения.

При этом согласно (27—I) и (30—I) имеем такие равенства:

а) на гладкой бочке:

$$\Delta h = \frac{(a_1 - 1) h_0}{a_1 + \frac{\Delta b}{\Delta h}};$$

б) в овальном калибре:

$$\Delta h_c = \frac{(a_1 - 1) h_{0c}}{a_1 + \frac{\Delta b_c}{\Delta h_c}};$$

где

$$h_0 = h_{0c} = b_{0c} = \sqrt{\frac{\omega_0}{a_0}} = \sqrt{\omega_0} = \sqrt{\frac{\pi d_0^2}{4}};$$

( $d_0$  — диаметр круглой полосы, задаваемой в овальный калибр).

2. По размерам данной круглой полосы меньшего сечения рассчитать предыдущую овальную (эллиптическую, усеченную овальную) большего сечения.

В этом случае согласно (29—I) и (32—I) имеем такие соотношения:

а) на гладкой бочке:

$$\Delta h = \frac{(a_0 - 1) h_1}{1 + a_0 \frac{\Delta b}{\Delta h}};$$

б) в калибре:

$$\Delta h_c = \frac{(a_1 - 1) h_{1c}}{1 + a_0 \frac{\Delta b_c}{\Delta h_c}},$$

где

$$h_1 = h_{1c} = b_{1c} = \sqrt{\frac{\omega_1}{a_1}} = \sqrt{\omega_1} = \sqrt{\frac{\pi d_1^2}{4}},$$

$d_1$  — диаметр круглой полосы после прокатки.

3. По размерам данной овальной (эллиптической, усеченной овальной) полосы большего сечения рассчитать следующую круглого меньшего сечения.

При этом согласно (27—I) и (30—I) имеем такие равенства:

а) на гладкой бочке:

$$\Delta h = \frac{a_1 h_0 - b_0}{a_1 + \frac{\Delta b}{\Delta h}};$$

б) в круглом калибре:

$$\Delta h_c = \frac{a_1 h_{0c} - b_{0c}}{a_1 + \frac{\Delta b_c}{\Delta h_c}},$$

где

$$h_0 = h_{0c}; \quad b_0 = b_{0c}; \quad a_1 = 1; \quad \frac{\Delta b}{\Delta h} = \frac{\Delta b_c}{\Delta h_c}.$$

4. По размерам данной овальной (эллиптической, усеченной овальной) полосы меньшего сечения рассчитать предшествующую круглую большего сечения.

Для этого случая согласно равенствам (29—I) и (32—I) имеем такие соотношения:

а) на гладкой бочке:

$$\Delta h = \frac{a_0 b_1 - h}{1 + a_0 \frac{\Delta b}{\Delta h}};$$

б) в круглом калибре:

$$\Delta h_c = \frac{a_0 b_{1c} - h_{1c}}{1 + a_0 \frac{\Delta b_c}{\Delta h_c}},$$

где

$$h_1 \approx h_{1c}; \quad b_1 \approx b_{1c}; \quad a_0 = 1; \quad \frac{\Delta b}{\Delta h} = \frac{\Delta b_c}{\Delta h_c}.$$

**ПРИМЕР 26.** Рассчитать овальный, эллиптический и усеченный овальный калибры в системах овал—круг по следующим данным. Диаметр поступающей в калибры полосы  $d_0 = 30$  мм. Отношение осей выходящих из калибра полос  $a_1 = 2$ . Степень заполнения калибров  $i = 0,90$ . Начальный диаметр валков  $D = 300$  мм. Коэффициент трения при прокатке  $\mu = 0,3$ .

1. Размеры круглой полосы пересчитываем на соответственные:

$$h_{0c} = b_{0c} = \sqrt{\omega_0} = \sqrt{\frac{\pi d_0^2}{4}} = \sqrt{\frac{3,14 \cdot 30,0^2}{4}} = 26,5 \text{ мм.}$$

2. Рассчитываем уширение при прокатке на гладкой бочке: Предварительно задаемся  $\frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,5$ .

По формуле (27—I):

$$\Delta h = \frac{a_1 h_0 - b_0}{a_1 + \frac{\Delta b}{\Delta h}} = \frac{2,0 \cdot 26,5 - 26,5}{2,0 + 0,5} = 10,6 \text{ мм};$$

$$h_1 = h_0 - \Delta h = 26,5 - 10,6 = 15,9 \text{ мм};$$

$$D_p = D - h_1 = 300,0 - 15,9 = 284,1 \text{ мм};$$

$$\frac{\Delta h}{h_0} = \frac{10,6}{26,5} = 0,4; \quad \frac{D_p}{h_0} = \frac{284,1}{26,5} = 10,7; \quad \frac{b_0}{h_0} = 1,0.$$

По формуле (22—I) или по номограмме (рис. 14):

$$\frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,82.$$

3. Находим поправочный коэффициент уширения по номограмме (рис. 101)

$$k_i = 0,68.$$

4. Определяем коэффициент уширения при прокатке в калибре:

$$\frac{\Delta b_c}{\Delta h_c} = k_i \frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,68 \cdot 0,82 = 0,56.$$

5. Рассчитываем деформацию полосы при прокатке в калибре по формуле (30—I):

$$\Delta h_c = \frac{a_1 h_{0c} - b_{0c}}{a_1 + \frac{\Delta b_c}{\Delta h_c}} = \frac{2,0 \cdot 26,5 - 26,5}{2,0 + 0,56} = 10,4 \text{ мм};$$

$$\Delta b_c = \frac{\Delta b_c}{\Delta h_c} \Delta h_c = 0,56 \cdot 10,4 = 5,8 \text{ мм};$$

$$h_{1c} = h_{0c} - \Delta h_c = 26,5 - 10,4 = 16,1 \text{ мм};$$

$$b_{1c} = b_{0c} + \Delta b_c = 26,5 + 5,8 = 32,3 \text{ мм}.$$

Проверка:

$$a_1 = \frac{b_{1c}}{h_{1c}} = \frac{32,3}{16,1} = 2,0;$$

$$\omega_1 = b_{1c} h_{1c} = 32,3 \cdot 16,1 = 520,0 \text{ мм}^2.$$

6. Определяем размеры калибров:

$$\omega_k = \frac{\omega_1}{i} = \frac{520,0}{0,90} = 578,0 \text{ мм}^2.$$

По номограммам (рис. 67, 95, 96):

для овального калибра  $a_k = 2,75$ ;

для эллиптического калибра  $a_k = 2,47$ ;

для усеченного овального калибра  $a_k = 2,34$ .

По номограмме (рис. 94):

для овального калибра

$$\frac{h_k^2}{\omega_k} = 0,53;$$

для эллиптического калибра

$$\frac{h_k^2}{\omega_k} = 0,51;$$

для усеченного овального калибра

$$\frac{h_k^2}{\omega_k} = 0,50.$$

Высота калибра:

для овального калибра

$$h_k = \sqrt{0,53 \omega_k} = \sqrt{0,53 \cdot 578,0} = 17,5 \text{ мм};$$

для эллиптического калибра

$$h_k = \sqrt{0,51 \omega_k} = \sqrt{0,51 \cdot 578,0} = 17,2 \text{ мм};$$

для усеченного овального калибра

$$h_k = \sqrt{0,50 \omega_k} = \sqrt{0,50 \cdot 578,0} = 17,0 \text{ мм}.$$

Ширина калибра:

для овального калибра

$$b_k = a_k h_k = 2,75 \cdot 17,5 = 48,1 \text{ мм};$$

для эллиптического калибра

$$b_k = a_k h_k = 2,47 \cdot 17,2 = 42,5 \text{ мм};$$

для усеченного овального калибра

$$b_k = a_k h_k = 2,34 \cdot 17,0 = 39,8 \text{ мм}.$$

ПРИМЕР 27. Рассчитать овальный, эллиптический и усеченный овальный калибры в системах овал—круг по следующим данным. Диаметр полосы, выходящей из последующего круглого калибра, равен  $d_1 = 30,0 \text{ мм}$ . Отношение осей овальной (эллиптической и усеченной овальной) полос  $a_0 = 2$ . Степень заполнения круглого калибра  $i = 0,90$ . Начальный диаметр валков  $D = 300 \text{ мм}$ . Коэффициент трения при прокатке  $\mu = 0,3$ .

1. Размеры круглой полосы пересчитываем на соответственные:

$$h_{1c} = b_{1c} = \sqrt{\omega_1} = \sqrt{\frac{\pi d_1^2}{4}} = \sqrt{\frac{3,14 \cdot 30,0^2}{4}} = 26,5 \text{ мм}.$$

2. Рассчитываем уширение при прокатке на гладкой бочке. Предварительно задаемся  $\frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,5$ .

По формуле (29—I):

$$\Delta h = \frac{a_0 b_1 - h_1}{1 + a_0 \frac{\Delta b}{\Delta h}} = \frac{2,0 \cdot 26,5 - 26,5}{1 + 2,0 \cdot 0,5} = 13,3 \text{ мм};$$

$$h_0 = h_1 + \Delta h = 26,5 + 13,3 = 39,8 \text{ мм};$$

$$D_p = D - h_1 = 300,0 - 26,5 = 273,5 \text{ мм};$$

$$\frac{\Delta h}{h_0} = \frac{13,3}{39,8} = 0,33; \quad \frac{D_p}{h_0} = \frac{273,5}{39,8} = 6,9;$$

$$\frac{b_0}{h_0} = \frac{1}{a_0} = \frac{1}{2,0} = 0,5.$$

По формуле (22—I) или по номограмме (рис. 14):

$$\frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,27.$$

3. Поправочный коэффициент уширения, как указывалось выше, в данном случае равен:

$$k_i = 1,0.$$

4. Определяем коэффициент уширения при прокатке в калибре:

$$\frac{\Delta b_c}{\Delta h_c} = k_i \frac{\Delta b}{\Delta h} = 1,0 \cdot 0,27 = 0,27.$$

5. Рассчитываем деформацию при прокатке в калибре по формуле (32—I):

$$\Delta h_c = \frac{a_0 b_{1c} - h_{1c}}{1 + a_0 \frac{\Delta b_c}{\Delta h_c}} = \frac{2,0 \cdot 26,5 - 26,5}{1 + 2,0 \cdot 0,27} = 17,2 \text{ мм};$$

$$\Delta b_c = \frac{\Delta b_c}{\Delta h_c} \Delta h_c = 0,27 \cdot 17,2 = 4,6 \text{ мм};$$

$$b_{0c.n} = h_{0c} = h_{1c} + \Delta h_c = 26,5 + 17,2 = 43,7 \text{ мм};$$

$$h_{0c.n} = b_{0c} = b_{1c} - \Delta b_c = 26,5 - 4,6 = 21,9 \text{ мм}.$$

Проверка:

$$a_0 = \frac{b_{0c.n}}{h_{0c.n}} = \frac{43,7}{21,9} = 2,0;$$

$$\omega_0 = b_{0c.n} h_{0c.n} = 43,7 \cdot 21,9 = 958,0 \text{ мм}^2.$$

6. Определяем размеры калибров:

$$\omega_k = \frac{\omega}{i} = \frac{958,0}{0,90} = 1063,0 \text{ мм}^2.$$

По номограммам (рис. 67, 95, 96):

для овального калибра  $a_k = 2,75$ ;

для эллиптического калибра  $a_k = 2,47$ ;

для усеченного овального калибра  $a_k = 2,34$ .

По номограмме (рис. 94):

для овального калибра -

$$\frac{h_k^2}{\omega_k} = 0,53;$$

для эллиптического калибра

$$\frac{h_k^2}{\omega_k} = 0,51;$$

для усеченного овального калибра

$$\frac{h_k^2}{\omega_k} = 0,50.$$

Высота калибра:

для овального калибра

$$h_k = \sqrt{0,53 \omega_k} = \sqrt{0,53 \cdot 1063,0} = 23,8 \text{ мм};$$

для эллиптического калибра

$$h_k = \sqrt{0,51 \omega_k} = \sqrt{0,51 \cdot 1063,0} = 23,3 \text{ мм};$$

для усеченного овального калибра

$$h_k = \sqrt{0,50 \omega_k} = \sqrt{0,50 \cdot 1063,0} = 23,1 \text{ мм}.$$

Ширина калибра:

для овального калибра

$$b_k = a_k h_k = 2,75 \cdot 23,8 = 65,5 \text{ мм};$$

для эллиптического калибра

$$b_k = a_k h_k = 2,47 \cdot 23,3 = 57,6 \text{ мм};$$

для усеченного овального калибра

$$b_k = a_k h_k = 2,34 \cdot 23,1 = 54,0 \text{ мм}.$$

ПРИМЕР 28. Рассчитать круглый калибр, следующий за рассчитанными в примере 26 овальным, эллиптическим и усеченным овальным калибрами. Степень заполнения круглого калибра  $i = 0,98$ . Начальный диаметр валков  $D = 300 \text{ мм}$ . Коэффициент трения при прокатке  $\mu = 0,3$ .

1. Рассчитываем уширение при прокатке на гладкой бочке.

Предварительно задаемся  $\frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,5$ .

По формуле (27—I):

$$\Delta h = \frac{a_1 h_0 - b_0}{a_1 + \frac{\Delta b}{\Delta h}} = \frac{1,0 \cdot 32,3 - 16,1}{1,0 + 0,5} = 10,8 \text{ мм};$$

$$h_1 = h_0 - \Delta h = 32,3 - 10,8 = 21,5 \text{ мм};$$

$$D_p = D - h_1 = 300,0 - 21,5 = 278,5 \text{ мм};$$

$$\frac{\Delta h}{h_0} = \frac{10,8}{32,3} = 0,33; \quad \frac{D_p}{h_0} = \frac{278,5}{32,3} = 8,6; \quad \frac{b_0}{h_0} = \frac{16,1}{32,3} = 0,5.$$

По формуле (22—I) или по номограмме (рис. 14):

$$\frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,32.$$

2. Поправочный коэффициент уширения, на основании изложенного выше, в данном случае равен

$$k_i = 1,0.$$

3. Определяем коэффициент уширения при прокатке:

$$\frac{\Delta b_c}{\Delta h_c} = k_i \frac{\Delta b}{\Delta h} = 1,0 \cdot 0,32 = 0,32.$$

4. Рассчитываем деформацию полосы при прокатке в калибре по формуле (30—I):

$$\Delta h_c = \frac{a_1 h_{0c} - b_{0c}}{a_1 + \frac{\Delta b_c}{\Delta h_c}} = \frac{1,0 \cdot 32,3 - 16,1}{1,0 + 0,32} = 12,3 \text{ мм};$$

$$\Delta b_c = \frac{\Delta b_c}{\Delta h_c} \Delta h_c = 0,32 \cdot 12,3 = 3,9 \text{ мм};$$

$$h_{1c} = h_{0c} - \Delta h_c = 32,3 - 12,3 = 20,0 \text{ мм};$$

$$b_{1c} = b_{0c} + \Delta b_c = 16,1 + 3,9 = 20,0 \text{ мм}.$$

Проверка:

$$a_1 = \frac{b_{1c}}{h_{1c}} = \frac{20,0}{20,0} = 1,0;$$

$$\omega_1 = b_{1c} h_{1c} = 20,0 \cdot 20,0 = 400,0 \text{ мм}^2.$$

Диаметр круглой полосы равен:

$$d = \sqrt{\frac{4\omega}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 400,0}{3,14}} = 22,6 \text{ мм}.$$

Определяем размеры круглого калибра:

$$\omega_k = \frac{\omega}{i} = \frac{400,0}{0,98} = 409,0 \text{ мм}^2.$$

По номограмме (рис. 67):

$$a_k = 1,05;$$

$$h_k = d = 22,6 \text{ мм};$$

$$b_k = a_k h_k = 1,05 \cdot 22,6 = 23,8 \text{ мм}.$$

ПРИМЕР 29. Рассчитать круглый калибр, предшествующий рассчитанным в примере 27 овальному, эллиптическому и усеченному овальному калибрам. Степень заполнения круглого калибра  $i = 0,98$ . Начальный диаметр валков  $D = 300 \text{ мм}$ . Коэффициент трения при прокатке  $\mu = 0,3$ .

1. Рассчитываем уширение при прокатке на гладкой бочке. Предварительно задаемся  $\frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,5$ .

По формуле (29—I):

$$\Delta h = \frac{a_0 b_1 - h_1}{1 + a_0 \frac{\Delta b}{\Delta h}} = \frac{1,0 \cdot 43,7 - 21,9}{1 + 1,0 \cdot 0,5} = 14,5 \text{ мм};$$

$$h_0 = h_1 + \Delta h = 21,9 + 14,5 = 36,4 \text{ мм};$$

$$D_p = D - h_1 = 300,0 - 21,9 = 278,1 \text{ мм};$$

$$\frac{\Delta h}{h_0} = \frac{14,5}{36,4} = 0,4; \quad \frac{D_p}{h_0} = \frac{278,1}{36,4} = 7,6; \quad \frac{b_0}{h_0} = 1,0.$$

По формуле (22—I) или по номограмме (рис. 14):

$$\frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,65.$$

2. Находим поправочный коэффициент уширения по номограмме (рис. 101):

$$k_i = 0,68.$$

3. Определяем коэффициент уширения при прокатке в калибре:

$$\frac{\Delta b_c}{\Delta h_c} = k_i \frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,68 \cdot 0,65 = 0,44.$$

4. Рассчитываем деформацию полосы при прокатке в калибре по формуле (32—I):

$$\Delta h_c = \frac{a_0 b_{1c} - h_{1c}}{1 + a_0 \frac{\Delta b_c}{\Delta h_c}} = \frac{1,0 \cdot 43,7 - 21,9}{1 + 1,0 \cdot 0,44} = 15,1 \text{ мм};$$

$$\Delta b_c = \frac{\Delta b_c}{\Delta h_c} \Delta h_c = 0,44 \cdot 15,1 = 6,7 \text{ мм};$$

$$b_{0c, n} = h_{0c} = h_{1c} + \Delta h_c = 21,9 + 15,1 = 37,0 \text{ мм};$$

$$h_{0c, n} = b_{0c} = b_{1c} - \Delta b_c = 43,7 - 6,7 = 37,0 \text{ мм}.$$

Проверка:

$$a_0 = \frac{b_{0c, n}}{h_{0c, n}} = \frac{37,0}{37,0} = 1,0;$$

$$\omega_0 = b_{0c, n} h_{0c, n} = 37,0 \cdot 37,0 = 1369,0 \text{ мм}^2.$$

Диаметр круглой полосы равен:

$$d = \sqrt{\frac{4\omega}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 1369,0}{3,14}} = 41,7 \text{ мм}.$$

5. Определяем размеры круглого калибра по номограмме (рис. 67):

$$\begin{aligned} a_k &= 1,05; \\ h_k &= d = 41,7 \text{ мм}; \\ b_k &= a_k h_k = 1,05 \cdot 41,7 = 43,9 \text{ мм}. \end{aligned}$$

### § 23. Предельное и оптимальное отношения осей овальных калибров в системах овал — круг

Как уже отмечалось, практика показывает, что условия захвата овальной полосы в круглом калибре хуже, чем условия захвата круглой полосы в овальном калибре.

В этом заключается одна из особенностей систем овал — круг.

В связи с этим отношение осей овальной полосы в системах овал — круг не превышает 2,25. По этой причине углы захвата в овальных и в круглых калибрах этих систем, применяемые на практике, невелики (см. табл. 10, 11, 12) и обычно лежат в пределах 10—22°.

Предельные углы захвата при прокатке в системах овал — круг, повидимому, не превышают 22—23°.

В связи с малыми углами захвата и соответствующими им небольшими обжатиями отношение осей при прокатке в системах овал — круг никогда не достигает оптимального значения. Поэтому отношение осей овального калибра (полосы) практически определяется лишь условиями захвата, т. е. предельным углом захвата.

Все указанные обстоятельства необходимо иметь в виду при расчете калибров в системе овал — круг.

Для систем овал — круг зависимость между предельным отношением осей овальной полосы и отношением высоты круглого сечения (задаваемого в овальный калибр) к диаметру валков определяется по равенству (13—III).

Зависимость между предельным отношением осей овальной полосы и отношением высоты сечения (выходящего из овального калибра) к диаметру валков определяется по равенству (15—III).

Соответствующие зависимости для случая прокатки овальных сечений в круглых калибрах определяются аналогично тому, как это было сделано для системы овал — квадрат (§10):

$$\frac{h_{oc}}{D} = \frac{1}{1 + \frac{\cos \alpha_{кр}}{1 - \cos \alpha_{кр}} \left( \frac{\Delta h_c}{h_{oc}} \right)_{кр}}; \quad (27\text{—III})$$

$$\frac{h_{1c}}{D} = \frac{1}{1 + \frac{1}{1 - \cos \alpha_{кр}} \left( \frac{\Delta h_c}{h_{1c}} \right)_{кр}}, \quad (28\text{—III})$$

где  $\alpha_{кр}$  — угол захвата в круглом калибре.

Относительные обжатия  $\left( \frac{\Delta h_c}{h_{oc}} \right)_{кр}$  и  $\left( \frac{\Delta h_c}{h_{1c}} \right)_{кр}$  определяются так.

На основании равенства (30—I) по аналогии с (16—III):

$$\left( \frac{\Delta h_c}{h_{oc}} \right)_{кр} = \frac{a - 1}{a \left[ 1 + \left( \frac{\Delta b_c}{\Delta h_c} \right)_{кр} \right]}. \quad (29\text{—III})$$

Как и при выводе равенств (14—III) и (15—III), получим:

$$\left( \frac{\Delta h_c}{h_{1c}} \right)_{кр} = \frac{\left( \frac{\Delta h_c}{h_{oc}} \right)_{кр}}{1 - \left( \frac{\Delta h_c}{h_{oc}} \right)_{кр}}. \quad (30\text{—III})$$

По равенствам (13—III); (15—III); (27—III) и (28—III) рассчитано предельное отношение осей овальной полосы в системах овал — круг подобно тому, как это было сделано в § 10 для системы овал — квадрат.

По данным расчета построены номограммы (рис. 106, 107, 108, 109).

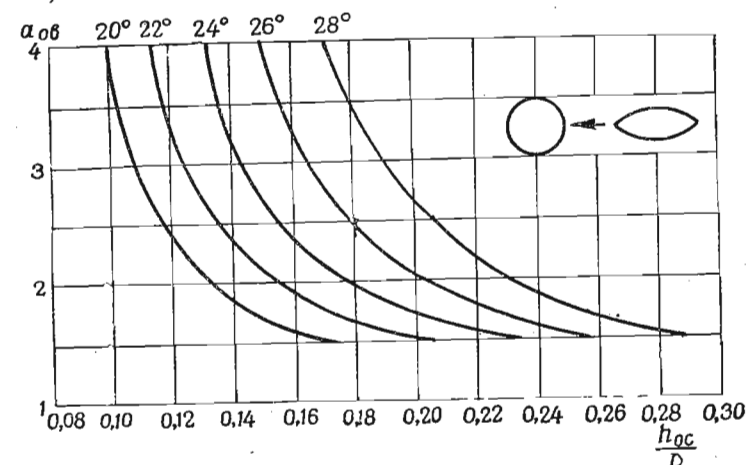


Рис. 106. Зависимость предельного отношения осей овальной полосы при прокатке круглой полосы в овальном калибре от отношения высоты исходного круглого сечения к диаметру валков при различных углах захвата

Как и для системы овал — квадрат, эти номограммы дают возможность определять не только предельное отношение осей овальных полос, но и размеры калибров, в которых они прокатываются, так же как и размеры смежных с ними круглых калибров.



Конечно, при осуществлении таких расчетов, приходится использовать также номограммы, определяющие геометрические связи в указанных калибрах. Поясним изложенное примерами.

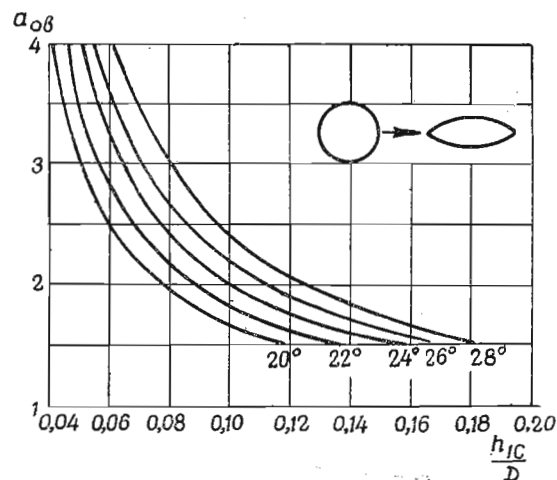


Рис. 107. Зависимость предельного отношения осей овальной полосы при прокатке круглой полосы в овальном калибре от отношения высоты овальной полосы к диаметру валков при различных углах захвата

**ПРИМЕР 30.** Определить размеры овального и следующего за ним круглого калибра, если диаметр полосы круглого сечения, задаваемой в овальный калибр, равен 50 мм, диаметр валков 300 мм и угол захвата в овальном и круглом калибрах 20°. Степень заполнения при прокатке в овальном калибре  $i = 0,90$ , при прокатке в круглом  $i = 0,98$ .

1. Овальный калибр

$$h_{0c} = \sqrt{\frac{\pi d_0}{4}} = \sqrt{\frac{3,14 \cdot 50,0^2}{4}} = 44,4 \text{ мм};$$

$$\frac{h_{0c}}{D} = \frac{44,4}{300,0} = 0,148.$$

По номограмме (рис. 106) при  $\alpha = 20^\circ$ :

$$\alpha = 1,75.$$

По номограмме (рис. 107) при  $\alpha = 20^\circ$ :

$$\frac{h_{1c}}{D} = 0,094;$$

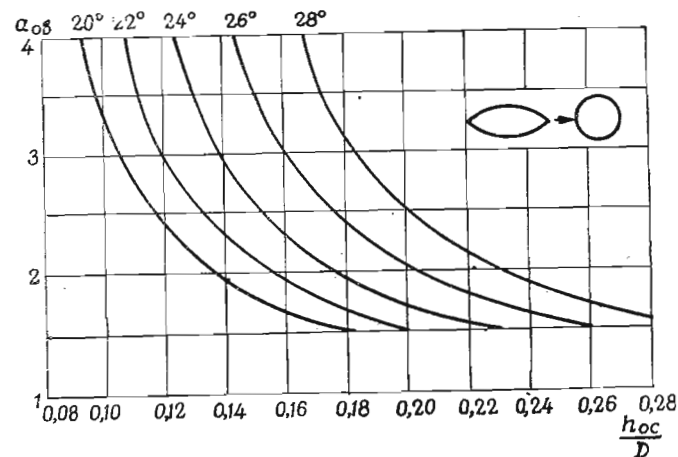


Рис. 108. Зависимость предельного отношения осей овальной полосы при прокатке ее в круглом калибре от отношения высоты овальной полосы к диаметру валков при различных углах захвата

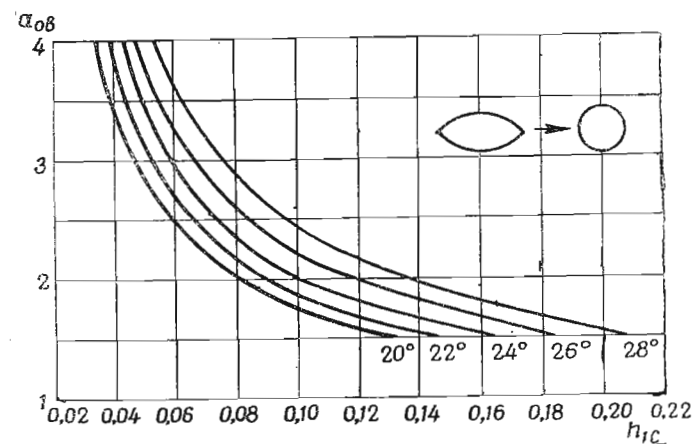


Рис. 109. Зависимость предельного отношения осей овальной полосы при прокатке ее в круглом калибре от отношения высоты круглой полосы, следующей за овальной, к диаметру валков при различных углах захвата

$$h_{1c} = 0,094 \cdot D = 0,094 \cdot 300 = 28,2 \text{ мм};$$

$$b_{1c} = ah_{1c} = 1,75 \cdot 28,2 = 49,4 \text{ мм};$$

$$\omega_1 = h_{1c} b_{1c} = 28,2 \cdot 49,4 = 1390,0 \text{ мм}^2.$$

Площадь овального калибра:

$$\omega_K = \frac{\omega_1}{i} = \frac{1390,0}{0,90} = 1545,0 \text{ мм}^2.$$

По номограмме (рис. 67) при отношении осей овальной полосы  $a = 1,75$  и степени заполнения  $i = 0,90$ :

$$a_K = 2,38.$$

По номограмме (рис. 65):

$$\frac{h_K^2}{\omega_K} = 0,608 \quad \text{и} \quad \frac{r_K}{h_K} = 1,66.$$

Откуда:

$$h_K = \sqrt{0,608 \omega_K} = \sqrt{0,608 \cdot 1545,0} = 30,65 \text{ мм};$$

$$b_K = a_K h_K = 2,38 \cdot 30,65 = 73,0 \text{ мм};$$

$$r_K = 1,66 h_K = 1,66 \cdot 30,65 = 50,9 \text{ мм}.$$

## II. Круглый калибр

При  $a = 1,75$  и  $\alpha = 20^\circ$  по номограмме (рис. 109):

$$\frac{h_{1c}}{D} = 0,10;$$

$$h_{1c} = b_{1c} = 0,10 D = 0,10 \cdot 300 = 30,0 \text{ мм};$$

$$\omega_1 = h_{1c} b_{1c} = 30,0^2 = 900,0 \text{ мм}^2.$$

Диаметр полосы:

$$d = \sqrt{\frac{4 \omega_1}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 900,0}{3,14}} = 33,8 \text{ мм}.$$

Размеры калибра:

$$\omega_K = \frac{\omega_1}{i} = \frac{900,0}{0,98} = 919,0 \text{ мм}^2.$$

По номограмме (рис. 67):

$$a_K = 1,05;$$

$$h_K = d = 33,8 \text{ мм};$$

$$b_K = a_K h_K = 1,05 \cdot 33,8 = 35,5 \text{ мм}.$$

ПРИМЕР 31. Определить размеры овального и предшествующего ему круглого калибра, если сторона круглого сечения, входящего из круглого калибра, следующего за овальным, равна

30 мм, диаметр валков  $D = 400$  мм, угол захвата в овальном и круглом калибрах  $20^\circ$ . Степень заполнения при прокатке в овальном калибре  $i = 0,90$ , при прокатке в круглом калибре  $i = 0,98$ .

## I. Овальный калибр.

$$h_{1c} = \sqrt{\frac{\pi d_1^2}{4}} = \sqrt{\frac{3,14 \cdot 30,0^2}{4}} = 26,6 \text{ мм};$$

$$\frac{h_{1c}}{D} = \frac{26,6}{400,0} = 0,067.$$

По номограмме (рис. 109) при  $\alpha = 20^\circ$ :

$$a = 2,32.$$

Как указывалось выше, во избежание свертывания овальной полосы при прокатке в круглом калибре ее отношение осей не должно превышать 2,25.

Следовательно принимаем:

$$a = 2,25.$$

По номограмме (рис. 108) при  $a = 2,25$  и  $\alpha = 20^\circ$ :

$$\frac{h_{0c}}{D} = 0,126;$$

$$b_{0c.п} = h_{0c} = 0,126 D = 0,126 \cdot 400 = 50,4 \text{ мм};$$

$$h_{0c.п} = b_{0c} = \frac{b_{0c.п}}{a} = \frac{50,4}{2,25} = 22,4 \text{ мм};$$

$$\omega_0 = b_{0c.п} h_{0c.п} = 50,4 \cdot 22,4 = 1130,0 \text{ мм}^2;$$

$$\omega_K = \frac{\omega_0}{i} = \frac{1130,0}{0,90} = 1253,0 \text{ мм}^2.$$

По номограмме (рис. 67) при отношении осей овальной полосы  $a = 2,25$  и  $i = 0,90$ :

$$a_K = 3,06.$$

По номограмме (рис. 65):

$$\frac{h_K^2}{\omega_K} = 0,477 \quad \text{и} \quad \frac{r_K}{h_K} = 2,59.$$

Откуда:

$$h_K = \sqrt{0,477 \omega_K} = \sqrt{0,477 \cdot 1253,0} = 24,4 \text{ мм};$$

$$b_K = a_K h_K = 3,06 \cdot 24,4 = 74,7 \text{ мм};$$

$$r_K = 2,59 h_K = 2,59 \cdot 24,4 = 63,3 \text{ мм}.$$

**II. Круглый калибр.**

При  $a = 2,25$  и  $\alpha = 20^\circ$  по номограмме (рис. 106):

$$\frac{h_{0c}}{D} = 0,123;$$

$$h_{0c} = b_{0c} = 0,123 D = 0,123 \cdot 400 = 49,2 \text{ мм};$$

$$\omega_0 = h_{0c} b_{0c} = 49,2^2 = 2420,0 \text{ мм}^2.$$

Диаметр полосы:

$$d = \sqrt{\frac{4 \omega_0}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 2420,0}{3,14}} = 55,5 \text{ мм}.$$

Размеры калибра:

$$\omega_k = \frac{\omega_0}{i} = \frac{2420,0}{0,98} = 2470,0 \text{ мм}^2.$$

По номограмме (рис. 67):

$$a_k = 1,05;$$

$$h_k = d = 55,5 \text{ мм};$$

$$b_k = a_k h_k = 1,05 \cdot 55,5 = 58,3 \text{ мм}.$$

**§ 24. Чистовые калибры при прокатке круглой стали**

Чистовые круглые калибры выполняются обычно так, как показано на рис. 110. Радиус закругления принимают равным  $r = 0,05 d$ , где  $d$  — диаметр чистового профиля. Величина зазора  $S$  между буртами чистовых валков выбирается в зависимости от диаметра прокатываемого профиля. Рекомендуют следующую градацию:

Диаметр чистового круглого сечения, мм	Зазор между валками, мм
9—15	1,0—1,5
15—40	1,2—2,0
40 и больше	5—13,0

Коэффициент вытяжки в чистовом калибре обычно лежит в пределах  $\lambda = 1,075 — 1,200$ .

Чистовой овальный калибр изображен на рис. 111. Радиус закругления у буртов принимают равным  $r_0 = 0,1b$ . Зазор между буртами обычно равен  $S = (0,008 — 0,01) D$ .

Радиус закругления при вертикальной диагонали предчистового квадратного калибра можно принимать равным  $r = 0,15c$ , где  $c$  — сторона квадратного сечения прокатываемой в калибре полосы.

Построение чистовых круглых и овальных калибров в системах овал — круг производится так же, как для системы овал — квадрат.

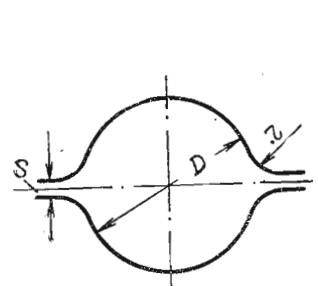


Рис. 110. Схема чистового круглого калибра

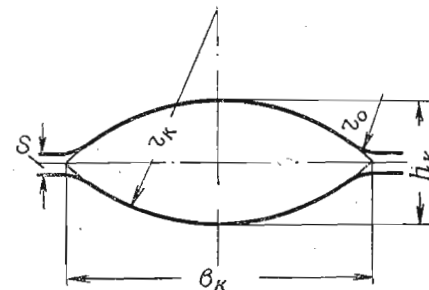


Рис. 111. Схема чистового овального калибра

При прокатке сортовой стали крупных размеров иногда в чистовые калибры включают два предчистовых овала [25]. При этом один из них является переходным от квадрата к овалу (рис. 112). Это делается для того, чтобы устранить складки на поверхности круглой стали.

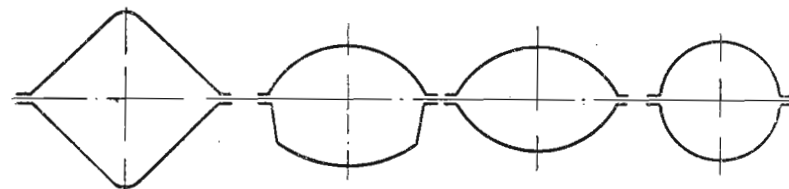


Рис. 112. Схема калибровки круглой стали диаметром 60 мм на стане 550 Орджоникидзевского завода

Ширину внутренних буртов между калибрами делают от 5 до 60 мм и наружных буртов — от 50 до 200 мм. Размеры их выбирают тем большими, чем больше диаметр валков и размеры прокатываемых полос. При выборе буртов необходимо также принимать во внимание соответствующие размеры валковой арматуры.

**§ 25. Применение ребровых калибров при прокатке круглой стали. Универсальная калибровка В. Семкова**

При прокатке качественных сталей для предупреждения складок на поверхности профиля и лучшего удаления окалины в системе овальных и квадратных калибров используют иногда ребровые калибры (рис. 113).

Наличие ребрового калибра в данной вытяжной системе удобно еще и в том отношении, что позволяет путем его соответствующей регулировки получить готовый профиль повышенной точности.

Обычно один ребровой калибр проектируется на прокатку круглых профилей нескольких размеров. Схема ребрового калибра приведена на рис. 114. По данным практики [25]:

$$\begin{aligned} \text{Глубина вреза} \dots y &= 2,5 - 7,0 \text{ мм;} \\ \text{Ширина} \dots z &= 1,15 d + 5 \text{ мм,} \end{aligned}$$

где  $d$  — диаметр максимального круглого профиля. Коэффициент вытяжки в ребровых калибрах принимают равным 1,18—1,24.

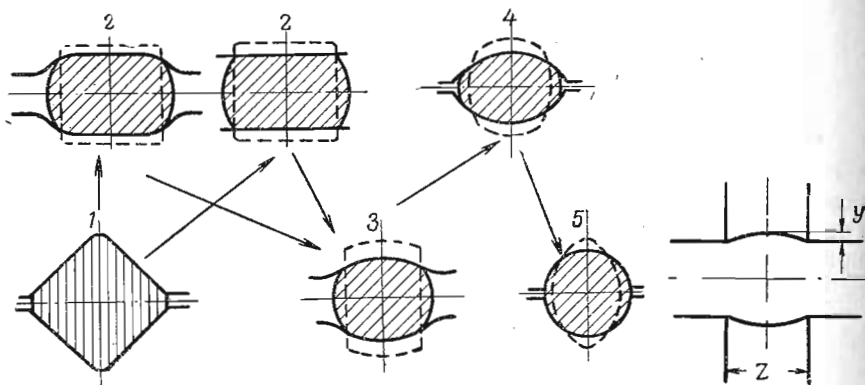


Рис. 113. Схема прокатки круглой стали в системе калибровки квадрат — ступенька — ребро — овал — круг

Рис. 114. Схема ребрового калибра

Применение ребровых калибров не всегда возможно и рационально, так как они не обеспечивают высоких коэффициентов вытяжки.

На заводах качественных сталей применяется так называемая универсальная калибровка, предложенная В. Семковым [26]. На рис. 115 в качестве примера показана одна из таких калибровок. Как видно из рисунка, универсальная калибровка характеризуется относительно большими зазорами между прокатными валками и некоторым своеобразием в конфигурации калибров.

Наличие больших зазоров между валками позволяет производить прокатку большого числа однотипных профилей различных размеров на одних и тех же прокатных валках, изменяя лишь на соответствующую величину зазор между валками. Таким образом, при переходе с одного размера на другой избегают перевалок или сокращают их число до минимума.

При таком способе работы и конструкции калибров, некоторые из них неизбежно выполняют роль ребровых калибров, что способствует, как уже указывалось, получению профилей с поверхностью, свободной от окалины.

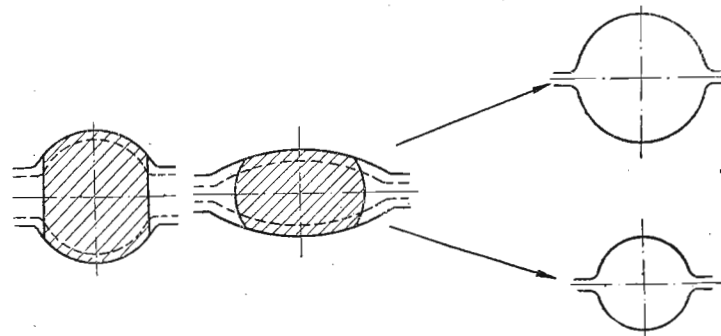


Рис. 115. Универсальная калибровка В. Семкова

Универсальная калибровка оказывается весьма выгодной в тех случаях, когда необходимо прокатывать профили различных размеров мелкими партиями. При этом, несмотря на относительно низкие коэффициенты вытяжек в малозаполненных калибрах универсальной калибровки, цех получает значительную экономию времени на перевалках. Указанные условия часто имеют место в цехах для производства качественных сталей, поэтому в них и применяется в ряде случаев универсальная калибровка.

При массовом производстве однотипных профилей одинакового размера, что, как правило, имеет место при прокатке рядовой стали, универсальная калибровка применения не получила, как не обеспечивающая достаточно высокой производительности.

## § 26. Примеры калибровки круглого профиля по системам овал — круг и овал — квадрат

В заключение настоящей главы приведем примеры калибровки круглого профиля по системам овал — круг и овал — квадрат.

Представляет интерес расчет калибровки такого профиля, который можно было бы сравнить с какой-либо уже опробованной на практике заводской калибровкой.

На рис. 116 приведена схема калибровки по системе овал — круг для прокатки круглого профиля из специальной стали диаметром 20 мм по данным одного из заводов.

В табл. 13 приведен выполненный авторами анализ этой калибровки (столбцы 1—18).

Принимая во внимание данные завода, сформулируем задачу калибровки следующим образом.

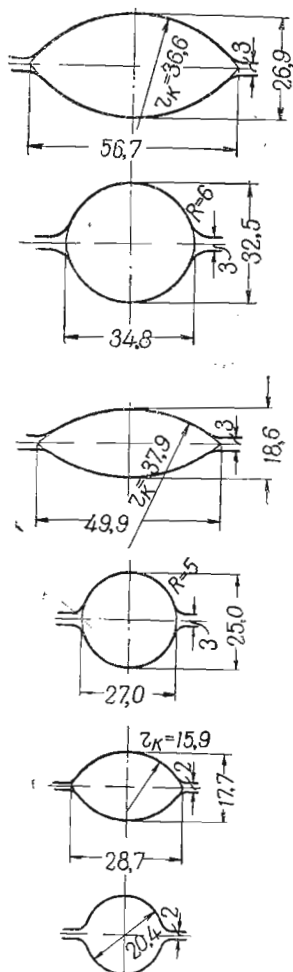


Рис. 116. Схема калибровки круглого профиля в системе овал — круг по данным практики. Стан 300

**ПРИМЕР 32.** Спроектировать калибровку для прокатки круглого профиля диаметром 20 мм из специальной стали. Начальный диаметр валков 300 мм. Температура прокатки и коэффициент трения данной стали точно неизвестны, поэтому примем ориентировочно, что  $\mu = 0,3$ .

#### VI калибр (чистовой)

Размеры калибра приняты такие же, как в заводской калибровке (см. рис. 116 и табл. 13).

#### V калибр

Назначение предчистового калибра заключается в том, чтобы подготовить полосу таких размеров, которые бы обеспечивали получение требуемого круглого сечения. Поэтому отношение рсей полосы, вышедшей из чистового овала, принимаем равным 1,6.

1. Определяем размеры (соответственные) овальной полосы, вышедшей из V калибра.

Предварительно принимаем  $\frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,5$ .

По формуле (29—I):

$$\Delta h = \frac{a_0 b_1 - h_1}{1 + a_0 \frac{\Delta b}{\Delta h}} = \frac{1,6 \cdot 18,1 - 18,1}{1 + 1,6 \cdot 0,5} = 6,1 \text{ мм};$$

$$h_0 = h_1 + \Delta h = 18,1 + 6,1 = 24,2 \text{ мм};$$

$$D_p = D - h_1 = 300,0 - 18,1 = 242,9 \text{ мм};$$

$$\frac{\Delta h}{h_0} = \frac{6,1}{24,2} = 0,25;$$

$$\frac{D_p}{h_0} = \frac{242,0}{24,2} = 11,6;$$

$$\frac{b_0}{h_0} = \frac{1}{a_0} = \frac{1}{1,6} = 0,625.$$

Таблица 13

Калибровка для прокатки круглого профиля диаметром 20 мм из специальной стали на стане 300 мм

№ кали- бра	Заводская калибровка																
	система овал — круг																
	соответственная полоса											калибр					
	форма калибра	$h_{1C}$ мм	$b_{1C}$ мм	$a_1$	$\Delta h_C$ мм	$\Delta b_C$ мм	$\omega_1$ мм <sup>2</sup>	$\lambda$	$\lambda_\Sigma$	$\alpha$	$\frac{h_{0C}}{D}$	$\frac{h_{1C}}{D}$	$h_K$ мм	$b_K$ мм	$a_K$	$\omega_K$ мм <sup>2</sup>	$i$
I	Овал	24,4	40,8	1,67	14,0	2,4	995,0	1,482	1,482	17°35'	0,1280	0,0813	26,9	56,7	2,11	1070	0,930
II	Круг	28,4	26,4	1,07	12,4	2,0	805,0	1,237	1,832	16°33'	0,1360	0,0947	32,5	34,8	1,07	880	0,915
III	Овал	16,2	35,4	2,19	10,2	7,0	575,0	1,400	2,565	15°00'	0,0880	0,0540	18,6	49,9	2,68	636	0,918
IV	Круг	22,0	21,4	1,03	13,4	5,2	470,0	1,222	3,140	17°23'	0,1213	0,0734	25,0	27,0	1,08	525	0,896
V	Овал	15,2	23,6	1,55	6,2	1,6	360,0	1,306	4,100	11°34'	0,0714	0,0507	17,7	28,7	1,62	363	0,993
VI	Круг	18,1	18,1	1,00	5,5	2,9	327,0	1,110	4,515	11°00'	0,0786	0,0604	20,4	20,4	1,00	327	1,00

Примечание. В I калибр задается квадратная полоса, у которой  $h_{0C} = b_{0C} = 38,4$  мм и  $\omega_0 = 1475$  мм<sup>2</sup>.

№ кали- бра	Калибровка по соответственной полосе																
	система овал — круг																
	соответственная полоса												калибр				
	форма калибра	$h_{1c}$ мм	$b_{1c}$ мм	$a_1$	$\Delta h_c$ мм	$\Delta b_c$ мм	$\omega_1$ мм <sup>2</sup>	$\lambda$	$\lambda_\Sigma$	$\alpha$	$\frac{h_{0c}}{D}$	$\frac{h_{1c}}{D}$	$h_K$ мм	$b_K$ мм	$a_K$	$\omega_K$ мм <sup>2</sup>	$i$
I	Овал	27,6	51,0	1,85	19,2	4,2	1409	1,555	1,555	20°36′	0,0921	0,1560	30,0	75,5	2,52	1565	0,90
II	Круг	30,7	30,7	1,00	20,3	3,1	943	1,492	2,321	21°12′	0,1700	0,1022	34,4	36,1	1,05	963	0,98
III	Овал	17,1	38,5	2,25	13,6	7,8	659	1,430	3,324	17°20′	0,1022	0,0570	18,8	57,5	3,06	731	0,90
IV	Круг	21,9	21,9	1,00	16,6	4,8	480	1,371	4,560	19°10′	0,1284	0,0730	24,4	25,6	1,05	490	0,98
V	Овал	15,4	24,7	1,60	6,5	2,8	381	1,260	5,750	11°56′	0,0730	0,0514	18,0	28,8	1,66	385	0,99
VI	Круг	18,1	18,1	1,00	6,6	2,7	327	1,164	6,670	12°02′	0,0824	0,0604	20,4	20,4	1,00	327	1,00

Примечание. В I калибр задается квадратная полоса, у которой  $h_{0c} = b_{0c} = 46,8$  мм и  $\omega_0 = 2190$  мм<sup>2</sup>.

№ калиб- ра	Калибровка на соответственной полосе																
	система овал — квадрат																
	соответственная полоса												калибр				
	форма калибра	$h_{1C}$ мм	$b_{1C}$ мм	$a_1$	$\Delta h_C$ мм	$\Delta b_C$ мм	$\omega_1$ мм <sup>2</sup>	$\lambda$	$\lambda_\Sigma$	$\alpha$	$\frac{h_{0C}}{D}$	$\frac{h_{0C}}{D}$	$h_K$ мм	$b_K$ мм	$a_K$	$\omega_K$ мм <sup>2</sup>	$i$
I	Овал	39,4	69,6	1,77	26,6	3,6	2757	1,580	1,580	24°20'	0,220	0,1314	45,3	88,4	1,95	2810	0,98
II	Квадрат	41,5	41,5	1,00	28,1	2,1	1721	1,599	2,523	25°01'	0,232	0,0637	52,8	61,2	1,16	1757	0,98
III	Овал	19,1	52,5	2,75	22,4	11,0	1002	1,715	4,340	22°17'	0,0637	0,1383	22,1	67,9	3,07	1022	0,98
IV	Квадрат	23,2	23,2	1,00	29,3	4,1	539	1,861	8,077	25°33'	0,1750	0,0774	29,6	34,4	1,16	550	0,98
V	Овал	15,4	24,7	1,60	7,8	1,5	380	1,419	11,430	13°05'	0,0774	0,0514	18,0	28,8	1,66	385	0,99
VI	Квадрат	18,1	18,1	1,00	6,6	2,7	327	1,161	13,300	12°02'	0,0913	0,0604	20,4	20,4	1,00	327,0	1,00

Примечание. В I калибр задается квадратная полоса, у которой  $h_{0c} = b_{0c} = 66,0$  мм и  $\omega_0 = 4350$  мм<sup>2</sup>.



По номограмме (рис. 14):

$$\frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,41.$$

При прокатке овальной полосы в круглом калибре, как было показано выше,

$$k_i = 1,0, \\ \frac{\Delta b_c}{\Delta h_c} = 0,41.$$

По формуле (32—I):

$$\Delta h_c = \frac{a_0 b_{1c} - h_{1c}}{1 + a_0 \frac{\Delta b_c}{\Delta h_c}} = \frac{1,6 \cdot 18,1 - 18,1}{1 + 1,6 \cdot 0,41} = 6,6 \text{ мм};$$

$$\Delta b_c = 0,41 \Delta h_c = 0,41 \cdot 6,6 = 2,7 \text{ мм};$$

$$b_{0c.п} = h_{0c} = h_{1c} + \Delta h_c = 18,1 + 6,6 = 24,7 \text{ мм};$$

$$h_{0c.п} = b_{0c} = b_{1c} - \Delta b_c = 18,1 - 2,7 = 15,4 \text{ мм}.$$

Проверка:

$$a_0 = \frac{b_{0c.п}}{h_{0c.п}} = \frac{24,7}{15,4} = 1,60;$$

$$\omega_0 = b_{0c.п} h_{0c.п} = 24,7 \cdot 15,4 = 381,0 \text{ мм}^2.$$

2. Определяем размеры V калибра:

$$\omega_k = \frac{\omega_0}{i} = \frac{381,0}{0,99} = 385,0 \text{ мм}^2.$$

По номограмме (рис. 67) при  $a = 1,6$  и  $i = 0,99$ :

$$a_k = 1,66.$$

По номограмме (рис. 65):

$$\frac{h_k^2}{\omega_k} = 0,84; \quad h_k = \sqrt{0,84 \omega_k} = \sqrt{0,84 \cdot 385,0} = 18,0 \text{ мм};$$

$$b_k = a_k h_k = 1,66 \cdot 18,0 = 28,8 \text{ мм}.$$

По номограмме (рис. 65):

$$\frac{r_k}{h_k} = 0,93; \quad r_k = 0,93 h_k = 0,93 \cdot 18,0 = 16,8 \text{ мм}.$$

IV калибр

Считаем, что из IV калибра выходит круглая полоса и соответственно

$$a = 1,0.$$

1. Определяем размеры (соответственные) круглой полосы, выходящей из IV калибра.

Предварительно принимаем  $\frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,5$ .

По формуле (29—I):

$$\Delta h = \frac{a_0 b_1 - h_1}{1 + a_0 \frac{\Delta h}{\Delta b}} = \frac{1,0 \cdot 24,7 - 15,4}{1 + 1,0 \cdot 0,5} = 6,2 \text{ мм};$$

$$h_0 = h_1 + \Delta h = 15,4 + 6,2 = 21,6 \text{ мм};$$

$$D_p = D - h_1 = 300,0 - 15,4 \approx 285 \text{ мм};$$

$$\frac{\Delta h}{h_0} = \frac{6,2}{21,6} = 0,29; \quad \frac{D_p}{h_0} = \frac{285}{21,6} = 13,2; \quad \frac{b_0}{h_0} = 1,0.$$

По номограмме (рис. 14):

$$\frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,78.$$

По номограмме (рис. 46) при  $a_1 = 1,6$  и  $i = 0,98$ :

$$k_i = 0,56;$$

$$\frac{\Delta b_c}{\Delta h_c} = k_i \frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,56 \cdot 0,78 = 0,44.$$

По формуле (32—I):

$$\Delta h_c = \frac{a_0 b_{1c} - h_{1c}}{1 + a_0 \frac{\Delta b_c}{\Delta h_c}} = \frac{1,0 \cdot 24,7 - 15,4}{1 + 1,0 \cdot 0,44} = 6,5 \text{ мм};$$

$$\Delta b_c = 0,44 \Delta h_c = 0,44 \cdot 6,5 = 2,8 \text{ мм};$$

$$b_{0c.п} = h_{0c} = h_{1c} + \Delta h_c = 15,4 + 6,5 = 21,9 \text{ мм};$$

$$h_{0c.п} = b_{0c} = b_{1c} - \Delta b_c = 24,7 - 2,8 = 21,9 \text{ мм};$$

$$\omega_0 = b_{0c.п} h_{0c.п} = 21,9^2 = 480,0 \text{ мм}^2.$$

2. Определяем размеры IV калибра:

$$\omega_k = \frac{\omega_0}{i} = \frac{480,0}{0,98} = 490,0 \text{ мм}^2.$$

По номограмме (рис. 67) при  $a = 1,0$  и  $i = 0,98$ :

$$a_k = 1,05.$$

По номограмме (рис. 65):

$$\frac{h_k^2}{\omega_k} = 1,22; \quad h_k = \sqrt{1,22 \omega_k} = \sqrt{1,22 \cdot 490,0} = 24,4 \text{ мм};$$

$$b_k = a_k h_k = 1,05 \cdot 24,4 = 25,6 \text{ мм}.$$

По номограмме (рис. 65):

$$\frac{r_k}{h_k} = 0,52; \quad r_k = 0,52 h_k = 0,52 \cdot 24,4 = 12,7 \text{ мм}.$$

## III калибр

Принимаем угол захвата при прокатке овальной полосы в круглом калибре равным  $\alpha = 22^\circ$  при

$$\frac{h_{1c}}{D} = \frac{21,9}{300,0} = 0,073.$$

По номограмме (рис. 109) отношение осей овальной полосы  $a = 2,63$ .

Но, как указано выше, по условию свертывания при прокатке овальной полосы в круглом калибре отношение осей ее не должно превышать  $a = 2,25$ .

1. Определяем размеры овальной полосы, выходящей из III калибра.

Предварительно принимаем  $\frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,5$ .

По формуле (29—I):

$$\Delta h = \frac{a_0 b_1 - h_1}{1 + a_0 \frac{\Delta b}{\Delta h}} = \frac{2,25 \cdot 21,9 - 21,9}{1 + 2,25 \cdot 0,5} = 12,8 \text{ мм};$$

$$h_0 = h_1 + \Delta h = 21,9 + 12,8 = 34,7 \text{ мм};$$

$$D_p = D - h_1 = 300,0 - 21,9 \approx 278,0 \text{ мм};$$

$$\frac{\Delta h}{h_0} = \frac{12,8}{34,7} = 0,37; \quad \frac{D_p}{h_0} = \frac{278,0}{34,7} = 8,0; \quad \frac{b_0}{h_0} = 0,44.$$

По номограмме (рис. 14):

$$\frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,29.$$

Так как в данном случае  $k_1 = 1,0$ , то

$$\frac{\Delta b_c}{\Delta h_c} = 0,29.$$

По формуле (32—I):

$$\Delta h_c = \frac{a_0 b_{1c} - h_{1c}}{1 + a_0 \frac{\Delta b_c}{\Delta h_c}} = \frac{2,25 \cdot 21,9 - 21,9}{1 + 2,25 \cdot 0,29} = 16,6 \text{ мм};$$

$$\Delta b_c = 0,29 \Delta h_c = 0,29 \cdot 16,6 = 4,8 \text{ мм};$$

$$b_{0c.п} = h_{0c} = h_{1c} + \Delta h_c = 21,9 + 16,6 = 38,5 \text{ мм};$$

$$h_{0c.п} = b_{0c} = b_{1c} - \Delta b_c = 21,9 - 4,8 = 17,1 \text{ мм}.$$

Проверка:

$$a_0 = \frac{b_{0c.п}}{h_{0c.п}} = \frac{38,5}{17,1} = 2,25;$$

$$\omega_0 = b_{0c.п} h_{0c.п} = 38,5 \cdot 17,1 = 659,0 \text{ мм}^2.$$

2. Определяем размеры III калибра:

$$\omega_k = \frac{\omega_0}{i} = \frac{659,0}{0,90} = 731,0 \text{ мм}^2.$$

По номограмме (рис. 67):

$$a_k = 3,06.$$

По номограмме (рис. 65):

$$\frac{h_k^2}{\omega_k} = 0,48 \quad \text{и} \quad \frac{r_k}{h_k} = 2,59;$$

$$h_k = \sqrt{0,48 \omega_k} = \sqrt{0,48 \cdot 731,0} = 18,8 \text{ мм};$$

$$b_k = a_k h_k = 3,06 \cdot 18,8 = 57,5 \text{ мм};$$

$$r_k = 2,59 h_k = 2,59 \cdot 18,8 = 48,7 \text{ мм}.$$

## II калибр

Считаем, что из II калибра выходит круглая полоса

Предварительно принимаем  $\frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,5$ .

По формуле (29—I):

$$\Delta h = \frac{a_0 b_1 - h_1}{1 + a_0 \frac{\Delta b}{\Delta h}} = \frac{1,0 \cdot 38,5 - 17,1}{1 + 1,0 \cdot 0,5} = 14,3 \text{ мм};$$

$$h_0 = h_1 + \Delta h = 17,1 + 14,3 = 31,4 \text{ мм};$$

$$D_p = D - h_1 = 300,0 - 17,1 = 282,9 \text{ мм};$$

$$\frac{\Delta h}{h_0} = \frac{14,3}{31,4} = 0,46; \quad \frac{D_p}{h_0} = \frac{282,9}{31,4} = 9,0; \quad \frac{b_0}{h_0} = 1,0.$$

По номограмме (рис. 14):

$$\frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,78.$$

По номограмме (рис. 46) при  $a_1 = 2,25$  и  $i = 0,98$

$$k_i = 0,74;$$

$$\frac{\Delta b_c}{\Delta h_c} = k_i \frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,74 \cdot 0,78 = 0,58.$$

По формуле (32—I):

$$\Delta h_c = \frac{a_0 b_{1c} - h_{1c}}{1 + a_0 \frac{\Delta b_c}{\Delta h_c}} = \frac{1,0 \cdot 38,5 - 17,1}{1 + 1,0 \cdot 0,58} = 13,6 \text{ мм};$$

$$\Delta b_c = 0,58 \Delta h_c = 0,58 \cdot 13,6 = 7,8 \text{ мм};$$

$$b_{0c.п} = h_{0c} = h_{1c} + \Delta h_c = 17,1 + 13,6 = 30,7 \text{ мм};$$

$$h_{0c.п} = b_{0c} = b_{1c} - \Delta b_c = 38,5 - 7,8 = 30,7 \text{ мм};$$

$$\omega_0 = b_{0c.п} h_{0c.п} = 30,7^2 = 943,0 \text{ мм}^2.$$

2. Определяем размеры II калибра:

$$\omega_k = \frac{\omega_0}{i} = \frac{943,0}{0,98} = 963,0 \text{ мм}^2.$$

По номограмме (рис. 67):

$$a_k = 1,05.$$

По номограмме (рис. 65):

$$\frac{h_k^2}{\omega_k} = 1,22 \quad \text{и} \quad \frac{r_k}{h_k} = 0,52.$$

Отсюда:

$$h_k = \sqrt{1,22 \omega_k} = \sqrt{1,22 \cdot 963,0} = 34,4 \text{ мм};$$

$$b_k = 1,05 h_k = 1,05 \cdot 34,4 = 36,1 \text{ мм};$$

$$r_k = 0,52 h_k = 0,52 \cdot 34,4 = 17,9 \text{ мм}.$$

I калибр

Угол захвата принимаем при прокатке овальной полосы в круглом калибре равным  $\alpha = 22^\circ$ .

1. По номограмме (рис. 109) при

$$\frac{h_{1c}}{D} = \frac{30,7}{300,0} = 0,102$$

имеем отношение осей овальной полосы  $a_0 = 1,85$ .

Затем по номограмме (рис. 108) при  $a = 1,85$  находим

$$\frac{h_{0c}}{D} = 0,170.$$

Следовательно:

$$b_{0c.п} = h_{0c} = 0,170 D = 0,170 \cdot 300,0 = 51,0 \text{ мм};$$

$$h_{0c.п} = \frac{b_{0c.п}}{a_0} = \frac{51,0}{1,85} = 27,6 \text{ мм};$$

$$\omega_0 = b_{0c.п} h_{0c.п} = 51,0 \cdot 27,6 = 1409,0 \text{ мм}^2.$$

2. Определяем размеры I калибра:

$$\omega_k = \frac{\omega_0}{i} = \frac{1409,0}{0,90} = 1565,0 \text{ мм}^2.$$

По номограмме (рис. 67) при  $\alpha = 1,85$  и  $i = 0,90$ :

$$a_k = 2,52.$$

По номограмме (рис. 65):

$$\frac{h_k^2}{\omega_k} = 0,575 \quad \text{и} \quad \frac{r_k}{h_k} = 1,83.$$

Отсюда:

$$h_k = \sqrt{0,575 \omega_k} = \sqrt{0,575 \cdot 1565,0} = 30,0 \text{ мм};$$

$$b_k = a_k h_k = 2,52 \cdot 30,0 = 75,5 \text{ мм};$$

$$r_k = 1,83 h_k = 1,83 \cdot 30,0 = 54,9 \text{ мм}.$$

3. Определяем размеры (соответственные) задаваемой в I калибр квадратной полосы.

Предварительно принимаем  $\frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,5$ .

По формуле (29—I):

$$\Delta h = \frac{a_0 h_1 - b_1}{1 + a_0 \frac{\Delta b}{\Delta h}} = \frac{1,0 \cdot 51,0 - 27,6}{1 + 1,0 \cdot 0,5} = 15,6 \text{ мм};$$

$$h_0 = h_1 + \Delta h = 27,6 + 15,6 = 43,2 \text{ мм};$$

$$D_p = D - h_1 = 300,0 - 27,6 \approx 271 \text{ мм};$$

$$\frac{\Delta h}{h_0} = \frac{15,6}{43,2} = 0,36; \quad \frac{D_p}{h_0} = \frac{271}{43,2} = 6,3; \quad \frac{b_0}{h_0} = 1,0.$$

По номограмме (рис. 14):

$$\frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,54.$$

По номограмме (рис. 46) при  $a = 1,85$  и  $i = 0,98$ :

$$k_i = 0,40;$$

$$\frac{\Delta b_c}{\Delta h_c} = k_i \frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,40 \cdot 0,54 = 0,22.$$

По формуле (32—I):

$$\Delta h_c = \frac{a_0 h_{1c} - b_{1c}}{1 + a_0 \frac{\Delta b_c}{\Delta h_c}} = \frac{1,0 \cdot 51,0 - 27,6}{1 + 1,0 \cdot 0,22} = 19,2 \text{ мм}.$$

Следовательно:

$$\Delta b_c = 0,22 \Delta h_c = 0,22 \cdot 19,2 = 4,2 \text{ мм};$$

$$b_{0c.п} = h_{0c} = h_{1c} + \Delta h_c = 27,6 + 19,2 = 46,8 \text{ мм};$$

$$h_{0c.п} = b_{0c} = b_{1c} - \Delta b_c = 51,0 - 4,2 = 46,8 \text{ мм};$$

$$\omega_0 = b_{0c.п} h_{0c.п} = 46,8^2 = 2190,0 \text{ мм}^2.$$

Итак, размеры квадратной полосы, задаваемой в I калибр, равны  $46,8 \times 46,8 \text{ мм}$ .

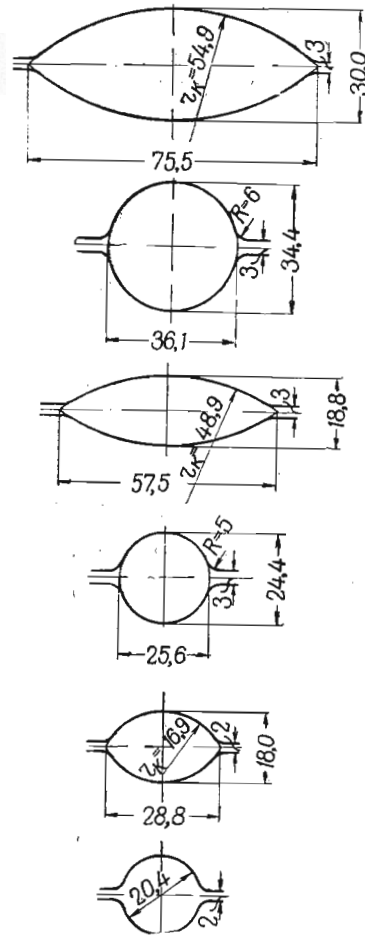


Рис. 117. Калибровка по системе овал — круг по соответственной полосе. Стан 300

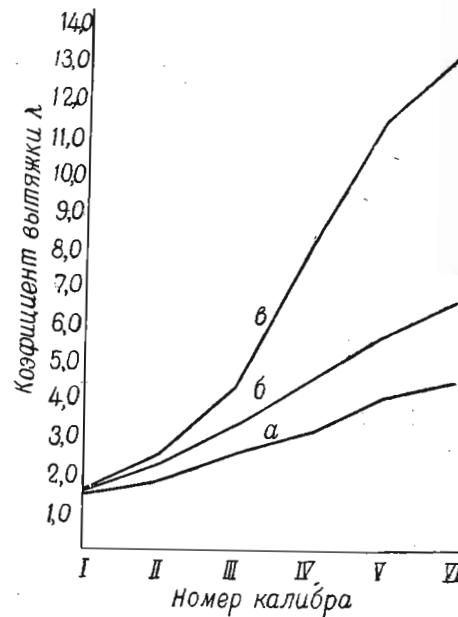


Рис. 118. Вытяжка в калибрах систем овал — круг и овал — квадрат:  
 а — в системе овал — круг по данным завода;  
 б — то же, по соответственной полосе;  
 в — в системе овал — квадрат

Следует иметь в виду, что полоса, задаваемая в I калибр рассчитанной нами системы, не является стандартной. В I калибр рассматриваемой системы она поступает из черновых калибров подобно тому, как это имеет место при прокатке данного профиля в условиях завода.

Результаты расчета калибровки сведены в табл. 13 (столбцы 20—35).

Схема калибровки приведена на рис. 117.

Для сравнения рассчитанной калибровки на рис. 118 даны кривые, характеризующие коэффициент вытяжки в калибрах заводской (а) и рассчитанной нами (б) калибровки.

Как видно из рисунка, коэффициент вытяжки в рассчитанной калибровке изменяется от одного пропуска к другому более равномерно. Величина суммарного коэффициента вытяжки в рассчитанной системе больше, чем в заводской.

Вследствие этого для прокатки данного профиля по заводской калибровке требуется исходное квадратное сечение  $38,4 \times 38,4$  мм, в то время как квадратная заготовка, полученная в результате расчета, имеет размеры  $46,8 \times 46,8$  мм.

Таким образом, рассчитанная калибровка имеет преимущество перед калибровкой завода с точки зрения производительности стана.

Большие значения коэффициентов вытяжки по пропускам получены благодаря повышенным углам захвата во всех калибрах описанной системы.

Во II калибре угол захвата имеет максимальное значение —  $21^\circ 12'$ . Как показывает анализ заводских калибровок, указанное значение угла захвата меньше предельного. Поэтому захват полосы валками будет осуществляться беспрепятственно.

Как уже было указано выше, калибровка овал — круг, обеспечивая получение прокатной продукции, обладающей поверхностью высокого качества, уступает другим вытяжным системам в том отношении, что не обеспечивает высоких значений коэффициента вытяжки в каждом проходе.

Выясним этот вопрос более подробно путем сравнения заводской и рассчитанной калибровок овал — круг с калибровкой овал — квадрат для производства одинакового по размеру готового профиля.

**ПРИМЕР 33.** Спроектировать калибровку для прокатки круглого профиля диаметром 20 мм из специальной стали. Начальный диаметр валков 300 мм. Коэффициент трения при прокатке  $\mu = 0,3$ .

#### VI и V калибры

Чистовые круглый и овальный калибры остаются аналогичными с системой овал — круг (см. рис. 116 и табл. 13).

## IV калибр

1. Определяем размеры (соответственные) квадратной полосы, вышедшей из IV калибра.

Предварительно принимаем  $\frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,5$ .

По формуле (29—I):

$$\Delta h = \frac{a_0 b_1 - h_1}{1 + a_0 \frac{\Delta b}{\Delta h}} = \frac{1,0 \cdot 24,7 - 15,4}{1 + 1,0 \cdot 0,5} = 6,2 \text{ мм.}$$

Следовательно:

$$h_0 = h_1 + \Delta h = 15,4 + 6,2 = 21,6 \text{ мм;}$$

$$D_p = D - h_1 = 300,0 - 15,4 \approx 285 \text{ мм;}$$

$$\frac{\Delta h}{h_0} = \frac{6,2}{21,6} = 0,29; \quad \frac{D_p}{h_0} = \frac{285}{21,6} = 13,2; \quad \frac{b_0}{h_0} = 1,0.$$

По номограмме (рис. 14):

$$\frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,78.$$

По номограмме (рис. 46) при  $a_1 = 1,6$  и  $i = 0,98$ :

$$k_i = 0,24;$$

$$\frac{\Delta b_c}{\Delta h_c} = k_i \frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,24 \cdot 0,78 = 0,19.$$

По формуле (32—I):

$$\Delta h_c = \frac{a_0 h_{1c} - h_{1c}}{1 + a_0 \frac{\Delta b_c}{\Delta h_c}} = \frac{1,0 \cdot 24,7 - 15,4}{1 + 1,0 \cdot 0,19} = 7,8 \text{ мм;}$$

$$\Delta b_c = 0,19 \Delta h_c = 0,19 \cdot 7,8 = 1,5 \text{ мм;}$$

$$b_{0c.п} = h_{0c} = h_{1c} + \Delta h_c = 15,4 + 7,8 = 23,2 \text{ мм;}$$

$$h_{0c.п} = b_{0c} = b_{1c} - \Delta b_c = 24,7 - 1,5 = 23,2 \text{ мм;}$$

$$\omega_0 = b_{0c.п} h_{0c.п} = 23,2^2 = 539,0 \text{ мм}^2.$$

2. Определяем размеры IV калибра:

$$\omega_k = \frac{\omega_0}{i} = \frac{539,0}{0,98} = 550,0 \text{ мм}^2.$$

По номограмме (рис. 86) при  $a = 1,0$  и  $i = 0,98$ :

$$a_k = 1,16.$$

По номограмме (рис. 84):

$$\frac{h_k^2}{\omega_k} = 1,58; \quad h_k = \sqrt{1,58 \omega_k} = \sqrt{1,58 \cdot 550,0} = 29,7 \text{ мм;}$$

$$b_k = a_k h_k = 1,16 \cdot 29,7 = 34,4 \text{ мм;}$$

$$c = \sqrt{\frac{\omega_k}{i}} = \sqrt{\frac{550}{0,98}} = 24,7 \text{ мм.}$$

При  $i = 0,98$  по номограмме (рис. 69):

$$\frac{r_k}{c} = 0,213; \quad r_k = 0,213 c = 0,213 \cdot 24,7 = 5,3 \text{ мм.}$$

## III калибр

1. Определяем размеры (соответственные) полосы, выходящей из III калибра:

$$\frac{h_{1c}}{D} = \frac{23,2}{300,0} = 0,0774.$$

По номограмме (рис. 74) при угле захвата  $\alpha = 26^\circ$  отношение осей овальной полосы равно:

$$a = 2,75.$$

По номограмме (рис. 73) при  $a = 2,75$  и  $\alpha = 26^\circ$ :

$$\frac{h_{0c}}{D} = 0,175;$$

$$b_{0c.п} = h_{0c} = 0,175 D = 0,175 \cdot 300,0 = 52,5 \text{ мм;}$$

$$h_{0c.п} = \frac{b_{0c.п}}{a_0} = \frac{52,5}{2,75} = 19,1 \text{ мм;}$$

$$\omega_0 = b_{0c.п} h_{0c.п} = 52,5 \cdot 19,1 = 1002,0 \text{ мм}^2.$$

2. Определяем размеры III калибра:

$$\omega_k = \frac{\omega_0}{i} = \frac{1002,0}{0,98} = 1022,0 \text{ мм}^2.$$

По номограмме (рис. 67) при  $a = 2,75$  и  $i = 0,98$ :

$$a_k = 3,07.$$

По номограмме (рис. 65) при  $a_k = 3,07$ :

$$\frac{h_k^2}{\omega_k} = 0,475 \quad \text{и} \quad \frac{r_k}{h_k} = 2,60.$$

Отсюда:

$$h_k = \sqrt{0,475 \omega_k} = \sqrt{0,475 \cdot 1022} = 22,1 \text{ мм;}$$

$$b_k = a_k h_k = 3,07 \cdot 22,1 = 64,9 \text{ мм;}$$

$$r_k = 2,60 h_k = 2,60 \cdot 22,1 = 57,5 \text{ мм.}$$

## II калибр

1. Определяем размеры (соответственные) полосы, выходящей из II калибра.

Предварительно принимаем  $\frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,5$ .

По формуле (29—I):

$$\Delta h = \frac{a_0 b_1 - h_1}{1 + a_0 \frac{\Delta b}{\Delta h}} = \frac{1,0 \cdot 52,5 - 19,1}{1 + 1,0 \cdot 0,5} = 22,3 \text{ мм.}$$

Тогда

$$\begin{aligned} h_0 &= h_1 + \Delta h = 19,1 + 22,3 = 41,4 \text{ мм;} \\ D_p &= D - h_1 = 300,0 - 19,1 = 280,9 \text{ мм;} \\ \frac{\Delta h}{h_0} &= \frac{22,3}{41,4} = 0,54; \quad \frac{D_p}{h_0} = \frac{280,9}{41,4} = 6,8; \quad \frac{b_0}{h_0} = 1,0. \end{aligned}$$

По номограмме (рис. 14):

$$\frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,71.$$

По номограмме (рис. 46) при  $a_1 = 2,75$  и  $i = 0,98$ :

$$k_i = 0,69;$$

$$\frac{\Delta b_c}{\Delta h_c} = k_i \frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,69 \cdot 0,71 = 0,49.$$

По формуле (32—I):

$$\Delta h_c = \frac{a_0 b_{1c} - h_{1c}}{1 + a_0 \frac{\Delta b_c}{\Delta h_c}} = \frac{1,0 \cdot 52,5 - 19,1}{1 + 1,0 \cdot 0,49} = 22,4;$$

$$\Delta b_c = 0,49 \Delta h_c = 0,49 \cdot 22,4 = 11,0 \text{ мм;}$$

$$b_{0c \cdot n} = h_{0c} = h_{1c} + \Delta h_c = 19,1 + 22,4 = 41,5 \text{ мм;}$$

$$h_{0c \cdot n} = b_{0c} = b_{1c} - \Delta b_c = 52,5 - 11,0 = 41,5 \text{ мм;}$$

$$\omega_0 = b_{0c \cdot n} h_{0c \cdot n} = 41,5^2 = 1721,0 \text{ мм}^2.$$

2. Определяем размеры II калибра:

$$\omega_k = \frac{\omega_0}{i} = \frac{1721,0}{0,98} = 1757,0 \text{ мм}^2.$$

По номограмме (рис. 86) при  $a = 1,0$  и  $i = 0,98$ :

$$a_k = 1,16.$$

По номограмме (рис. 84):

$$\frac{h_k^2}{\omega_k} = 1,58; \quad h_k = \sqrt{1,58 \omega_k} = \sqrt{1,58 \cdot 1757,0} = 52,8 \text{ мм;}$$

$$b_k = a_k h_k = 1,16 \cdot 52,8 = 61,2 \text{ мм;}$$

$$c = \sqrt{\frac{\omega_k}{i}} = \sqrt{\frac{1757,0}{0,98}} = 42,4 \text{ мм.}$$

По номограмме (рис. 69):

$$\frac{r_k}{c} = 0,213; \quad r_k = 0,213 c = 0,213 \cdot 42,4 = 9,0 \text{ мм.}$$

I калибр

1. Определяем размеры (соответственные) овальной полосы, вышедшей из I калибра:

$$\frac{h_{1c}}{D} = \frac{41,5}{300,0} = 0,138.$$

По номограмме (рис. 74) при угле захвата  $\alpha = 26^\circ$  отношение осей овальной полосы

$$a = 1,77.$$

По номограмме (рис. 73) при  $a = 1,77$  и  $\alpha = 26^\circ$ :

$$\frac{h_{0c}}{D} = 0,232;$$

$$b_{0c \cdot n} = h_{0c} = 0,232 D = 0,232 \cdot 300,0 = 69,6 \text{ мм;}$$

$$h_{0c \cdot n} = \frac{b_{0c \cdot n}}{a} = \frac{69,6}{1,77} = 39,4 \text{ мм;}$$

$$\omega_0 = b_{0c \cdot n} h_{0c \cdot n} = 69,6 \cdot 39,4 = 2757,0 \text{ мм}^2.$$

2. Определяем размеры I калибра:

$$\omega_k = \frac{\omega_0}{i} = \frac{2757,0}{0,98} = 2810,0 \text{ мм}^2.$$

По номограмме (рис. 67) при  $a = 1,77$  и  $i = 0,98$ :

$$a_k = 1,95.$$

По номограмме (рис. 65) при  $a_k = 1,95$ :

$$\frac{h_k^2}{\omega_k} = 0,73 \quad \text{и} \quad \frac{r_k}{h_k} = 1,20;$$

$$h_k = \sqrt{0,73 \omega_k} = \sqrt{0,73 \cdot 2810,0} = 45,3 \text{ мм;}$$

$$b_k = a_k h_k = 1,95 \cdot 45,3 = 88,4 \text{ мм;}$$

$$r_k = 1,20 h_k = 1,20 \cdot 45,3 = 54,4 \text{ мм.}$$

3. Определяем размеры квадратной полосы, задаваемой в I калибр.

Предварительно принимаем  $\frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,5$ .

По формуле (29—I):

$$\Delta h = \frac{a_0 b_1 - h_1}{1 + a_0 \frac{\Delta b}{\Delta h}} = \frac{1,0 \cdot 69,6 - 39,4}{1 + 1,0 \cdot 0,5} = 20,1 \text{ мм;}$$

$$h_0 = h_1 + \Delta h = 39,4 + 20,1 = 59,5 \text{ мм};$$

$$D_p = D - h_1 = 300,0 - 39,4 = 260,6 \text{ мм};$$

$$\frac{\Delta h}{h_0} = \frac{20,1}{59,5} = 0,34;$$

$$\frac{D_p}{h_0} = \frac{260,6}{59,5} = 4,4; \quad \frac{b_0}{h_0} = 1,0.$$

По номограмме (рис. 14):

$$\frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,40.$$

По номограмме (рис. 46) при  $a_1 = 1,77$  и  $i = 0,98$ :

$$k_i = 0,34;$$

$$\frac{\Delta b_c}{\Delta h_c} = k_i \frac{\Delta b_i}{\Delta h_i} = 0,34 \cdot 0,40 = 0,14.$$

По формуле (32—I):

$$\Delta h_c = \frac{a_0 b_{1c} - h_{1c}}{1 + a_0 \frac{\Delta b_c}{\Delta h_c}} =$$

$$= \frac{1,0 \cdot 69,6 - 39,4}{1 + 1,0 \cdot 0,14} = 26,6 \text{ мм};$$

$$\Delta b_c = 0,14 \Delta h_c = 0,14 \cdot 26,6 =$$

$$3,6 \text{ мм};$$

$$b_{0c.п} = h_{0c} = h_{1c} + \Delta h_c =$$

$$= 39,4 + 26,6 = 66,0 \text{ мм};$$

$$h_{0c.п} = b_{0c} = b_{1c} - \Delta b_c =$$

$$= 69,6 - 3,6 = 66,0 \text{ мм};$$

$$\omega_0 = b_{0c.п} h_{0c.п} = 66,0^2 =$$

$$= 4350,0 \text{ мм}^2.$$

Таким образом, размеры квадратной полосы, задаваемой в 1 калибр рассчитанной системы, равны  $66,0 \times 66,0 \text{ мм}$ .

Результаты расчета калибровки сведены в табл. 13 (столбцы 36—52).

Схема калибровки приведена на рис. 119.

На рис. 118 представлена кривая ( $\sigma$ ), характеризующая коэффициент вытяжки в системе рассчитанных нами калибров.

Сравним коэффициенты вытяжки по проходам в калибровке овал—квадрат с коэффициентом вытяжки в системе овал—круг.

Вытяжка в системе калибров овал—квадрат значительно превышает вытяжку в системах овал—круг.

Конечно, полученный результат не является неожиданным: при расчете овальных и квадратных калибров нами были приняты значительно большие углы захвата, чем при расчете калибров в системе овал—круг.

Кроме того, стесняющее действие калибров системы овал—квадрат много больше, чем калибров системы овал—круг. В результате суммарная вытяжка в системе овал—квадрат превышает почти в два раза суммарную вытяжку в рассчитанной нами системе овал—круг.

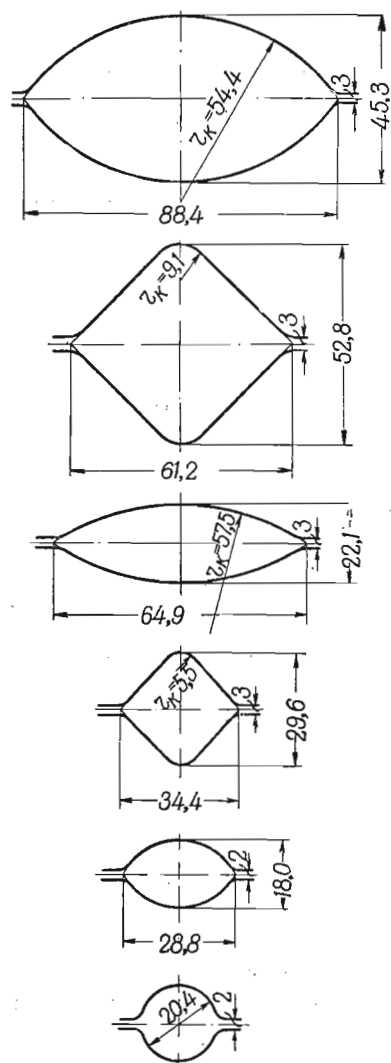


Рис. 119. Схема калибровки по системе овал — квадрат. Стан 300



## ГЛАВА IV

## КАЛИБРОВКА ПОЛОСОВОЙ СТАЛИ

## § 1. Способы прокатки полосовой стали

К полосовой стали относят полосы прямоугольного сечения шириной от 12 до 200 мм и с отношением ширины к высоте не меньше двух. Часто полосовую сталь называют по ее назначению, например: сутуночная полоса, заготовка для сварных труб, обручная полоса и т. д.

Для прокатки полосовой стали применяются такие прокатные станы:

- 1) трехвалковые с закрытыми калибрами и со ступенчатыми валками;
- 2) непрерывные;
- 3) двойные двухвалковые станы.

Полоса может прокатываться одним из следующих способов.

## I. Прокатка в закрытых калибрах (рис. 120)

Этот способ применяется для прокатки полос шириной более 80—100 мм. Получение острых и прямых кромок достигается прокаткой с ограниченным уширением. Полоса каждого размера по ширине требует специальной системы калибров, что затрудняет работу при наличии большого сортамента проката и мелких заказов, так как требуется большой парк валков и частые перевалки валков.

При наличии же в одних и тех же валках нескольких систем калибров для полос разных размеров калибры, в которых прокатка не производилась, приходится растачивать вместе с изношенными при переточках. Это, разумеется, невыгодно.

При прокатке в закрытых калибрах имеет место большое верхнее или нижнее давление, вызываемые разностью диаметров валков, и связанное с этим искривление полосы. Окалина с поверхности полосы при прокатке в закрытых калибрах удаляется плохо.

Калибры для прокатки полосовой стали могут быть сопряженными и несопряженными. Первый способ более употребите-

лен, так как обеспечивает лучшее использование бочки валков. Недостаток способа прокатки полосы в сопряженных калибрах заключается в том, что ширина верхнего и нижнего калибра получается одинаковой.

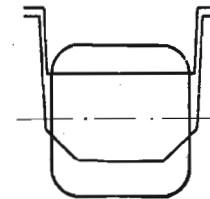


Рис. 120. Прокатка полосы в закрытых калибрах

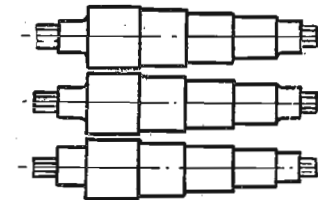


Рис. 121. Прокатка полосы в гладких или ступенчатых валках

Полоса последовательно проходит в нижнем, а затем в верхнем калибре (или наоборот). Если ширину предыдущего калибра принять равной ширине полосы со стесненным уширением, то захват полосы валками в следующем сопряженном калибре затрудняется, так как ширина полосы уже равна ширине калибра. Понятно, что в указанном калибре уширение является стесненным и численно равно нулю. Отсюда следует, что возможно переполнение калибра или защемление полосы в калибрах.

Поэтому следует конструировать калибры таким образом, чтобы стеснение имело место лишь в последующем сопряженном калибре, а в предыдущем калибре уширение было свободным.

## II. Прокатка в гладких или ступенчатых валках (рис. 121)

Этот способ применяется для полос малой ширины — до 70—80 мм. Для достижения точных размеров полосы по ширине, а также для получения острых и прямых кромок при прокатке по этому способу применяют так называемые ребровые калибры. Обычно ребровой пропуск производится перед чистовым. В ребровых калибрах полоса осаживается по ширине на ребро. Полосы шире 80—90 мм обычно так не катают, чтобы не получить изгиба и коробления по ширине в ребровом калибре (рис. 122). Впрочем, известны случаи, когда на гладких валках катали полосы до 150 мм шириной [25].

Преимущества данного способа такие:

- 1) при пропуске через ребровой калибр хорошо очищается окалина;
- 2) можно прокатывать без перевалок большое количество полосовой стали разных размеров;

3) простота переточек и долгий срок службы валков между переточками — по мере износа проводки можно переставлять вдоль бочки валков и производить прокатку на неиспользованных еще участках бочки.

Недостаток данного способа — малая величина вытяжки в ребровых калибрах. Иногда для прокатки полосы данного размера используют не один, а два ребровых пропуска. В этом случае между ребровыми пропусками производят дополнительно еще один или несколько пропусков на гладкой бочке.

Второй ребровой пропуск производят с целью возможно более тщательной очистки прокатываемой полосы от окалины. Кроме того, второй ребровой пропуск бывает полезен еще и в тех случаях, когда размер заготовки, используемой для прокатки полосы заданной ширины, чрезмерно велик. Осаживая полосу в ребровом калибре, добиваются получения полосы с заданной шириной.

При прокатке полосы на гладких валках кромки полосы получаются менее острыми и ровными, чем в закрытых калибрах.

Одной из разновидностей прокатки полосы на гладких валках является прокатка в непрерывных станах с вертикальными валками. Последние служат для осуществления ребровых обжатий. Калибровка валков такого стана сводится к распределению обжатий между клетями. Однако ребра полосы получаются менее острыми, чем при прокатке в закрытых калибрах, что, как уже упоминалось, характерно для прокатки полосы на гладких валках вообще.

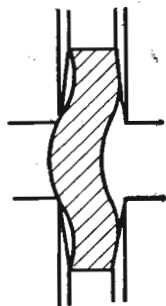


Рис. 122. Коробление полосы в ребровом калибре при больших обжатиях

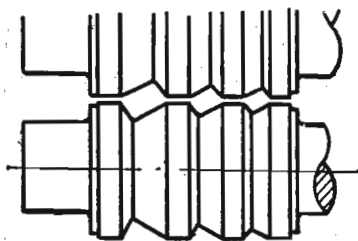


Рис. 123. Диагональные калибры для прокатки полосы

### III. Прокатка по диагонали (рис. 123)

Этот способ применим лишь для полос с отношением сторон не более 1:2. Практика показывает, что если это отношение больше, полоса имеет стремление к скручиванию наподобие што-

пора. Способ прокатки по диагонали часто применяют для инструментальной стали.

Наибольшим распространением пользуются первый и второй способы прокатки полосовой стали.

## § 2. Предварительное определение размеров исходной заготовки

Для калибровщика конечные размеры прокатываемой полосы всегда являются заданными. Первой задачей при калибровке полосовой стали является определение ориентировочного исходного квадратного сечения, из которого может быть выкатана полоса заданных размеров.

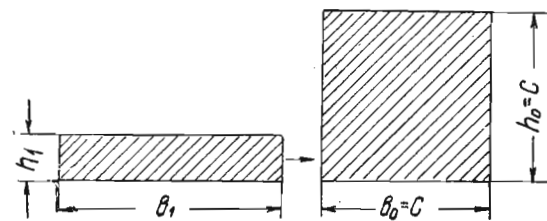


Рис. 124. Схема к ориентировочному расчету размеров исходного квадратного сечения

Обозначим через  $h_1$  и  $b_1$  — ширину и высоту полосы, а через  $c = h_0 = b_0$  — размеры исходного квадратного сечения (рис. 124).

Принимая во внимание, что при прокатке полосы кантовки не производится, можем написать:

$$b_1 = c + \frac{\sum \Delta b}{\sum \Delta h} \sum \Delta h$$

и

$$b_1 = c + \left( \frac{\Delta b}{\Delta h} \right)_{\text{ср}} (c - h_1),$$

где  $c - h_1 = \sum \Delta h$  — суммарное обжатие за все пропуски;

$\left( \frac{\Delta b}{\Delta h} \right)_{\text{ср}} = \frac{\sum \Delta b}{\sum \Delta h}$  — средняя величина коэффициента уширения.

Из последнего равенства после простых преобразований получим, что сторона исходного квадратного сечения выразится формулой:

$$c = \frac{b_1 + \left( \frac{\Delta b}{\Delta h} \right)_{\text{ср}} h_1}{1 + \left( \frac{\Delta b}{\Delta h} \right)_{\text{ср}}} \quad (1-IV)$$

Для предварительного определения размеров исходного квадратного сечения необходимо задаться приближенным средним значением коэффициента уширения.

А. П. Чекмарев [27] рекомендует, на основании данных практики, такие значения этого коэффициента (табл. 14):

Таблица 14

Значения коэффициентов уширения по данным А. П. Чекмарева

Поперечные размеры полос	$\left(\frac{\Delta b}{\Delta h}\right)_{\text{ср}}$	
	прокатка в калибрах	прокатка на гладкой бочке
Тонкие и узкие полосы . . . . .	0,28—0,35	0,60—0,75
Толстые и широкие полосы . . . . .	0,15—0,20	0,30—0,45
Средние по толщине и ширине . . . . .	0,20—0,25	0,45—0,60

ПРИМЕР 34. Определить размер исходного квадратного сечения для прокатки полосы шириной  $b_1 = 90$  мм и высотой  $h_1 = 8,0$  мм.

Такую полосу следует катать в закрытых калибрах.

Размеры полос в горячем состоянии:

$$b_1 = 90 \cdot 1,015 = 91,4 \text{ мм};$$

$$h_1 = 8 \cdot 1,015 = 8,12 \text{ мм}.$$

Полоса принадлежит к типу средних по толщине и ширине, поэтому на основании табл. 14 примем  $\left(\frac{\Delta b}{\Delta h}\right)_{\text{ср}} = 0,23$ .

На основании равенства (I—IV), получим:

$$c = \frac{91,4 + 0,23 \cdot 8,12}{1 + 0,23} = \frac{93,27}{1,23} = 75,8 \text{ мм}.$$

Принимаем квадратное сечение  $75 \times 75$  мм.

### § 3. Распределение обжатий по проходам и определение числа проходов

После ориентировочного определения размеров исходного квадратного сечения необходимо распределить обжатия по пропускам и определить количество пропусков. Обычно величину обжатия по пропускам уменьшают от первого прохода к последнему, так как полагают, что в процессе прокатки температура полосы падает. Кроме того, в связи с уменьшением высоты поло-

сы возрастает относительная деформация и, как следствие, скорость деформации.

Нужно, однако, заметить, что при осуществлении энергичного режима обжатий и высоких скоростей прокатки (например, при прокатке на непрерывных полосовых станах) возможны случаи, когда падение температуры будет незначительным или же вовсе отсутствует. В некоторых пропусках возможно даже повышение температуры. Сообразно этому, разумеется, должен изменяться и режим обжатий по проходам. К сожалению, этот важный вопрос мало изучен. Систематических и достаточно проверенных данных, касающихся температурного режима и режима обжатий, на современных непрерывных полосовых станах пока не имеется.

Поэтому распределение обжатий по пропускам приходится производить на основании практики хорошо работающих калибровок для станов с линейным расположением, данные о которых были систематизированы в свое время А. П. Чекмаревым (табл. 15) [27].

Таблица 15

Коэффициенты обжатий при прокатке полос в закрытых калибрах по А. П. Чекмареву

№ пропуска	Весьма энергичный режим прокатки		Энергичный режим прокатки		Средний режим прокатки		Слабый режим прокатки	
	$\frac{1}{\eta}$	$\frac{1}{\eta_{\Sigma}}$	$\frac{1}{\eta}$	$\frac{1}{\eta_{\Sigma}}$	$\frac{1}{\eta}$	$\frac{1}{\eta_{\Sigma}}$	$\frac{1}{\eta}$	$\frac{1}{\eta_{\Sigma}}$
1	1,4	1,40	1,30	1,30	1,25	1,25	1,15	1,15
2	1,6	2,24	1,50	1,95	1,40	1,75	1,20	1,38
3	1,8	4,03	1,70	3,31	1,50	2,63	1,25	1,72
4	2,0	8,06	1,80	5,98	1,60	4,20	1,30	2,24
5	2,0	16,12	1,80	10,78	1,60	6,72	1,30	2,90
6	2,0	32,24	1,80	19,40	1,60	10,75	1,30	3,78
7	—	—	1,80	34,80	1,60	17,20	1,30	4,92
8	—	—	—	—	1,60	27,50	1,30	6,75
9	—	—	—	—	—	—	1,30	8,30

В табл. 15 введены следующие обозначения:

$\frac{1}{\eta}$  — коэффициент относительного обжатия в данном пропуске;

$\frac{1}{\eta_{\Sigma}} = \frac{1}{\eta_1} \cdot \frac{1}{\eta_2} \cdot \dots \cdot \frac{1}{\eta_n}$  — коэффициент относительного обжатия за все пропуски от первого до последнего.

Так как расчет калибровки производится «против хода» прокатки, то пропуск № 1 соответствует последнему пропуску.

В большинстве случаев суммарные коэффициенты относительного обжатия по расчету не совпадают точно с суммарными коэффициентами по таблице. В этом случае нужно определить поправочный коэффициент, на который затем следует перемножить каждый из коэффициентов относительного обжатия, принятых по таблице.

Поправочный коэффициент определится из такого уравнения:

$$k = \sqrt[n]{\frac{\left(\frac{1}{\eta_{\Sigma}}\right)_p}{\left(\frac{1}{\eta_{\Sigma}}\right)_T}}, \quad (2-IV)$$

где  $k$  — поправочный коэффициент;

$n$  — число пропусков;

$\left(\frac{1}{\eta_{\Sigma}}\right)_p$  — суммарный коэффициент относительного обжатия по расчету;

$\left(\frac{1}{\eta_{\Sigma}}\right)_T$  — суммарный коэффициент относительного обжатия по табл. 15.

Для упрощения расчетов формулу (2—IV) представляем в виде номограммы (рис. 125).

Далее определяются обжатия по проходам, так как известна конечная толщина и последовательный ряд коэффициентов относительных обжатий. Вычислив обжатия, определяем уширение по формуле (23—I).

При прокатке в калибрах, где имеется ограничение уширения, необходимо учитывать стесняющее действие калибров. В этом случае уширение будет выражаться такой формулой:

$$\left(\frac{\Delta b}{\Delta h}\right)_K = k_i \frac{\Delta b}{\Delta h},$$

где  $\frac{\Delta b}{\Delta h}$  — коэффициент уширения на гладкой бочке;

$\left(\frac{\Delta b}{\Delta h}\right)_K$  — коэффициент уширения в калибрах;

$k_i$  — поправочный коэффициент уширения.

По данным А. П. Чекмарева (см. табл. 14) этот коэффициент можно принять равным 0,425.

В процессе расчета проверяют, не превышает ли угол захвата своего предельного значения.

В табл. 15 величины коэффициентов относительного обжатия при прокатке полос зависят от выбранного режима прокатки.

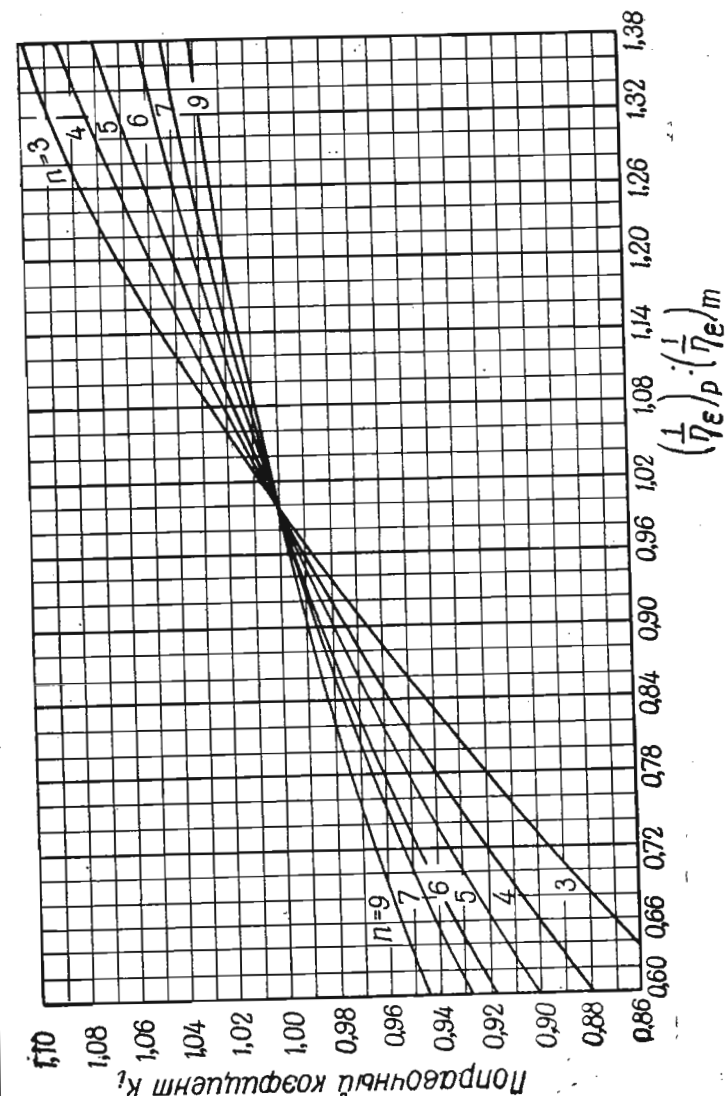


Рис. 125. Номограмма для определения поправочного коэффициента обжатий при прокатке полосовой стали

Режимы прокатки А. П. Чекмарев разделяет на: весьма энергичный, энергичный, средний и слабый. Выбор режима зависит от пластичности стали, мощности двигателя, размеров исходной заготовки и т. д.

А. П. Чекмарев рекомендует следующим образом назначать режимы обжатий<sup>1</sup>:

а) Весьма энергичный режим может быть принят при высоко нагретых малоуглеродистых сталях хорошего качества, не вызывающих опасений в отношении появления трещин, при прочной конструкции стана и двигателе достаточной мощности.

б) Энергичный режим работы, соответствующий вышесредним по величине коэффициентам уменьшения высот, принимается при соответственно выше средних условиях работы для мало- и среднеуглеродистых сталей.

в) Средний режим соответствует средним величинам относительных обжатий, принимается при прокатке невысоконагретого или низкого по качеству мягкого металла, при прокатке среднеуглеродистых сталей при недостаточно прочной конструкции стана и слабом двигателе.

г) Слабый режим обжатий принимается при прокатке высокоуглеродистых легированных сталей, требующих осторожных обжатий».

ПРИМЕР 35. Сторона исходного квадратного сечения  $c = 75$  мм. Высота полосы (в горячем состоянии)  $h_1 = 8,12$  мм (см. пример 34).

Мощность двигателя и прочность деталей стана, а также качество материала и технология нагрева позволяют выбрать энергичный режим прокатки.

Определить число пропусков и коэффициент обжатия по пропускам.

Суммарный коэффициент относительного обжатия по расчету:

$$\frac{1}{\eta_{\Sigma}} = \frac{75}{8,12} = 9,24.$$

Согласно табл. 15 ближайший суммарный коэффициент равен 10,78 и соответствует пяти пропускам.

Этому коэффициенту соответствует такой ряд коэффициентов относительного обжатия по пропускам: 1,30; 1,50; 1,70; 1,80; 1,80.

Для определения ряда коэффициентов, произведение которых равно 9,24, определяем поправочный коэффициент.

<sup>1</sup> А. П. Чекмарев и др. Курс прокатки в сжатом виде. ОНТИ, 1936, стр. 125.

По номограмме (рис. 125) при

$$\left(\frac{1}{\eta_{\Sigma}}\right)_p = \frac{9,24}{10,78} = 0,858$$

$$\left(\frac{1}{\eta_{\Sigma}}\right)_T$$

поправочный коэффициент  $k = 0,968$ .

Действительные коэффициенты относительного обжатия по пропускам:

1 пропуск	$1,30 \cdot 0,968 = 1,26$
2 »	$1,50 \cdot 0,968 = 1,46$
3 »	$1,70 \cdot 0,968 = 1,65$
4 »	$1,80 \cdot 0,968 = 1,74$
5 »	$1,80 \cdot 0,968 = 1,74$

Суммарный коэффициент относительного обжатия  $\frac{1}{\eta_{\Sigma}} = 9,24$ .

#### § 4. Конструкция закрытых калибров

При проектировании закрытых калибров для прокатки полосовой стали надо предварительно определить следующие параметры: а) величину выпуска (уклона) стенок калибра; б) величину закруглений внутренних углов калибра или фасок; в) высоту буртов; г) максимально возможную высоту подъема верхнего валка.

На основании практических данных можно рекомендовать следующие величины, необходимые для построения калибров (рис. 126):

1. Выпуск при полосе шириной 8—40 мм. Для первых по ходу прокатки калибров (черновых) — 3%; для чистовых калибров — 1,5%; для более широких полос выпуск в черновых калибрах можно принимать равным 4—5%, а в чистовых калибрах — 3%. При наличии таких выпусков заклинивания полосы в калибре не наблюдается, и профиль полосы не искажается.

2. Радиус закруглений может быть принят таким:

В черновых калибрах	$r = 0,25 h_{1 \text{ мин}}$
В предчистовом калибре	$r = 0,1 h_{1 \text{ мин}}$
В чистовом	$r = 0$

3. Высота открытой части калибра, входящая в закрытую:

$$H = h_{\text{макс}} - h_{\text{мин}} + s + 5 \text{ мм},$$

где  $s$  — величина зазора между буртами.

Можно принимать  $s \approx 2$  мм для наименьшей по толщине полосы.

Высота закрытой части калибра:

$$H' = h_{1\text{макс}} + 5 \text{ мм.}$$

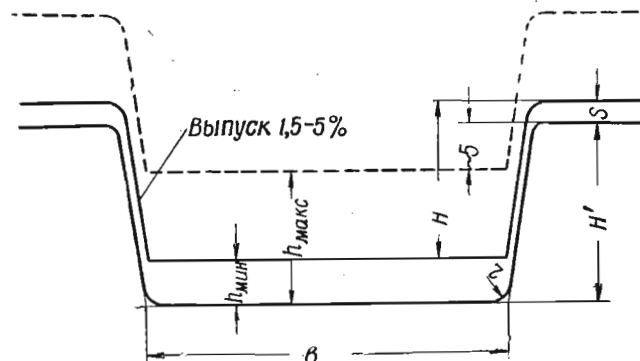


Рис. 126. Конструкция закрытого калибра для прокатки полосовой стали

Ширину калибров берут согласно расчету.

Разность толщин полос, прокатанных в одних и тех же калибрах, на практике достигает 30—35 мм, но в этом случае

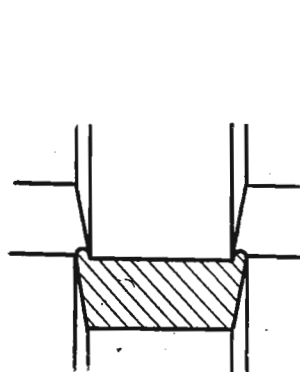


Рис. 127. Переполнение закрытого калибра при большом растворе валков

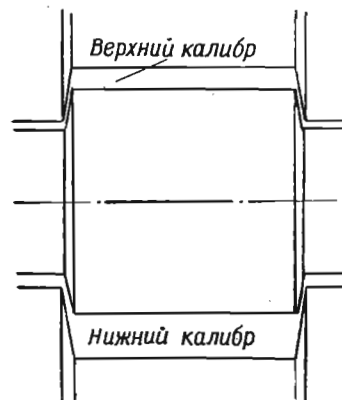


Рис. 128. Расположение соприкасающихся калибров

вследствие уклона стенок образуются большие зазоры, и металл может выдавливаться через них, давая закаты (рис. 127).

Для устранения переполнения не следует давать разность

толщин больше 20 мм. Чтобы избежать заусенцев, валки трех-валковых станков следует растачивать, как показано на рис. 128, и катать полосу без кантовки.

### § 5. Пример расчета калибровки полосовой стали при прокатке в закрытых калибрах

**ПРИМЕР 36.** Рассчитать калибровку для прокатки полосы шириной 90 мм и толщиной 8 мм в валках диаметром 400 мм. Прокатка производится в закрытых калибрах; температура заготовки при выдаче из заготовочной клетки 1000°, температура в конце прокатки 900°.

Размеры полосы в горячем состоянии:

$$b_1 = 1,015 \cdot 90 = 91,4 \text{ мм}; \quad h_1 = 1,015 \cdot 8 = 8,12 \text{ мм.}$$

Ориентировочные размеры исходного квадратного сечения  $c = 75$  мм (см. пример 34).

Коэффициенты относительного обжатия по проходам  $\frac{1}{\eta_5} = 1,26$ ;

$$\frac{1}{\eta_4} = 1,46; \quad \frac{1}{\eta_3} = 1,65; \quad \frac{1}{\eta_2} = 1,74; \quad \frac{1}{\eta_1} = 1,74 \text{ (см. пример 35).}$$

**V калибр**

Высота полосы до прокатки:

$$h_0 = \frac{1}{\eta_5} h_1 = 1,26 \cdot 8,12 = 10,2 \text{ мм.}$$

Обжатие:

$$\Delta h = h_0 - h_1 = 10,2 - 8,12 = 2,08 \text{ мм.}$$

Относительное обжатие:

$$\frac{\Delta h}{h_0} = \frac{2,08}{10,2} = 0,202.$$

При  $t = 900^\circ$  коэффициент трения  $\mu = 0,33$  (см. рис. 13).

Рабочий диаметр валков:

$$D_p = D - h_1 = 400 - 8,12 \approx 392 \text{ мм.}$$

Отношение рабочего диаметра к высоте полосы:

$$\frac{D_p}{h_0} = \frac{392}{10,2} = 38,4.$$

По формуле (23—I) определяем коэффициент уширения:

$$\frac{\Delta b}{\Delta h} = 1,28.$$

Коэффициент уширения при прокатке в калибре:

$$\left(\frac{\Delta b}{\Delta h}\right)_K = 0,425 \frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,425 \cdot 1,28 = 0,543.$$

Линейное уширение при прокатке в калибре:

$$\Delta b_K = 0,543 \Delta h_K = 0,543 \cdot 2,08 = 1,1 \text{ мм.}$$

Ширина полосы до прокатки в V калибре (исходная):

$$b_0 = b_1 - \Delta b = 91,4 - 1,1 = 90,3 \text{ мм.}$$

IV калибр

$$h_0 = h_1 \frac{1}{\eta_4} = 10,2 \cdot 1,46 = 14,9 \text{ мм;}$$

$$\Delta h = h_0 - h_1 = 14,9 - 10,2 = 4,7 \text{ мм;}$$

$$\frac{\Delta h}{h_0} = \frac{4,7}{14,9} = 0,315;$$

$$D_p = D - h_1 = 400 - 10,2 \approx 390 \text{ мм;}$$

$$\frac{D_p}{h_0} = \frac{390}{14,9} = 26,8.$$

Температура прокатки:  $930^\circ$ ;  $\mu = 0,32$ .

По формуле (23—I):

$$\frac{\Delta b}{\Delta h} = 1,28;$$

$$\left(\frac{\Delta b}{\Delta h}\right)_K = 0,425 \cdot 1,36 = 0,542;$$

$$\Delta b_K = 0,542 \Delta h = 0,542 \cdot 4,7 = 2,5 \text{ мм;}$$

$$b_0 = b_1 - \Delta b = 90,3 - 2,5 = 87,8 \text{ мм.}$$

III калибр

$$h_0 = 14,9 \cdot 1,65 = 24,6 \text{ мм;}$$

$$\Delta h = h_0 - h_1 = 24,6 - 14,9 = 9,7 \text{ мм;}$$

$$\frac{\Delta h}{h_0} = \frac{9,7}{24,6} = 0,394;$$

$$D_p = 400 - 14,9 \approx 385;$$

$$\frac{D_p}{h_0} = \frac{385}{24,6} = 15,6 \text{ мм.}$$

Температура прокатки:  $960^\circ$ ;  $\mu = 0,31$ .

По формуле (23—I):

$$\frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,965;$$

$$\left(\frac{\Delta b}{\Delta h}\right)_K = k_i \frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,425 \cdot 0,965 = 0,407;$$

$$\Delta b_K = 0,407 \Delta h = 0,407 \cdot 9,7 = 3,9 \text{ мм;}$$

$$b_0 = b_1 - \Delta b = 87,8 - 3,9 = 83,9 \text{ мм.}$$

II калибр

$$h_0 = 24,6 \cdot 1,74 = 42,8 \text{ мм;}$$

$$\Delta h = h_0 - h_1 = 42,8 - 24,6 = 18,2 \text{ мм;}$$

$$\frac{\Delta h}{h_0} = \frac{18,2}{42,8} = 0,426;$$

$$D_p = D - h_1 = 400 - 24,6 \approx 375 \text{ мм;}$$

$$\frac{D_p}{h_0} = \frac{375}{42,8} = 8,77.$$

Температура прокатки  $980^\circ$ ,  $\mu = 0,31$ .

По формуле (33—I):

$$\frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,76;$$

$$\left(\frac{\Delta b}{\Delta h}\right)_K = 0,425 \frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,425 \cdot 0,76 = 0,32;$$

$$\Delta b_K = 0,32 \Delta h = 0,32 \cdot 18,2 = 5,8 \text{ мм;}$$

$$b_0 = b_1 - \Delta b = 83,9 - 5,8 = 78,1 \text{ мм.}$$

Итак, высота и ширина полосы, задаваемой во второй калибр и, следовательно, выходящей из I калибра, такие: высота  $h_0 = 42,8 \text{ мм}$ , ширина  $b_0 = 78,1 \text{ мм}$ .

Выше, задав приближенное, среднее за все проходы, значение коэффициента уширения  $\frac{\Delta b}{\Delta h}$ , мы ориентировочно определили размеры исходного квадратного сечения, задаваемого в первый калибр. Они были равны  $75 \times 75 \text{ мм}$ .

Теперь значения коэффициента  $\frac{\Delta b}{\Delta h}$  уточнены; они отличаются от предварительно заданного приближенного значения. Естественно, что в связи с этим изменятся и размеры исходного квадратного сечения.

Учитывая это, определим теперь уже окончательные размеры исходного квадратного сечения, задаваемого в первый калибр.



Предположим сначала, что уширение свободное. Тогда по формуле (28—I) имеем:

$$\Delta h = \frac{b_1 - a_0 h_1}{a_0 + \frac{\Delta b}{\Delta h}}$$

По условию  $a_0 = 1$  и, следовательно:

$$\Delta h = \frac{b_1 - h_1}{1 + \frac{\Delta b}{\Delta h}}$$

Предварительно примем  $\frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,5$ .

В таком случае

$$\Delta h = \frac{78,1 - 42,8}{1 + 0,5} = \frac{35,3}{1,5} = 23,6 \text{ мм};$$

$$h_0 = h_1 + \Delta h = 42,8 + 23,6 = 66,4 \text{ мм};$$

$$\frac{\Delta h}{h_0} = \frac{23,6}{66,4} = 0,355;$$

$$D_p = D - h_1 = 400 - 42,8 \approx 357 \text{ мм};$$

$$\frac{D_p}{h_0} = \frac{357}{66,4} = 5,38.$$

По формуле (23—I):

$$\frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,494.$$

Коэффициент уширения в калибре:

$$\left(\frac{\Delta b}{\Delta h}\right)_k = k_i \frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,425 \cdot 0,494 = 0,21.$$

Обжатие в калибре:

$$\Delta h = \frac{35,3}{1 + 0,21} = 29,2 \text{ мм}.$$

Высота и ширина квадратной заготовки:

$$h_0 = b_0 = h_1 + \Delta h = 42,8 + 29,2 = 72 \text{ мм}.$$

Проверка:

$$\Delta b = 0,21 \Delta h = 0,21 \cdot 29,2 = 6,1 \text{ мм};$$

$$b_0 = b_1 - \Delta b = 78,1 - 6,1 = 72 \text{ мм}.$$

Итак, окончательно размеры исходной квадратной заготовки будут равны  $72 \times 72 \text{ мм}$ .

Результаты расчета калибровки сведены в табл. 16.

Таблица 16.

Калибровка полосы  $90 \times 8 \text{ мм}$  из среднеуглеродистой стали (прокатка в закрытых калибрах)

№ про- пуска	$\frac{1}{\eta}$	$h_0$ мм	$b_0$ мм	$h_1$ мм	$b_1$ мм	$\Delta h$ мм	$\Delta b_k$ мм	$t$ °С	$\mu$	$D_p$ мм	$\left(\frac{\Delta b}{\Delta h}\right)_k$	$\alpha$	$\beta$	$\lambda$
1	1,69	72,0	72,0	42,8	78,1	29,2	6,1	1000	0,31	358	0,21	23°	1,085	1,56
2	1,74	42,8	78,1	24,6	83,7	18,2	5,8	980	0,31	375	0,32	18°30'	1,068	1,59
3	1,65	24,6	83,9	14,9	87,8	9,7	3,9	960	0,31	385	0,407	13°	1,050	1,57
4	1,46	14,9	87,8	10,2	90,3	4,7	2,5	930	0,32	390	0,542	8°30'	1,035	1,41
5	1,26	10,2	90,3	8,12	91,4	2,08	1,1	900	0,33	392	0,543	6°	1,012	1,24

## § 6. Расчет калибровки полосовой стали при прокладке на гладких валках

При прокатке полосовой стали в гладких (или ступенчатых) валках последний пропуск осуществляется в валках с закаленной поверхностью. Эти валки часто называются барабанами. Последнему пропуску предшествует ребровой калибр, а затем прокатка производится снова на гладких валках.

Получение прямоугольных сечений с острыми ребрами у готового профиля полосы возможно лишь при небольших обжатиях в последнем проходе.

Ввиду того, что имеется ребровой пропуск, уменьшающий уширение, описанный выше порядок расчета калибровки целесообразно несколько изменить.

Сначала рассчитывают деформацию в последнем и ребровом калибре, задаваясь линейными обжатиями, а затем уже рассчитывается исходное квадратное сечение в том же порядке, что и в случае прокатки в калибрах.

По данным практики, обжатия в последнем проходе могут быть рекомендованы такие (24):

а) для полос толщиной свыше 20 мм для сталей рядовых марок  $\Delta h = 5 \text{ мм}$ ; для качественных сталей  $\Delta h = 3 \text{ мм}$ ;

б) для полос толщиной меньше 20 мм и для сталей рядовых марок  $\Delta h = 2-3 \text{ мм}$  и для качественных сталей  $\Delta h = 1-2 \text{ мм}$ .

В результате расчета деформации в чистовом калибре получают размеры полосы, выходящей из ребрового калибра. Обжатия в ребровом калибре выбираются в пределах 5—15% от высоты полосы. При большей величине обжатия возможно искривление сечения, поставленного на ребро. Чем меньше толщина полосы, тем меньше должно быть обжатие в ребровом калибре.

Высота ребрового калибра, как сказано выше, определяется расчетом ширины полосы до задачи в чистовые валки (рис. 129). Дно калибра делается вогнутым с той целью, чтобы при прокатке на гладкой бочке получить ровные кромки. Величина выпуклости  $m$  берется равной 0,2—0,5 мм. Нижний предел — для более тонких полос, верхний — для более толстых.

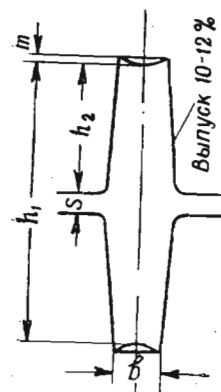


Рис. 129. Конструкция ребрового калибра

Ширина калибра  $b$  равна толщине полосы, задаваемой в чистовой калибр. Выпуск принимается равным 10—12%. Величина зазора  $S$  между валками достигает 10—15 мм.

В случае требования получения полос с выпуклыми боковыми кромками, ребровые калибры в основании вогнутости не имеют и, в случае необходимости, снабжаются выпуклостью.

Если прокатка производится в ступенчатых валках, то расстояния между валками в ступенях должны соответствовать толщине выходящих полос. Обычно прокатку производят с небольшими верхними давлениями. Диаметры определяют тем же способом, что и в трехвалковом обжимном стане [6]. При изменении расстояния между валками можно получить полосы разной толщины.

Ширину ступеней выбирают так, чтобы они были кратны ширине прокатываемых полос плюс 50 мм.

При выборе коэффициента обжатия следует иметь в виду, что пропуск перед ребровым калибром является фактически третьим от конца. Принимая это во внимание, А. П. Чекмарев [28] получил таблицу, пригодную для выбора коэффициентов обжатия при прокатке полос в гладких валках (табл. 17).

**ПРИМЕР 37.** Рассчитать калибровку для прокатки полосы шириной 60 мм и толщиной 12 мм в гладких валках диаметром 350 мм.

Прокатываемый материал — Ст. 3. Температура прокатки после выхода полосы из заготовочной клетки 1100°, температура полосы в конце прокатки 950°.

Размеры полосы в горячем состоянии.

$$b_1 = 60 \cdot 1,015 = 60,9 \text{ мм}; \quad h_1 = 12 \cdot 1,015 = 12,18 \text{ мм}.$$

1. Рассчитаем деформацию полосы в последнем пропуске.

Примем обжатие в последнем пропуске  $\Delta h = 3$  мм. Тогда высота полосы до прокатки в последнем пропуске

$$h_0 = h_1 + \Delta h = 12,18 + 3 = 15,18 \text{ мм};$$

$D_p = D = 350$  мм (так как прокатка производится на барабане)

Таблица 17

Коэффициенты обжатия при прокатке полос в гладких валках по А. П. Чекмареву

№ пропуска	Весьма энергичный режим прокатки		Энергичный режим прокатки		Средний режим прокатки		Слабый режим прокатки	
	$\frac{1}{\eta}$	$\frac{1}{\eta_{\Sigma}}$	$\frac{1}{\eta}$	$\frac{1}{\eta_{\Sigma}}$	$\frac{1}{\eta}$	$\frac{1}{\eta_{\Sigma}}$	$\frac{1}{\eta}$	$\frac{1}{\eta_{\Sigma}}$
1	1,60	1,60	1,50	1,50	1,40	1,40	1,20	1,20
2	1,80	2,88	1,70	2,55	1,50	2,10	1,25	1,50
3	2,00	5,76	1,80	4,59	1,60	3,36	1,30	1,95
4	2,00	11,52	1,80	8,25	1,60	5,37	1,30	2,54
5	2,00	23,00	1,80	14,89	1,60	8,61	1,30	3,30
6	—	—	1,80	26,50	1,60	13,77	1,30	4,28
7	—	—	—	—	1,60	22,00	1,30	5,58
8	—	—	—	—	—	—	1,30	7,25

При температуре 950° коэффициент трения  $\mu = 0,32$ .

$$\frac{\Delta h}{h_0} = \frac{3}{15,18} = 0,198; \quad \frac{D_p}{h_0} = \frac{350}{15,18} = 23,0.$$

Подставляя эти значения  $\mu$ ,  $\frac{\Delta h}{h_0}$ ,  $\frac{D_p}{h_0}$  в формулу (23—I), получаем, что относительное уширение равно

$$\frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,914;$$

$$\Delta b = 0,914 \Delta h = 0,914 \cdot 3 = 2,7 \text{ мм}.$$

Ширина полосы до прокатки в последнем пропуске:

$$b_0 = b_1 - \Delta b = 60,9 - 2,7 = 58,2 \text{ мм}.$$

2. Рассчитаем деформацию полосы в ребровом пропуске.

Примем обжатие в ребровом пропуске равным 10% от высоты полосы. Принимая во внимание наличие кантовки, получим:

$$\Delta h = 0,1 h_1 = 0,1 \cdot 58,2 \approx 5,8 \text{ мм};$$

$$h_0 = h_1 + \Delta h = 58,2 + 5,8 = 64 \text{ мм};$$

$$D_p = D - h_1 = 350 - 58,2 = 292,8 \text{ мм}.$$

Принимая падение температуры по пропускam равномерным, получим температуру прокатки в ребровом пропуске равной 980°, чему соответствует коэффициент трения  $\mu = 0,31$ :

$$\frac{b_0}{h_0} = \frac{15,18}{64} = 0,238; \quad \frac{\Delta h}{h_0} = \frac{5,8}{64} = 0,091;$$

$$\frac{D_p}{h_0} = \frac{292,8}{64} = 4,52.$$

Подставляя эти значения в формулу (22—I), получим, что коэффициент уширения

$$\frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,055;$$

$$\Delta b = 0,055 \Delta h = 0,055 \cdot 5,8 = 0,32 \text{ мм};$$

$$b_0 = b_1 - \Delta b = 15,18 - 0,32 = 14,9 \text{ мм}.$$

Итак, полоса до прокатки в ребровом калибре имеет размеры поперечного сечения  $14,9 \times 64 \text{ мм}$ .

Во всех пропусках, предшествующих ребровому, полоса прокатывается «напласт».

3. Принимая это во внимание, определим ориентировочные размеры исходного квадратного сечения по формуле (I—IV):

$$c = \frac{b_1 + \left(\frac{\Delta b}{\Delta h}\right)_{\text{ср}} h_1}{1 + \left(\frac{\Delta b}{\Delta h}\right)_{\text{ср}}}.$$

Примем ориентировочно  $\frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,6$  (см. табл. 14):

$$c = \frac{64 + 0,6 \cdot 14,9}{1 + 0,6} = 45,5 \text{ мм}.$$

4. Определим теперь число проходов и коэффициенты относительного обжатия по пропускам.

Суммарный коэффициент относительного обжатия по расчету:

$$\left(\frac{1}{\eta_{\Sigma}}\right)_p = \frac{45,5}{14,9} = 3,05.$$

Выбирая средний режим по табл. 17, находим, что

$$\left(\frac{1}{\eta_{\Sigma}}\right)_T = 3,36,$$

чему соответствуют три пропуска с коэффициентами относительного обжатия:

$$\frac{1}{\eta_3} = 1,4; \quad \frac{1}{\eta_2} = 1,5; \quad \frac{1}{\eta_1} = 1,6.$$

В таком случае отношение суммарных коэффициентов относительного обжатия:

$$\left(\frac{1}{\eta_{\Sigma}}\right)_p : \left(\frac{1}{\eta_{\Sigma}}\right)_T = 0,908.$$

Этому по номограмме (рис. 125) соответствует поправочный коэффициент  $k = 0,967$ .

Коэффициенты относительного обжатия по пропускам соответственно получим путем перемножения коэффициентов по табл. 17 на поправочный коэффициент  $k = 0,967$ :

$$\frac{1}{\eta_3} = 1,35; \quad \frac{1}{\eta_2} = 1,45; \quad \frac{1}{\eta_1} = 1,56; \quad \frac{1}{\eta_{\Sigma}} = 3,05.$$

5. Рассчитаем деформацию в третьем пропуске:

$$h_0 = \frac{1}{\eta_3} h_1 = 1,35 \cdot 14,9 = 20,2 \text{ мм};$$

$$\Delta h = h_0 - h_1 = 20,2 - 14,9 = 5,3 \text{ мм}.$$

Считаем, что прокатку ведем в ступенчатых валках, тогда

$$D_p = D - h_1 = 350 - 14,9 \approx 335 \text{ мм}.$$

Температура в третьем пропуске  $1010^\circ$ , этому соответствует  $\mu = 0,3$  (см. рис. 13).

$$\frac{\Delta h}{h_0} = \frac{5,3}{20,2} = 0,26; \quad \frac{D_p}{h_0} = \frac{335}{20,2} = 16,6.$$

По формуле (23—I):

$$\frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,83;$$

$$\Delta b = 0,83 \cdot \Delta h = 0,83 \cdot 5,3 = 4,4 \text{ мм};$$

$$b_0 = b_1 - \Delta b = 64 - 4,4 = 59,6 \text{ мм}.$$

6. Расчет деформации во втором пропуске:

$$h_0 = \frac{1}{\eta_2} h_1 = 1,45 \cdot 20,2 = 29,3 \text{ мм};$$

$$\Delta h = h_0 - h_1 = 29,3 - 20,2 = 9,1 \text{ мм};$$

$$D_p = D - h_1 = 350 - 20,2 \approx 330 \text{ мм}.$$

Температура прокатки  $1040^\circ$ ,  $\mu = 0,30$  (см. рис. 13).

$$\frac{\Delta h}{h_0} = \frac{9,1}{29,3} = 0,31; \quad \frac{D_p}{h_0} = \frac{330}{29,3} = 11,3.$$

По формуле (23—I):

$$\frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,73;$$

$$\Delta b = 0,73 \cdot \Delta h = 0,73 \cdot 9,1 = 6,6 \text{ мм};$$

$$b_0 = b_1 - \Delta b = 59,6 - 6,6 = 53,0 \text{ мм}.$$

7. Расчет деформации в первом пропуске.

Предварительно примем  $\frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,55$ .

По равенству (28—I) имеем:

$$\Delta h = \frac{b_1 - a_0 h_1}{a_0 + \frac{\Delta b}{\Delta h}} = \frac{53 - 1,0 \cdot 29,3}{1 + 0,55} = \frac{23,7}{1,55} = 15,3 \text{ мм};$$

$$h_0 = h_1 + \Delta h = 29,3 + 15,3 = 44,6 \text{ мм};$$

$$\frac{\Delta h}{h_0} = \frac{15,3}{44,6} = 0,344;$$

$$D_p = D - h_1 = 350 - 29,3 \approx 321 \text{ мм};$$

$$\frac{D_p}{h_0} = \frac{321}{44,6} = 7,2.$$

По формуле (23—I):

$$\frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,549 \approx 0,55 \text{ — перерасчета не требуется.}$$

Ширина квадратной заготовки:

$$b_0 = h_0 = 44,6 \text{ мм.}$$

Проверка:

$$\Delta b = 0,55 \Delta h = 0,55 \cdot 15,3 = 8,4 \text{ мм};$$

$$b_0 = b_1 - \Delta b = 53,0 - 8,4 = 44,6 \text{ мм.}$$

Размеры исходной квадратной заготовки окончательно прием равными  $45 \times 45 \text{ мм}$ .

Результаты расчета калибровки сводим в табл. 18.

Калибровка полосовой стали в

№ пропуски	$\frac{1}{\eta}$	$h_0$ мм	$b_0$ мм	$h_1$ мм	$b_1$ мм	$\Delta h$ мм	$\Delta b_K$ мм	$t$ °C
1	1,50	44,6	44,6	29,3	53,0	15,3	8,4	1070
2	1,45	29,3	53,0	20,2	59,6	9,1	6,6	1040
3	1,36	20,2	59,6	14,9	64,0	5,3	4,4	1010
4	1,10	64,0	14,9	58,2	15,18	5,8	0,28	980
5	1,25	15,18	58,2	12,18	60,9	3,0	2,7	950

## § 7. Калибровка профилей, относимых к полосовой стали

В сортаменте прокатных изделий имеется много профилей, форма которых близка к полосовой стали.

На рис. 130—133 приводятся примеры таких профилей.

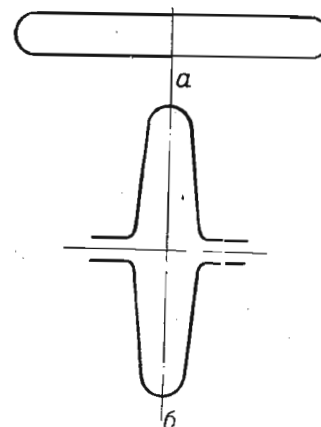


Рис. 130. Полоса, применяемая для шин и рессор:  
а — с закругленными краями;  
б — ребровой калибр с закруглениями

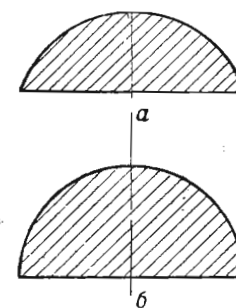


Рис. 131. Профили, калибровка которых аналогична калибровке полосовой стали:  
а — сталь сегментная;  
б — сталь полукруглая

На рис. 130,а изображена полоса для шин или гладких рессор. Кромки полосы имеют закругления. Прокатка ее производится на гладких валках. Каждый ребровой ручей имеет выпуклое основание (рис. 130,б).

На рис. 131 изображена сталь сегментная и полукруглая (ОСТ 10031—39). Такие профили прокатываются вначале в гладких валках с предпоследним ребровым калибром и чистовым,

Таблица 18

гладких (ступенчатых) валках

$\mu$	$D_p$ мм	$\left(\frac{\Delta b}{\Delta h}\right)_K$	$\alpha$	$\beta$	$\lambda$	Примечания
0,29	321	0,550	18°30'	1,190	1,26	Гладкая бочка
0,30	330	0,730	14°00'	1,125	1,29	»
0,30	335	0,830	11°00'	1,072	1,27	»
0,31	292	0,055	12°00'	1,018	1,07	Ребровый пропуск
0,32	350	0,914	8°30'	1,045	1,20	Барaban

имеющим форму готового профиля. При прокатке крупных профилей после ребрового производится два пропуски — предчистовой и чистовой. Ниже изображены специальные профили: на рис. 132 для сельскохозяйственных машин (ГОСТ 3294—46) и на рис. 133 для парового и вагоностроения (ОСТ 10028—39 и 10031—39).

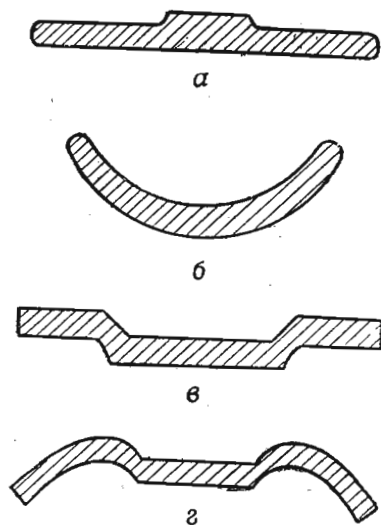


Рис. 132. Профили для сельскохозяйственных машин:

а — сталь полосовая с утолщением;  
б — сталь кругложелобчатая;  
в — сталь одножелобчатая;  
г — сталь одножелобчатая, загнутая

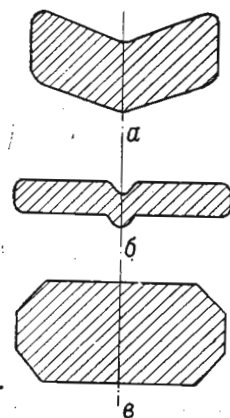


Рис. 133. Профили для парового и вагоностроения:

а — сталь для бандажных колес;  
б — сталь рессорная желобчатая;  
в — сталь для вставки треугольника вагонов

Калибровка всех перечисленных профилей и подобных им может осуществляться по методу, изложенному в настоящей главе. В тех случаях, когда форма поперечного сечения полосы значительно отступает от прямоугольной (например, в последних пропусках при прокатке сегментной и полукруглой стали), расчет следует осуществлять по методу соответственной полосы. Для этого профиль данной полосы пересчитывается на прямоугольный, после чего расчет деформации осуществляется совершенно в том же порядке, как это было изложено в предыдущих разделах настоящей главы. Когда деформация по проходам рассчитана, то по соответственным размерам находят размеры полос и калибров.

При калибровке полосовой стали расчеты по соответственной полосе обычно осуществляются для одного-трех последних по ходу прокатки калибров. Это объясняется тем, что в связи с простой формой профиля первые проходы осуществляются обычно в гладких валках или же в прямоугольных закрытых калибрах.

## ГЛАВА V

### КАЛИБРОВКА НЕПРЕРЫВНЫХ СТАНОВ

#### § 1. Краткие сведения о непрерывных станах

Как известно, в непрерывном стане прокатные клетки расположены последовательно, так что полоса в них прокатывается одновременно в двух и более клетях (рис. 134). Расстояние между клетями непрерывного стана обычно невелико — от 1 до 3 м.

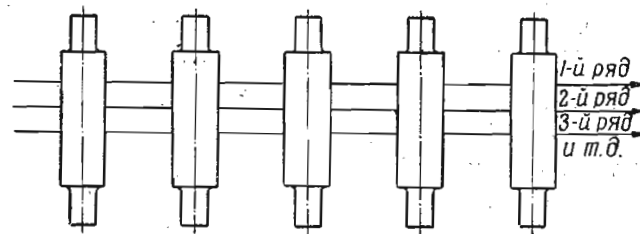


Рис. 134. Расположение клеток непрерывного стана с несколькими (параллельными) рядами калибров

Непрерывные станы особенно часто применяются для прокатки заготовки, ленты, полосовой стали, проволоки-катанки и других простых по форме профилей с выпуклым периметром.

Возвратного движения металла в одной и той же клетке непрерывного стана не бывает. Поэтому все сортовые непрерывные станы имеют в своем составе только двухвалковые клетки. Лишь в составе клеток листопрокатных станов имеются четырехвалковые клетки; калибровка таких станов в настоящей книге не рассматривается.

В каждой клетке непрерывного стана осуществляется один пропуск, поэтому длина бочки валков такого стана невелика, обычно она не превышает диаметра валка. Таким образом, отношение длины бочки к диаметру прокатного валка непрерывного стана меньше, чем в станах с линейным и ступенчатым расположением клеток, что, при прочих равных условиях, обеспечивает более высокую прочность валков непрерывного стана по сравнению с другими станами. В результате и обжатия в каждой паре

валков непрерывного стана могут быть весьма значительными по величине.

Калибры, применяемые при прокатке в валках непрерывного стана, всего чаще выполняются как ящичные, овальные, квадратные и ромбические. Обычно ряд калибров непрерывного стана начинается ящичными калибрами.

Применение непрерывных станов особенно выгодно, когда необходимо обеспечить высокую производительность. Однако это преимущество станов с непрерывным расположением клетей может быть реализовано лишь при наличии узкого сортамента, когда не требуется осуществлять частые перестройки и перевалки стана в связи с переходом на новый размер и на прокатку других сортов.

Диаметр валков непрерывных станов в зависимости от назначения их бывает от 240 до 800 мм.

Число клетей непрерывных станов зависит от назначения последних и изменяется в пределах от 2 до 23. Для облегчения постройки клетки часто разделяют на обособленные группы.

Помимо чисто непрерывных станов существуют еще станы с последовательным расположением клетей. В этом заключается сходство их с непрерывными станами. Отличие же между ними состоит в том, что у станов с последовательным расположением клетей расстояние между клетями назначается так, что полоса при прокатке во всякий данный момент находится только в одной клетке.

Такое расположение часто используется при прокатке полос крупного сечения, так как в этом случае длина полос обычно велика и указанное расположение клетей не вызывает чрезмерного роста длины (площади) цеха.

Клетки стана с последовательным расположением часто устанавливаются в несколько параллельных линий, так что при прокатке перемещение металла по цеху происходит с переменной направлением. Наибольшим распространением пользуются станы, у которых клетки расположены зигзагообразно или же в шахматном порядке.

По типу привода непрерывные станы можно разделить на следующие две основные группы:

1) станы с жесткой кинематической связью — валки каждой группы клетей такого стана приводятся в движение от одного мотора через общий редуктор;

2) станы без жесткой кинематической связи — валки каждой клетки стана приводятся в движение от самостоятельного, отдельного мотора.

Калибровка станов первой группы несколько сложнее, чем калибровка станов второй группы или станов, расположение клетей у которых не является непрерывным. Действительно,

у станов первого типа требуется обеспечивать условие постоянства секундного объема металла для всех клетей уже при осуществлении расчета калибровки.

Для станов второго типа выполнение указанного условия не является столь обязательным. Дело в том, что непрерывные станы с индивидуальным приводом валков обычно снабжаются двигателями, число оборотов которых можно регулировать в довольно широких пределах. Таким образом, уже в процессе прокатки постоянство секундных объемов может быть обеспечено путем соответствующей настройки.

Из изложенного видно, что непрерывные станы имеют сравнительно узкий сортамент. Для того, чтобы его расширить, используют такие пути: во-первых, более крупные сечения получают из промежуточных клетей, не используя последующих (рис. 135) [28]; во-вторых, изготавливают на валках несколько параллельных рядов калибров для получения профилей различных размеров (рис. 134 и 135).

## § 2. Основные особенности калибровки валков непрерывных станов и прокатки на них

Основные принципы непрерывной прокатки были впервые систематически изложены в нашей литературе А. П. Виноградовым [4].

Для осуществления процесса непрерывной прокатки без нарушений, необходимо, чтобы объем металла, проходящий между валками в единицу времени, был одинаковым для каждой клетки.

Условимся, что индексом 1 обозначается первая по ходу прокатки клетка непрерывного стана, индексом  $i$  — любая промежуточная клетка и индексом  $n$  — последняя по ходу прокатки клетка непрерывного стана.

Обозначим:

$\omega_0$  — площадь поперечного сечения полосы перед подачей ее в первую клетку непрерывного стана;

$C_0$  — скорости выхода полосы из 1...  $i$ ...  $n$  клетей;

$\omega_1, \dots, \omega_i, \dots, \omega_n$  — площади поперечного сечения полос после выхода из 1...  $i$ ...  $n$  клетей;

$C_1, \dots, C_i, \dots, C_n$  — скорости выхода полосы из 1...  $i$ ...  $n$  клетей;

$v_1, \dots, v_i, \dots, v_n$  — окружные скорости валков в 1...  $i$ ...  $n$  клетях.

Благодаря наличию опережения и отставания всегда имеем такое соотношение между скоростями полосы и валков:

$$C_0 < v_1 < C_1 < v_2 < C_2 < \dots < v_i < C_i < \dots < v_n < C_n.$$

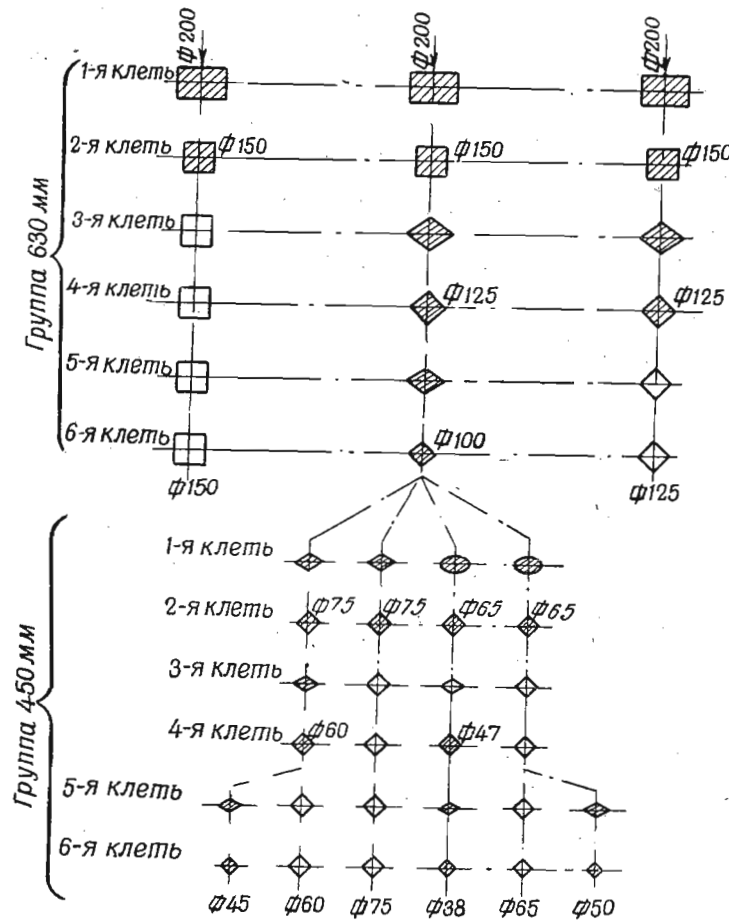


Рис. 135. Прокатка в параллельных рядах калибров непрерывного заготовочного стана

Как известно, опережение  $S_i$  определяется равенством:

$$S_i = \frac{C_i - v_i}{v_i},$$

откуда:

$$\frac{C_i}{v_i} = S_i + 1.$$

Это отношение будем называть коэффициентами опережения. Введем для него такое обозначение:

$$\frac{C_i}{v_i} = \alpha_i.$$

Учитывая опережение, можем написать такие соотношения между скоростями полосы и валков:

$$C_1 = v_1 \alpha_1;$$

$$C_2 = v_2 \alpha_2;$$

$$C_3 = v_3 \alpha_3;$$

$$\dots$$

$$\dots$$

$$C_i = v_i \alpha_i;$$

$$\dots$$

$$\dots$$

$$C_n = v_n \alpha_n.$$

Как уже было указано, секундный объем металла, проходящий в процессе прокатки через каждую клеть, должен быть одинаковым, т. е.:

$$C_1 \omega_1 = C_2 \omega_2 = \dots = C_i \omega_i = \dots = C_n \omega_n = \text{const.}$$

Принимая во внимание предыдущие соотношения, можем написать условие постоянства секундных объемов и в таком виде:

$$\omega_1 v_1 \alpha_1 = \omega_2 v_2 \alpha_2 = \dots = \omega_i v_i \alpha_i = \dots = \omega_n v_n \alpha_n = \text{const.}$$

На основании последнего выражения вытяжка  $\lambda_i$  в каждой данной клетки непрерывного стана выражается следующими соотношениями:

$$\lambda_1 = \frac{\omega_0}{\omega_1};$$

$$\lambda_2 = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{v_2}{v_1} \cdot \frac{\alpha_2}{\alpha_1};$$

$$\dots$$



$$\lambda_i = \frac{\omega_{i-1}}{\omega_i} = \frac{v_i}{v_{i-1}} \cdot \frac{\alpha_i}{\alpha_{i-1}};$$

$$\lambda_n = \frac{\omega_{n-1}}{\omega_n} = \frac{v_n}{v_{n-1}} \cdot \frac{\alpha_n}{\alpha_{n-1}}.$$

Окружная скорость валков в клетях  $i$ :

$$v_i = \frac{\pi D_{pi} n_i}{60};$$

где  $D_{pi}$  — рабочий диаметр валков;  
 $n_i$  — число оборотов валков в минуту.

Таким образом, получаем:

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= \frac{\omega_0}{\omega_1}; \\ \lambda_2 &= \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{D_{p2}}{D_{p1}} \cdot \frac{n_2}{n_1} \cdot \frac{\alpha_2}{\alpha_1}; \\ &\dots \\ \lambda_i &= \frac{\omega_{i-1}}{\omega_i} = \frac{D_{pi}}{D_{pi-1}} \cdot \frac{n_i}{n_{i-1}} \cdot \frac{\alpha_i}{\alpha_{i-1}}; \\ &\dots \\ \lambda_n &= \frac{\omega_{n-1}}{\omega_n} = \frac{D_{pn}}{D_{pn-1}} \cdot \frac{n_n}{n_{n-1}} \cdot \frac{\alpha_n}{\alpha_{n-1}}. \end{aligned} \quad (1-V)$$

В действительности условие постоянства секундных объемов для каждой клетки непрерывного стана в точности почти никогда не выполняется и поэтому:

$$\left. \begin{aligned} \lambda_i &\geq \frac{v_i}{v_{i-1}} \cdot \frac{\alpha_i}{\alpha_{i-1}} \\ \lambda_i &< \frac{v_i}{v_{i-1}} \cdot \frac{\alpha_i}{\alpha_{i-1}} \\ \lambda_i &\geq \frac{D_{pi}}{D_{pi-1}} \cdot \frac{n_i}{n_{i-1}} \cdot \frac{\alpha_i}{\alpha_{i-1}} \\ \lambda_i &< \frac{D_{pi}}{D_{pi-1}} \cdot \frac{n_i}{n_{i-1}} \cdot \frac{\alpha_i}{\alpha_{i-1}} \end{aligned} \right\} \quad (2-V)$$

Если левая часть этих выражений больше правой, то между двумя данными, следующими друг за другом клетями образует-

ся петля. Если же левая часть выражения (2—V) оказывается меньше правой, то это свидетельствует о том, что при прокатке имеет место натяжение и полоса растягивается валками двух соседних клеток.

Нарушение условия постоянства секундных объемов может произойти в силу ряда обстоятельств.

Как видно из равенства (2—V), это нарушение может произойти, например, вследствие изменения соотношения между коэффициентами опережения. Как известно, опережение находится в прямой зависимости от диаметра валков, обжатия и коэффициента трения при прокатке. В процессе прокатки происходит износ валков, изменение их взаимного положения, вследствие износа подшипников и других подобных причин. В результате этого изменяется величина обжатия. Температура прокатки также не остается постоянной, изменяясь с течением времени в пределах, допускаемых технологическим процессом.

Величина коэффициента опережения в каждой данной клетки непрерывного сортового стана невелика: обычно  $\alpha_i = 1,03 - 1,05$ , и лишь в редких случаях она достигает величины, равной 1,1 (прокатка мелких сечений с большими обжатиями при низких температурах).

Точно учесть величину коэффициента опережения в непрерывном стане пока не представляется возможным. Поэтому несоответствие между вытяжкой и отношением скоростей в соседних клетях, возрастая от одной пары клеток к другой, может иногда вызвать образование значительной петли или же, наоборот, сильное натяжение. Указанные явления крайне нежелательны. Они вызывают искажение профиля, расстройство проводок и линеек, быстрый износ валков, дополнительный расход энергии, удары в шестеренных передачах и соединительных муфтах, нарушение ритма работы стана, разрывы полосы и даже аварии.

Для устранения перечисленных нарушений технологического процесса стан настраивают. Обычно при прокатке профилей крупного сечения и при малом расстоянии между клетями применяют небольшое натяжение. При прокатке профилей мелкого сечения между клетями создают небольшую петлю. В обоих указанных случаях разница между скоростями соседних клеток не превышает 1—2%.

Равенства (2—V) показывают, что в случае нарушения условия постоянства секундных объемов это условие можно восстановить путем соответствующего изменения числа оборотов валков и диаметра их. Диаметр валков в процессе прокатки изменяется только вследствие износа. Число же оборотов валков в станах без жесткой кинематической связи изменяется у каждой клетки в довольно широких пределах по желанию оператора. Таким образом, число оборотов валков в станах без жесткой

кинематической связи и является тем фактором, который используется для настройки стана в процессе прокатки или при переходе на прокатку какого-либо нового профиля.

Порядок калибровки валков непрерывного стана без жесткой кинематической связи ничем не отличается от калибровки сортовых станов других типов. Калибровщику не приходится особенно заботиться о выполнении условия постоянства секундных объемов. Ошибка, которую он здесь допустит в процессе расчета, легко исправима непосредственно в процессе прокатки путем соответствующей регулировки числа оборотов валков по клетям.

Иначе обстоит дело с калибровкой валков для станов с жесткой кинематической связью между валками. В этом случае числа оборотов каждой пары валков находятся между собой в строгом соответствии, определяемом передаточными числами соответствующих зубчатых передач. Изменение числа оборотов двигателя соответственно увеличивает или уменьшает число оборотов всех рабочих валков.

Из изложенного следует, что, осуществляя расчет калибровки такого непрерывного стана, калибровщик должен позаботиться о том, чтобы число оборотов, рабочий диаметр валков, вытяжка полосы находились между собой в строгом соответствии, определяемом равенствами (1—V).

При проектировании нового стана осуществление указанных условий не представляет труда.

Большие затруднения встречаются при проектировании новой калибровки для существующего стана.

Как уже упоминалось, в этом случае для каждой клетки должно выполняться условие:

$$\lambda_i = \frac{\omega_{i-1}}{\omega_i} = \frac{D_{pi} n_i}{D_{pi-1} n_{i-1}} \cdot \frac{\alpha_i}{\alpha_{i-1}}$$

Если положить  $\alpha_{i-1} = \alpha_i$  и принять во внимание, что для станов с жесткой кинематической связью отношение

$$\frac{n_i}{n_{i-1}} = \text{const} = A,$$

то это условие приобретает вид:

$$\lambda_i = A \frac{D_{pi}}{D_{pi-1}}. \quad (3-V)$$

Осуществление этого условия встречает некоторые затруднения потому, что величина рабочих диаметров связана с величиной обжатия при прокатке. От обжатия же и рабочего диаметра зависит уширение полосы и, в конечном счете, вытяжка полосы.

Таким образом, задача разрешима только путем соответствующего подбора — методом последовательных приближений — величины обжатия так, чтобы обеспечить осуществление равенства (3—V).

Еще большие затруднения приходится преодолевать в процессе расчета калибровки валков непрерывного стана с жесткой кинематической связью между валками при наличии нескольких параллельных рядов калибров с тем, чтобы из каждого ряда получить полосы различных размеров и формы.

Метод расчета деформации полосы и построения калибров в этом случае, разумеется, остается таким же, как и для станов иных типов. Главное затруднение связано с тем, что необходимо обеспечить одинаковую вытяжку в смежных калибрах каждого параллельного ряда.

Обычно на валках непрерывного стана делается от 3 до 5 рядов калибров, рассчитанных на выпуск изделий различных размеров и формы сечения.

При этом коэффициенты вытяжек в разных случаях могут быть различными, т. е. мы будем иметь не вполне тождественные ряды их. Таким образом, если для одного ряда числа оборотов валков подобраны правильно, в соответствии с коэффициентами вытяжек в калибрах этого ряда, то в других рядах, поскольку вытяжки там иные, такого соответствия не будет и непрерывная прокатка в них окажется невозможной.

Этим калибровка непрерывного стана сильно осложняется. Задача сводится к тому, чтобы добиться во всех рядах и проходах одинаковых коэффициентов вытяжки.

До последнего времени считалось невозможным добиться полного соответствия вытяжек во всех рядах и калибрах.

Приближенное, но довольно громоздкое решение задачи дано А. П. Виноградовым в 1934 г. [4].

Сущность его сводится к следующему.

Прежде всего рассчитывают калибровку одного наиболее ходового профиля (первый ряд калибров). По этой калибровке устанавливают коэффициенты вытяжки и пользуются ими при калибровке остальных профилей как нормальными, но не обязательными для всех остальных рядов.

Затем проводят расчет калибровки для всех остальных рядов. Эти расчеты будут предварительными, так как вытяжки в них не соответствуют нормальному ряду и, следовательно, для них потребуются иные числа оборотов валков.

Затем калибровку исправляют таким образом, чтобы секундный объем, проходящий через калибры второго, третьего и т. д. рядов, был равен секундному объему металла в первом, нормальном ряду калибров. При этом приходится изменять — увеличивать или уменьшать — площадь калибра, а значит и диаметры

валков. Последнее приводит к изменению величины скоростей в калибрах и к новым пересчетам.

В итоге каждый из рядов калибров приходится пересчитывать по нескольку раз (3—4—5 раз) и все-таки не удастся добиться полного соответствия вытяжек; между клетями одних рядов будет натяжение, между клетями других рядов — петли. В одном и том же ряду могут быть и петли и натяжение.

Ниже излагается новый, более простой и менее трудоемкий метод расчета калибров.

### § 3. Калибровка непрерывного стана с жесткой кинематической связью при наличии нескольких параллельных рядов калибров

Пусть валки непрерывного стана имеют жесткую кинематическую связь, т. е. приводятся от одного общего редуктора. На валках имеются несколько параллельных рядов калибров. Название систем каждого ряда калибров конкретизировать не будем, но для общности рассуждений положим, что они не одинаковы.

Принимая во внимание введенные нами обозначения, имеем для двух смежных калибров первого (основного) ряда следующие соотношения.

Отношение осей полосы перед входом ее в последующий калибр:

$$a_0 = \frac{b_0}{h_0}.$$

Отношение осей полосы после выхода ее из последующего калибра:

$$a_1 = \frac{b_1}{h_1}.$$

Поделим значения отношений осей:

$$\frac{a_1}{a_0} = m.$$

Величину  $m$  условимся называть показателем изменения формы полосы.

Из предыдущего получаем:

$$m = \frac{\frac{b_1}{h_1}}{\frac{b_0}{h_0}} = \frac{b_1}{b_0} \cdot \frac{h_0}{h_1}.$$

или

$$\frac{\beta}{\gamma} = m$$

и

$$\beta = m\gamma.$$

По условию постоянства объема:

$$\gamma\beta\lambda = 1.$$

Подставляя сюда значение  $\beta$ , получаем:

$$m \cdot \gamma^2 \cdot \lambda = 1$$

откуда:

$$\lambda = \frac{1}{m\gamma^2}.$$

Совершенно аналогичным образом для двух смежных калибров любого ( $n$ -го) ряда

$$\frac{a_{1n}}{a_{0n}} = m_n;$$

$$\frac{\beta_n}{\gamma_n} = m_n;$$

$$\beta_n = m_n\gamma_n;$$

$$m_n\gamma_n^2\lambda_n = 1$$

и

$$\lambda_n = \frac{1}{m_n\gamma_n^2}.$$

Для обеспечения нормального процесса непрерывной прокатки необходимо, чтобы коэффициенты вытяжек в смежных калибрах каждой пары валков были одинаковы, т. е.

$$\lambda = \lambda_n.$$

Отсюда:

$$\frac{1}{m} \left( \frac{1}{\gamma} \right)^2 = \frac{1}{m_n} \left( \frac{1}{\gamma_n} \right)^2. \quad (4-V)$$

Таким образом, для того чтобы обеспечить одинаковые коэффициенты вытяжек в смежных калибрах любой пары валков непрерывного стана с жесткой кинематической связью, необходимо, чтобы произведение квадрата коэффициента относительного обжатия на величину, обратную показателю изменения формы полосы, было одинаковым.

Подставим значения  $m = \frac{\beta}{\gamma}$  и  $m_n = \frac{\beta_n}{\gamma_n}$ , выведенные ранее, в выражение (4—V); получим:

$$\frac{1}{\gamma\beta} = \frac{1}{\beta_n\gamma_n}. \quad (5-V)$$

Таким образом, равенство (4—V) выражает условие, согласно которому произведение из коэффициента относительного обжатия на величину, обратную коэффициенту относительного уширения, должно быть постоянным для смежных рядов параллельных калибров.

Укажем на один из частных случаев, вытекающих из приведенных соотношений.

Допустим, что коэффициенты относительного обжатия в смежных калибрах равны:

$$\frac{1}{\eta} = \frac{1}{\eta_n}.$$

Тогда из равенства (4—V) получим:

$$\frac{1}{m} = \frac{1}{m_n}$$

или

$$\frac{a_1}{a_0} = \frac{a_{1n}}{a_{0n}}.$$

Это означает, что при одинаковых коэффициентах относительного обжатия для осуществления одинаковых вытяжек необходимо, чтобы отношение осей последовательных калибров было для параллельных рядов одинаковым.

Из равенства (5—V) следует, что при одинаковых коэффициентах относительного обжатия это условие равносильно следующему:

$$\beta = \beta_n.$$

Таким образом, при одинаковых коэффициентах относительного обжатия показатели изменения формы полосы в последовательных калибрах параллельных рядов численно равны коэффициентам относительного уширения в этих калибрах.

Само собой разумеется, что в общем случае коэффициенты относительного обжатия в смежных калибрах не равны. Поэтому дальнейшие рассуждения производим, ориентируясь на более общий случай, выражаемый равенством (5—V).

Вернемся к равенству.

$$\lambda = \frac{1}{m} \left( \frac{1}{\eta} \right)^2$$

и представим его в таком виде:

$$m = \frac{1}{\lambda} \left( \frac{1}{\eta} \right)^2. \quad (6—V)$$

По этому равенству построена номограмма, изображенная на рис. 136. Этой номограммой воспользуемся для расчета параллельных рядов калибров непрерывного стана с жесткой кинематической связью методом последовательных приближений.

Допустим, что первый (основной) ряд калибров непрерывного стана рассчитан. Из этого ряда возьмем два любых последовательных калибра. Для этих калибров, согласно равенству (6—V) или номограмме (рис. 136), коэффициенту вытяжки  $\lambda$  и коэффициенту относительного обжатия  $\frac{1}{\eta}$  соответствует вполне определенное значение показателя изменения формы полосы  $m$ .

Перейдем теперь к двум смежным последовательным калибрам из второго параллельного ряда. Размеры полосы, соответствующей одному из этих калибров, всегда известны, а размеры другого являются искомыми.

Допустим, что расчет производится «по ходу» прокатки и искомым является последующий калибр.

Жесткой кинематической связью непрерывного стана накладывается дополнительное условие, согласно которому вытяжка в калибре искомого ряда должна быть равна вытяжке в соответствующем ему калибре основного ряда, т. е.  $\lambda = \lambda_n$ .

Примем сначала в первом приближении для калибров из искомого (второго) ряда показатель формы полосы  $m'_n$  таким же, что и для данной пары калибров из первого ряда, т. е.  $m'_n = m$ .

Тогда по номограмме (рис. 137) значениям  $m'_n = m$  и  $\lambda'_n = \lambda$  будет соответствовать коэффициент обжатия в калибрах искомого ряда  $\frac{1}{\eta'_n} = \frac{1}{\eta}$ .

Поскольку коэффициент формы полосы  $m = \frac{a_1}{a_0}$  есть результат деления значения отношения осей полосы после прокатки на значение отношения осей полосы до прокатки и одно из этих отношений всегда известно, то этим определяется отношение осей искомой полосы.

Рассчитаем теперь по любому из равенств (30—I) — (32—I) линейное обжатие  $\Delta h_{c.n.}$ , предварительно задавшись значением  $\frac{\Delta h_c}{\Delta h_c}$  и отношением осей искомой полосы, которое определено только что описанным способом. Затем определим высоту полосы  $h_{1c.n.}$  после прокатки и коэффициент относительного обжатия  $\frac{1}{\eta''_n} = \frac{h_{0c}}{h_{1c}}$ .

В результате расчета убедимся, что при предварительно выбранном значении  $m'_n = m$  и полученном в результате предварительного расчета значении  $\frac{1}{\eta''_n}$ , имеем новое значение вытяжки  $\lambda''_n$ .

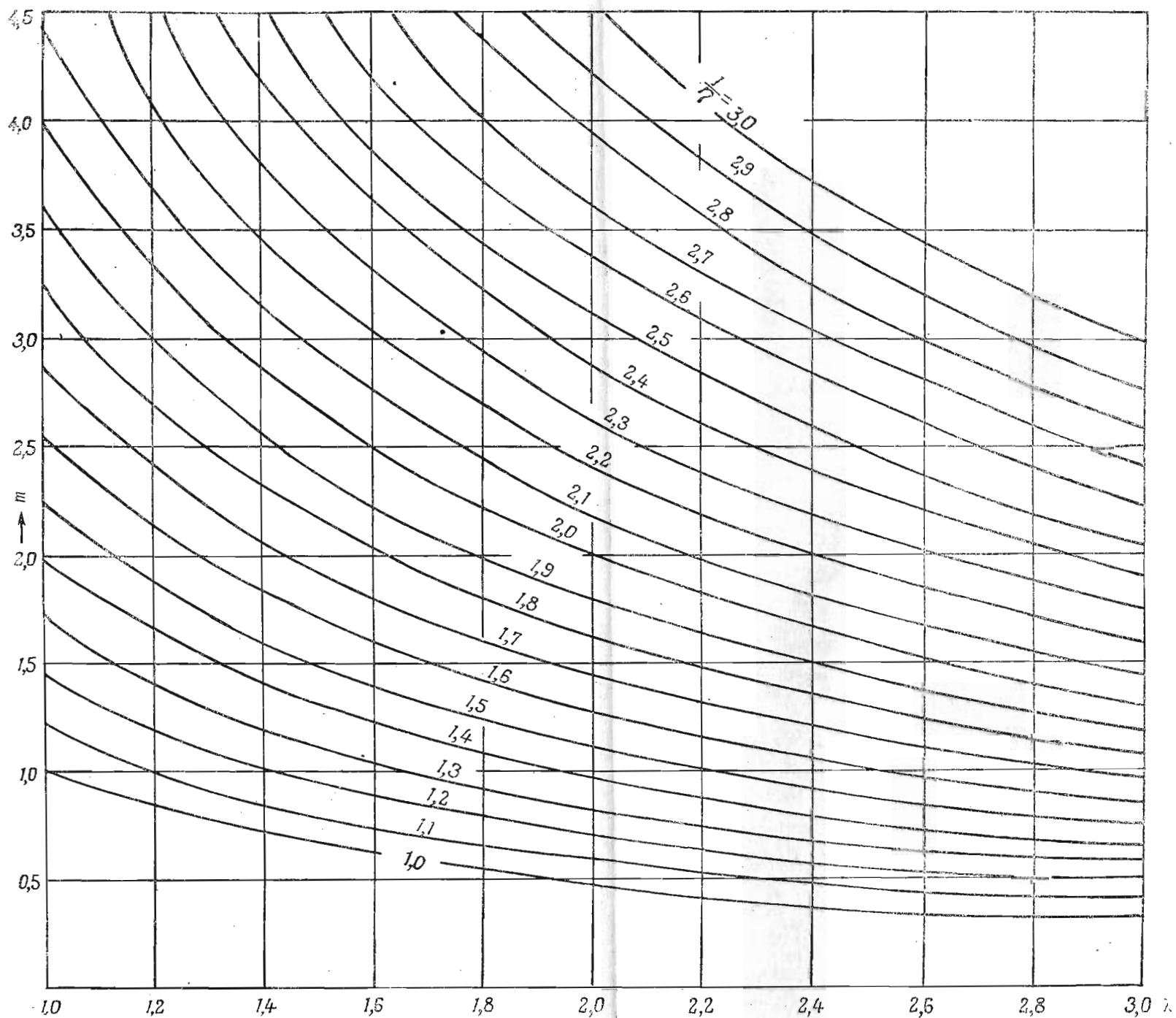


Рис. 136. Зависимости между показателем изменения формы полосы  $m$ , коэффициентом относительного обжатия  $\frac{1}{\gamma}$  и вытяжкой  $\lambda$ .

вообще говоря, отличное от значения вытяжки  $\lambda$  (рис. 137). Допустим, что  $\lambda''_n > \lambda$ .

Произведем теперь пересчет.

Для того, чтобы получить заданное по условию значение вытяжки  $\lambda$ , необходимо, очевидно, уменьшить величину обжатия в калибре. Уменьшение же величины обжатия неизбежно связано с уменьшением отношения осей искомой полосы, т. е. величины  $m$ .

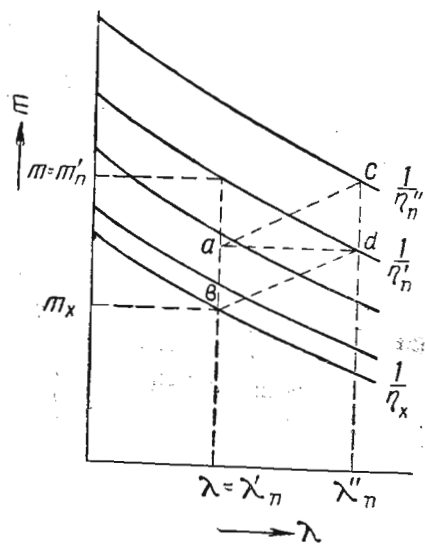


Рис. 137. Схема, поясняющая прием графической интерполяции, когда предварительно рассчитанное значение вытяжки в параллельном ряде калибров больше, чем вытяжка в основном ряде

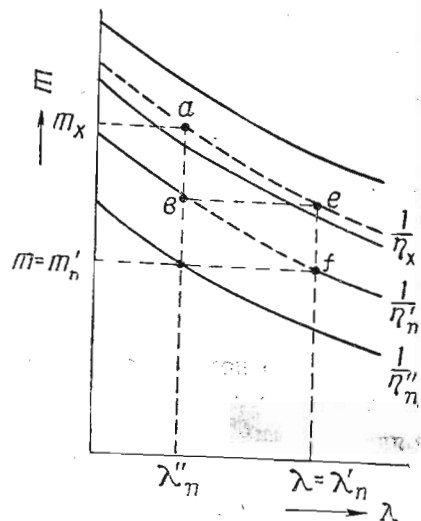


Рис. 138. Схема, поясняющая прием графической интерполяции, когда предварительно рассчитанное значение вытяжки в параллельном ряде калибров меньше, чем вытяжка в основном ряде

Положим, что уменьшение коэффициента обжатия находится в прямой зависимости от уменьшения отношения осей калибра, т. е. положим, что

$$\frac{1}{\eta''_n} = \frac{m_1}{m_x}, \quad (7-V)$$

где  $\frac{1}{\eta_x}$  и  $m_x$  — искомые значения коэффициентов относительного обжатия и формы полосы.

В таком случае для нахождения нового значения коэффициента формы полосы  $m_x$ , при котором будет обеспечена вытяжка  $\lambda_x = \lambda$ , необходимо произвести графическую интерполяцию по номограмме (рис. 136).

Для этого, как видно из рис. 137, отрезок  $ab$  следует положить равным  $cd$ . Точка  $b$  будет соответствовать новому значению  $m_x$ , при котором и производится вторичный расчет деформации по одному из равенств (30—I), (31—I) и (32—I). Расчет производится в том же порядке, как это было описано выше. В процессе расчета предварительно заданное значение  $\frac{\Delta b_0}{\Delta h_c}$  окончательно уточняется по формулам (22—I) и (23—I) С. И. Губкина. В результате вторичного расчета получим новое значение  $\lambda_x$ , уже весьма близкое к значению  $\lambda$ .

Если в результате предварительного расчета значение  $\lambda''_n$  оказывается меньше значения  $\lambda$ , то графическое интерполирование производится так, чтобы отрезок  $ab$  был равен отрезку  $ef$  (рис. 138).

Посмотрим, в какой мере оправдывается равенство (7—V), положенное в основу приведенного выше способа графической интерполяции.

Предположим для определенности, что расчет калибровки производится «по ходу» прокатки без кантовки между пропусками так, что  $b_{0c} > h_{0c}$ .

При этом, согласно равенству (30—I):

$$\Delta h_c = \frac{a_1 h_{0c} - b_{0c}}{a_1 + \frac{\Delta b_c}{\Delta h_c}}.$$

Но

$$b_{0c} = a_0 h_{0c}.$$

Следовательно

$$\frac{\Delta h_c}{h_{0c}} = \frac{a_1 - a_0}{a_1 + \frac{\Delta b_c}{\Delta h_c}}.$$

Поделив числитель и знаменатель правой части равенства на  $a_0$  и принимая во внимание, что  $\frac{a_1}{a_0} = m$ , получим:

$$\frac{\Delta h_c}{h_{0c}} = \frac{m - 1}{m + \frac{\Delta b_c}{\Delta h_c}}.$$



Далее

$$\frac{\Delta h_c}{h_{0c}} = \frac{h_{0c} - h_{1c}}{h_{0c}} = 1 - \frac{h_{1c}}{h_{0c}} = 1 - \eta_n''.$$

Отсюда

$$\frac{1}{\eta_n''} = \frac{1}{1 - \frac{\Delta h_c}{h_{0c}}}.$$

Подставляя в это равенство значение относительного обжатия, получим:

$$\frac{1}{\eta_n''} = \frac{1}{1 - \frac{m-1}{m + \frac{\Delta b_c}{\Delta h_c}}}.$$

Аналогичным путем приходим к равенству:

$$\frac{1}{\eta_{lx}} = \frac{1}{1 - \frac{m_x - 1}{m_x + \frac{\Delta b_{cx}}{\Delta h_{cx}}}}.$$

Поделим правые и левые части этих равенств:

$$\frac{\frac{1}{\eta_n''}}{\frac{1}{\eta_{lx}}} = \frac{1 - \frac{m_x - 1}{m_x + \frac{\Delta b_{cx}}{\Delta h_{cx}}}}{1 - \frac{m - 1}{m + \frac{\Delta b_c}{\Delta h_c}}} = \frac{\left(m_x + \frac{\Delta b_{cx}}{\Delta h_{cx}} - m_x + 1\right) \left(m + \frac{\Delta b_c}{\Delta h_c}\right)}{\left(m + \frac{\Delta b_c}{\Delta h_c} - m + 1\right) \left(m_x + \frac{\Delta b_{cx}}{\Delta h_{cx}}\right)},$$

или

$$\frac{\frac{1}{\eta_n''}}{\frac{1}{\eta_{lx}}} = \frac{\left(1 + \frac{\Delta b_{cx}}{\Delta h_{cx}}\right) \left(m + \frac{\Delta b_c}{\Delta h_c}\right)}{\left(1 + \frac{\Delta b_c}{\Delta h_c}\right) \left(m_x + \frac{\Delta b_{cx}}{\Delta h_{cx}}\right)}.$$

Примем в первом приближении, что  $\frac{\Delta b_c}{\Delta h_c} = \frac{\Delta b_{cx}}{\Delta h_{cx}}$ . Такое допущение вполне оправдано, если принять во внимание сравнитель-

но узкие пределы изменения коэффициента относительного обжатия и вытяжки при интерполировании. В таком случае:

$$\frac{\frac{1}{\eta_n''}}{\frac{1}{\eta_{lx}}} \approx \frac{m + \frac{\Delta b_c}{\Delta h_c}}{m_x + \frac{\Delta b_{cx}}{\Delta h_{cx}}}.$$

Величина коэффициента уширения при сортовой прокатке в непрерывных станах обычно меньше единицы и всегда много меньше коэффициента формы полосы, который всегда больше единицы. Следовательно

$$\frac{\frac{1}{\eta_n''}}{\frac{1}{\eta_{lx}}} \approx \frac{m}{m_x},$$

чем и оправдывается описанный выше способ графической интерполяции.

В заключение этого параграфа заметим, что изложенный здесь прием графической интерполяции может быть с успехом применен не только при расчете вытяжек в параллельных рядах калибров непрерывного стана, но и при расчете калибровки валков прокатных станов других типов.

Дело в том, что в некоторых случаях при осуществлении расчета калибровки задаются не отношением осей калибров, а коэффициентами вытяжек по проходам. В таких случаях номограмма (рис. 136) позволяет легко определить отношение осей калибров по заданной величине вытяжки.

Поясним все изложенное в настоящем параграфе численным примером.

#### § 4. Пример расчета калибров непрерывного стана в параллельных рядах

**ПРИМЕР 38.** Рассчитать два параллельных ряда калибров в непрерывном стане с жесткой кинематической связью по следующим данным.

Основной ряд представляет собой систему калибров ромб — квадрат, в первый калибр которой задается заготовка  $85 \times 85$  мм; площадь поперечного сечения заготовки, принимая во внимание закругления ребер, равна  $6950 \text{ мм}^2$ .

Параллельный ряд калибров — система овал — квадрат; в первый калибр этой системы задается заготовка  $100 \times 100$  мм;

площадь поперечного сечения которой, принимая во внимание закругления ребер, равна 9600 мм<sup>2</sup>.

Начальный диаметр валков прокатного стана равен 630 мм. Коэффициент трения при прокатке  $\mu = 0,3$ . Степень заполнения калибров  $i = 0,98$ .

### 1. Расчет основного ряда калибров (система ромб — квадрат)

#### I калибр — ромбический

Соответственная высота исходной квадратной заготовки  $h_{0c} = 85$  мм. Отношение  $\frac{h_{0c}}{D} = \frac{85}{630} = 0,135$ . По номограмме

(рис. 32) этому соответствует отношение  $\frac{h_{1c}}{D} = 0,04 < 0,09$ .

Таким образом, предельное отношение осей ромбической полосы определяется условием свертывания и равно  $a_1 = 1,6$  (см. главу II, § 5).

Рассчитаем деформацию полосы при прокатке на гладкой бочке. Предварительно примем  $\frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,4$ . По формуле (27—I):

$$\Delta h = \frac{a_1 h_0 - b_0}{a_1 + \frac{\Delta b}{\Delta h}} = \frac{1,6 \cdot 85 - 85}{1,6 + 0,4} = 25,5 \text{ мм};$$

$$h_1 = h_0 - \Delta h = 85 - 25,5 \approx 60 \text{ мм};$$

$$D_p = D - h_1 = 630 - 60 = 570 \text{ мм};$$

$$\frac{D_p}{h_0} = \frac{570}{85} = 6,7; \quad \frac{\Delta h}{h_0} = \frac{25,5}{85} = 0,3.$$

При  $\frac{D_p}{h_0} = 6,7$  и  $\frac{\Delta h}{h_0} = 0,3$  по номограмме (рис. 14)  $\frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,50$ .

Рассчитаем деформацию в калибре.

По номограмме (рис. 25) поправочный коэффициент уширения  $k_i = 0,68$ .

Коэффициент уширения в калибре:

$$\frac{\Delta b_c}{\Delta h_c} = k_i \frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,68 \cdot 0,50 = 0,34.$$

По формуле (30—I):

$$\Delta h_c = \frac{a_1 h_{0c} - b_{0c}}{a_1 + \frac{\Delta b_c}{\Delta h_c}} = \frac{1,6 \cdot 85 - 85}{1,6 + 0,34} = 26,3 \text{ мм};$$

$$h_{1c} = h_{0c} - \Delta h_c = 85 - 26,3 = 58,7 \text{ мм};$$

$$b_{1c} = a_1 h_{1c} = 1,6 \cdot 58,7 = 94,0 \text{ мм}.$$

Проверка:

$$\Delta b_c = 0,34 \Delta h_c = 0,34 \cdot 26,3 = 9 \text{ мм};$$

$$b_{1c} = b_{0c} + \Delta b_c = 85 + 9 = 94 \text{ мм}.$$

Площадь полосы:

$$\omega_1 = h_{1c} b_{1c} = 58,7 \cdot 94,0 = 5510 \text{ мм}^2.$$

Вытяжка полосы в калибре:

$$\lambda_1 = \frac{\omega_0}{\omega_1} = \frac{6950}{5510} = 1,26.$$

Определим размеры калибра:

$$\omega_k = \frac{\omega}{i} = \frac{5510}{0,98} = 5620 \text{ мм}^2.$$

По номограмме (рис. 28) при  $i = 0,98$  и  $a = 1,6$  отношение осей калибра

$$a_k = 1,86.$$

По номограмме (рис. 30):

$$\frac{h_k^2}{\omega_k} = 0,95,$$

откуда

$$h_k = \sqrt{0,95 \omega_k} = \sqrt{0,95 \cdot 5620} = 73 \text{ мм}.$$

$$b_k = a_k h_k = 1,86 \cdot 73 = 136 \text{ мм}.$$

По номограмме (рис. 31) при  $i = 0,98$  и  $a_1 = 1,6$

$$\frac{r_k^2}{\omega_k} = 0,105,$$

откуда:

$$r_k = \sqrt{0,105 \omega_k} = \sqrt{0,105 \cdot 5620} = 22 \text{ мм}.$$

#### II калибр — квадратный

Рассчитаем деформацию полосы при прокатке на гладкой бочке. Предварительно примем  $\frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,4$ . По формуле (27—I):

$$\Delta h = \frac{a_1 h_0 - b_0}{a_1 + \frac{\Delta b}{\Delta h}} = \frac{1,0 \cdot 94 - 58,7}{1 + 0,4} = \frac{35,3}{1,4} = 25,2 \text{ мм};$$

$$h_1 = h_0 - \Delta h = 94,0 - 25,2 = 68,8 \text{ мм};$$

$$D_p = D - h_1 = 630 - 68,8 \approx 561 \text{ мм};$$

$$\frac{D_p}{h_0} = \frac{561}{94} = 6,0; \quad \frac{\Delta h}{h_0} = \frac{25,2}{94} = 0,268;$$

$$\frac{b_0}{h_0} = \frac{58,7}{94} = 0,625.$$

По номограмме (рис. 14):

$$\frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,27.$$

По номограмме (рис. 25) поправочный коэффициент уширения

$$k_i = 0,78.$$

Коэффициент уширения в калибре:

$$\frac{\Delta b_c}{\Delta h_c} = k_i \frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,78 \cdot 0,27 = 0,21.$$

По формуле (30—I):

$$\Delta h_c = \frac{a_1 h_0 c - b_0 c}{a_1 + \frac{\Delta b_c}{\Delta h_c}} = \frac{1,0 \cdot 94 - 58,7}{1 + 0,21} = \frac{35,3}{1,21} = 29,2 \text{ мм};$$

$$h_{1c} = h_0 c - \Delta h_c = 94 - 29,2 = 64,8 \text{ мм};$$

$$b_{1c} = 64,8 \text{ мм}.$$

Проверка:

$$\Delta b_c = 0,21 \cdot 29,2 = 6,1;$$

$$b_{1c} = b_0 c + \Delta b_c = 58,7 + 6,1 = 64,8 \text{ мм}.$$

Площадь полосы:

$$\omega_1 = h_{1c} b_{1c} = 64,8 \cdot 64,8 = 4200 \text{ мм}^2.$$

Вытяжка полосы в калибре

$$\lambda_2 = \frac{5510}{4200} = 1,31.$$

Определим размеры калибра.

Площадь калибра:

$$\omega_k = \frac{\omega_1}{i} = \frac{4200}{0,98} = 4290 \text{ мм}^2.$$

Сторона квадратного калибра

$$c = \sqrt{\frac{\omega_k}{i}} = \sqrt{\frac{4290}{0,98}} = 66,0 \text{ мм}.$$

По номограмме (рис. 69) при  $i = 0,98$

$$\frac{r_k}{c} = 0,213.$$

Радиус закругления при вертикальной диагонали калибра

$$r_k = 0,213 \cdot 66,0 = 14 \text{ мм}.$$

## II. Расчет параллельного ряда калибров (система овал — квадрат)

*I калибр — овалный.* Как было показано в предыдущем параграфе, основным условием расчета параллельных калибров является равенство вытяжек.

Для первого калибра основного ряда имеем

$$\lambda_1 = 1,26 \text{ и } \frac{1}{\eta_1} = \frac{h_0 c}{h_1 c} = \frac{85}{58,7} = 1,45.$$

При значениях  $\lambda_1$  и  $\frac{1}{\eta_1}$  по номограмме (рис. 139) получаем, что коэффициент формы полосы

$$m = 1,66.$$

Приближенно полагаем, что коэффициенты формы полосы для параллельных калибров равны. Тогда отношение осей овального калибра из параллельного ряда

$$a_1 = m a_0 = 1,66 \cdot 1 = 1,66.$$

Рассчитаем деформацию полосы при прокатке на гладкой бочке. Предварительно примем  $\frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,5$ . По равенству (27—I):

$$\Delta h = \frac{a_1 h_0 - b_0}{a_1 + \frac{\Delta b}{\Delta h}} = \frac{(1,66 - 1) \cdot 100}{1,66 + 0,5} = \frac{66}{2,16} = 30,5 \text{ мм};$$

$$h_1 = h_0 - \Delta h = 100 - 30,5 = 69,5 \text{ мм};$$

$$D_p = D - h_1 = 630 - 69,5 \approx 560 \text{ мм};$$

$$\frac{D_p}{h_0} = \frac{560}{100} = 5,60; \quad \frac{\Delta h}{h_0} = \frac{30,5}{100} = 0,305.$$

По номограмме (рис. 14):  $\frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,46$ .

Рассчитаем деформацию в калибре.

Принимаем степень заполнения  $i = 0,94$ . По номограмме (рис. 46) при  $i = 0,94$  и  $a_1 = 1,66$  поправочный коэффициент уширения:

$$k_i = 0,46.$$

Коэффициент уширения в калибре:

$$\frac{\Delta b_c}{\Delta h_c} = k_i \frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,46 \cdot 0,46 = 0,211.$$

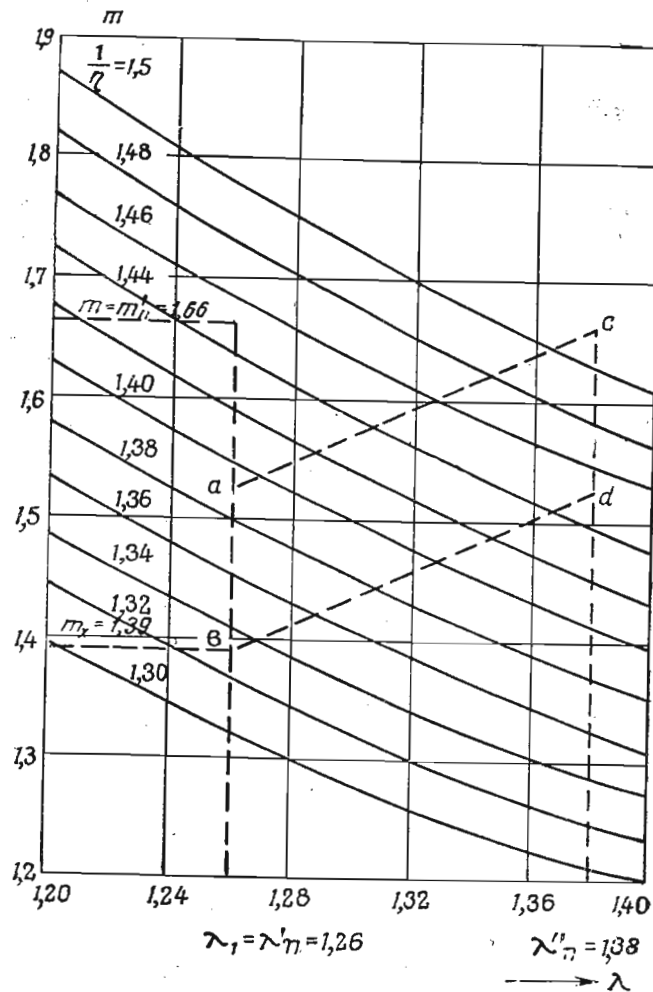


Рис. 139. Графическая интерполяция

По формуле (30—I):

$$\Delta h_c = \frac{a_1 h_0 - b_0}{a_1 + \frac{\Delta b_c}{\Delta h_c}} = \frac{(1,66 - 1) 100}{1,66 + 0,211} = \frac{66}{1,871} = 35,3 \text{ мм};$$

Проверка

$$h_{1c} = h_0 - \Delta h_c = 100 - 35,3 = 64,7 \text{ мм};$$

$$b_{1c} = a_1 h_{1c} = 1,66 \cdot 64,7 = 107,4 \text{ мм}.$$

$$\Delta b_c = 0,211 \Delta h_c = 0,211 \cdot 35,3 = 7,4 \text{ мм};$$

$$b_{1c} = b_0 + \Delta b_c = 100 + 7,4 = 107,4 \text{ мм}.$$

Площадь полосы:

$$\omega = h_{1c} b_{1c} = 64,7 \cdot 107,4 = 6950 \text{ мм}^2.$$

Вытяжка полосы в овальном калибре:

$$\lambda'_1 = \frac{9600}{6950} = 1,38.$$

Таким образом, коэффициент вытяжки в параллельном калибре ( $\lambda'_1 = 1,38$ ) оказался больше коэффициента вытяжки в калибре основного ряда ( $\lambda_1 = 1,26$ ).

Для уменьшения вытяжки уменьшим показатель изменения формы полосы  $m$  и коэффициент обжатия  $\frac{1}{\eta}$ , для чего воспользуемся методом интерполяции (рис. 139) и найдем, что  $m_x = 1,39$ . Следовательно

$$a_1 = m_x a_0 = 1,39 \cdot 1 = 1,39.$$

Предварительно примем  $\frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,5$ .

По равенству (27—I):

$$\Delta h = \frac{a_1 h_0 - b_0}{a_1 + \frac{\Delta b}{\Delta h}} = \frac{(1,39 - 1) 100}{1,39 + 0,5} = \frac{39}{1,89} = 20,6 \text{ мм};$$

$$h_1 = h_0 - \Delta h = 100 - 20,6 = 79,4 \text{ мм};$$

$$D_p = D - h_1 = 630 - 79,4 = 551 \text{ мм};$$

$$\frac{D_p}{h_0} = \frac{551}{100} = 5,51; \quad \frac{\Delta h}{h_0} = \frac{20,6}{100} = 0,206.$$

По номограмме (рис. 14):  $\frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,4$ .

При  $a_1 = 1,39$  и  $i = 0,94$  по номограмме (рис. 46):

$$k_i = 0,3.$$

$$\frac{\Delta b_c}{\Delta h_c} = k_i \frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,3 \cdot 0,4 = 0,12.$$

По формуле (30—I):

$$\Delta h_c = \frac{a_1 h_0 - b_0}{a_1 + \frac{\Delta b_c}{\Delta h_c}} = \frac{(1,39 - 1) 100}{1,39 + 0,12} = \frac{39}{1,51} = 25,8 \text{ мм};$$

$$h_{1c} = h_0 - \Delta h_c = 100 - 25,8 = 74,2 \text{ мм};$$

$$b_{1c} = a_1 h_{1c} = 1,39 \cdot 74,2 = 103 \text{ мм}.$$

Проверка:

$$\Delta b_c = 0,12 \Delta h_c = 0,12 \cdot 25,8 = 3,09 \approx 3 \text{ мм};$$

$$b_{1c} = b_0 + \Delta b_c = 100 + 3 = 103 \text{ мм}.$$

Площадь полосы

$$\omega_1 = h_{1c} b_{1c} = 74,2 \cdot 103 = 7640 \text{ мм}^2;$$

$$\lambda'_1 = \frac{9600}{7640} = 1,259 \approx 1,26.$$

Таким образом, мы получили практически полное совпадение вытяжек.

Рассчитаем теперь размеры овального калибра.

$$\omega_k = \frac{\omega}{i} = \frac{7640}{0,94} = 8140 \text{ мм}^2.$$

Когда степень заполнения  $i = 0,94$  и отношение осей полосы  $a = 1,39$ , по номограмме (рис. 67) отношение осей калибра  $a_k = 1,75$ .

При  $a_k = 1,75$  по номограмме (рис. 65):

$$\frac{h_k^2}{\omega_k} = 0,8; \quad \frac{r_k}{h_k} = 1,03.$$

Отсюда:

$$h_k = \sqrt{0,8 \omega_k} = \sqrt{0,8 \cdot 8140} = 80,5 \text{ мм};$$

$$b_k = a_k h_k = 1,75 \cdot 80,5 = 140 \text{ мм};$$

$$r_k = 1,03 \cdot 80,5 = 83 \text{ мм}.$$

Заметим, что при расчете овального калибра мы приняли степень заполнения его  $i = 0,94$ . Малая степень заполнения взята с тем, чтобы уменьшить величину вытяжки в овальном калибре и этим подогнать ее к величине вытяжки в ромбическом калибре.

Из этого примера видно, что наличие жесткой кинематической связи между валками непрерывного стана, помимо ряда неудобств, связанных с настройкой и управлением стана, невыгодно еще и потому, что лимитирует производительность стана благодаря уменьшению вытяжек в параллельных рядах. Конечно, этот недостаток будет проявляться особенно ярко при наличии на одних и тех же валках таких систем калибров, вытяжные свойства которых различны.

II калибр — квадратный

Предварительно примем  $\frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,35$ .

По формуле (27—I):

$$\Delta h = \frac{a_1 h_0 - b_0}{a_1 + \frac{\Delta b}{\Delta h}} = \frac{1 \cdot 103 - 74,2}{1 + 0,35} = \frac{28,8}{1,35} = 21,4 \text{ мм};$$

$$h_1 = 103 - 21,4 = 81,6 \text{ мм};$$

$$D_p = D - h_1 = 630 - 81,6 \approx 549 \text{ мм};$$

$$\frac{D_p}{h_0} = \frac{549}{103} = 5,34; \quad \frac{\Delta h}{h_0} = \frac{21,4}{103} = 0,208;$$

$$\frac{b_0}{h_0} = \frac{74,2}{103} = 0,72.$$

По номограмме (рис. 14):  $\frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,26$ .

При  $a_0 = \frac{103}{74,2} = 1,39$  по номограмме (рис. 59)  $k_i = 0,2$ .

$$\frac{\Delta b_c}{\Delta h_c} = k_i \frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,2 \cdot 0,26 = 0,052.$$

По формуле (30—I):

$$\Delta h_c = \frac{a_1 h_{0c} - b_{0c}}{a_1 + \frac{\Delta b_c}{\Delta h_c}} = \frac{1 \cdot 103 - 74,2}{1 + 0,052} = \frac{28,8}{1,052} = 27,4 \text{ мм};$$

$$h_{1c} = h_{0c} - \Delta h_c = 103 - 27,4 = 75,6 \text{ мм},$$

$$b_{1c} = h_{1c} = 75,6 \text{ мм}.$$

Проверка:

$$\Delta b_c = 0,052 \Delta h_c = 0,052 \cdot 27,4 = 1,4 \text{ мм};$$

$$b_{1c} = b_{0c} + \Delta b_c = 74,2 + 1,4 = 75,6 \text{ мм}.$$

Площадь полосы:

$$\omega_1 = h_{1c} b_{1c} = 75,6 \cdot 75,6 = 5720 \text{ мм}^2.$$

Коэффициент вытяжки:

$$\lambda'_2 = \frac{\omega_0}{\omega_1} = \frac{7640}{5720} = 1,330.$$

Вытяжка же в нормальном ряде калибров  $\lambda_2 = 1,31$ . Разница составляет

$$\frac{1,33 - 1,31}{1,33} 100 = 1,50\%.$$

Если хотим получить более точное совпадение, то это возможно путем изменения величины обжатия, как в предыдущем слу-

чае; однако тогда не удастся получить точного квадратного сечения; оно будет иметь ромбическую форму.

Второй путь улучшения точности решения — пропорциональное изменение размеров квадратного поперечного сечения благодаря использованию радиусов закруглений, величина которых зависит от степени заполнения калибра (см. формулу (6—II)).

Для того, чтобы получить вытяжку  $\lambda'_2 = \lambda_2 = 1,31$ , площадь поперечного сечения полосы должна быть равна

$$\omega_1 = \frac{\omega_0}{\lambda'_2} = \frac{7640}{1,31} = 5830 \text{ мм}^2.$$

По формуле (6—II):

$$\omega = \frac{ic^2}{2-i},$$

где  $c$  — сторона квадратной заготовки.  
Отсюда

$$c = \sqrt{\frac{\omega(2-i)}{i}}.$$

Положим степень заполнения  $i = 0,98$ . В таком случае

$$c = \sqrt{\frac{5830(2-0,98)}{0,98}} = 77,8 \text{ мм}.$$

Определим размеры калибра.

Сторона квадратной заготовки равна стороне квадратного калибра.

По номограмме (рис. 69) при  $i = 0,98$ :

$$\frac{r_k}{c} = 0,213.$$

Радиус закругления при вертикальной диагонали калибра:

$$r_k = 0,213 \cdot 77,8 = 16,5 \text{ мм}.$$

## ГЛАВА VI

### КАЛИБРОВКА УГЛОВОЙ СТАЛИ И ПРОФИЛЕЙ, ПОДОБНЫХ УГЛОВЫМ, ПО МЕТОДУ СООТВЕТСТВЕННОЙ ПОЛОСЫ

#### § 1. Общие сведения относительно калибровки угловой стали

Угловая сталь получила широкое применение для изготовления элементов различных конструкций. Наиболее широко используется равнобокая и неравнобокая угловая сталь (ОСТ 10014—39 и ОСТ 10015—39), рис. 140, 141. Наряду с этим

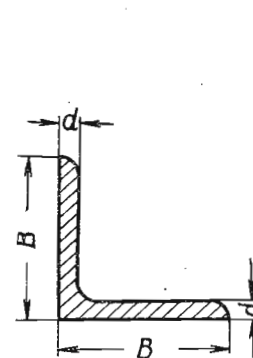


Рис. 140. Равнобокая угловая сталь

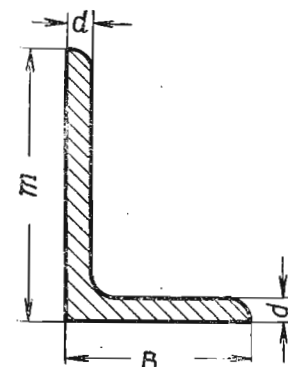


Рис. 141. Неравнобокая угловая сталь

прокатывают значительное количество профилей, подобных угловым, форма которых, как правило, является более сложной.

Согласно действующему стандарту прокатывают 20 номеров угловой равнобокой стали: 2; 2,5; 3; 3,5; 4; 4,5; 5; 6; 6,5; 7,5; 8; 9; 10; 12; 13; 15; 18; 20; 22; 23. Номер уголка соответствует ширине полки в сантиметрах. Таким образом, минимальный размер прокатываемых уголков —  $20 \times 20 \text{ мм}$ , а максимальный —  $230 \times 230 \text{ мм}$ .

Кроме этого прокатываются 14 номеров неравнобокой уголовой стали: 3/2; 3,5/2; 4,5/3; 6/4; 7,5/5; 9/6; 10/7,5; 12/8; 13/9; 15/10; 18/12; 20/12; 20/15. Числитель и знаменатель соответствуют ширине полки в сантиметрах.

Каждый профиль равнобокой и неравнобокой стали, согласно сортаменту, имеет несколько (от двух до пяти) разных толщин полок.

Общее количество профилируемых по равнобокой и неравнобокой уголовой стали составляет 108, в то время как в 1928 г. оно было равно 79, причем, например, равнобокие угловые профили крупнее № 15 не прокатывались. Максимальные же размеры неравнобокого профиля определялись номером 16/8.

Приведенные данные отражают рост технической оснащенности прокатных цехов нашей страны и рост потребности отечественного машиностроения в профильном прокате.

Обычно уголки размерами  $100 \times 100$  мм и больше прокатываются на крупносортовых станах (500—750 мм), уголки размерами от  $50 \times 50$  до  $100 \times 100$  мм — на среднесортных станах (350—500 мм), а уголки, размеры которых меньше  $50 \times 50$  мм, — на мелкосортных станах (меньше 350 мм).

Наиболее распространен способ прокатки уголков из квадратных заготовок в закрытых калибрах.

Известен, однако, способ прокатки уголовой стали путем постепенного изгиба полосы, у которой предварительно формируется выступ в средней части по ее ширине для лучшего выполнения угла профиля (рис. 142), [29]. В этом случае, как видно из рисунка, используют один или два ребровых калибра и прокатку производят в открытых калибрах; только предчистовой калибр выполняется закрытым.

Наличие ребровых калибров и предчистовых закрытых калибров обеспечивает получение из одной и той же системы калибров таких уголков, размеры которых отличаются не только по толщине, но и по ширине полки.

Ребровые калибры позволяют осуществить автоматическую передачу уголовой полосы из одной клетки в другую по обводкам.

Описанный способ прокатки из полосы выгодно иногда применять на мелкосортных станах. Тем не менее по технико-экономическим соображениям этот способ прокатки уголков не получил широкого применения и подавляющее количество уголовой стали прокатывается в настоящее время все же из квадратной заготовки.

Мелкие уголки (меньше  $50 \times 50$  мм) прокатываются в 5 проходов, средние (от  $50 \times 50$  до  $100 \times 100$  мм) требуют уже до 7 9 проходов. Более крупные угловые профили прокатываются в 11 проходов. Указанная градация понятна: при прокатке мелких угловых профилей условия захвата более благоприятны, чем

при прокатке крупных профилей. К тому же толщина полок у мелких уголков относительно больше, чем у крупных. Все это позволяет осуществлять большие обжатия по проходам при прокатке мелких уголков и относительно меньшие обжатия при прокатке крупных уголков.

Калибры для прокатки уголового профиля могут быть сопряженными и несопряженными. В последнем случае их лучше расположить так, чтобы вершина угла была обращена кверху. При таком расположении калибров окалина легко удаляется с поверхности прокатываемой полосы.

Равнобокие уголки всегда располагаются так, что вертикальные проекции полок одинаковы (рис. 143). Благодаря этому боковое давление металла на стенки уравнивается внутри калибра и отсутствует смещение валков в осевом направлении. Кроме того, при указанном расположении в одном и том же калибре можно прокатывать уголки с различной толщиной полок, для чего необходимо соответствующим образом изменять расстояние между осями валков.

При калибровке неравнобоких уголков биссектрису прямого угла можно располагать наклонно или вертикально (рис. 144).

В первом случае концы полок располагают на одной прямой, проходящей параллельно осям валков. При таком расположении усилия, приложенные со стороны металла к валкам в направлении их оси, взаимно уравниваются. Тенденция к взаимному смещению валков в осевом направлении отсутствует. Это улучшает условия работы подшипников валков и облегчает настройку валков.

Однако при указанном расположении калибра в валках из него нельзя получить уголки с равной толщиной полок путем изменения зазора между валками. Действительно, при изменении зазора правая и левая полки будут приобретать различную толщину. Учитывая это, после черновых калибров, которые являются общими для прокатки угловых профилей с различной толщиной полок, располагают несколько отделочных, каждый из которых служит для прокатки уголка с заданной толщиной полки.

При вертикальном расположении биссектрисы угла врез в валки получается более глубоким, валки подвергаются большему осевому давлению и имеют стремление к смещению в осевом направлении, благодаря чему длинная полка может получаться толще короткой. Для предотвращения этого при калибровке стремятся учесть осевое смещение, при прокатке же устраняют его путем надежного закрепления валков в осевом направлении.

Несимметричный врез в валки и осевое смещение их вызывают склонность полосы к свертыванию ее «в штопор».

Преимуществом описываемого расположения калибров является возможность получения уголков одинакового номера, но

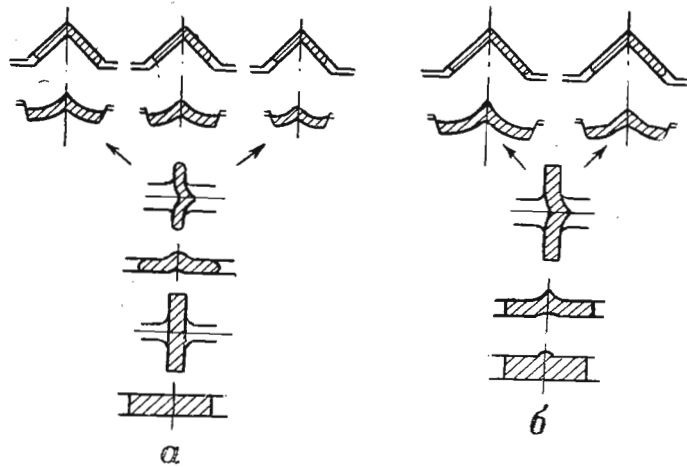


Рис. 142. Прокатка полосы на угловую сталь с использованием ребровых калибров: а — двух ребровых калибров, б — одного ребрового калибра

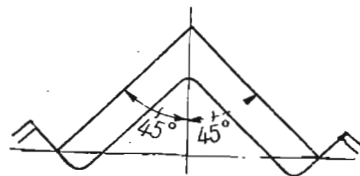


Рис. 143. Расположение в вальках калибров для прокатки равнобокой угловой стали

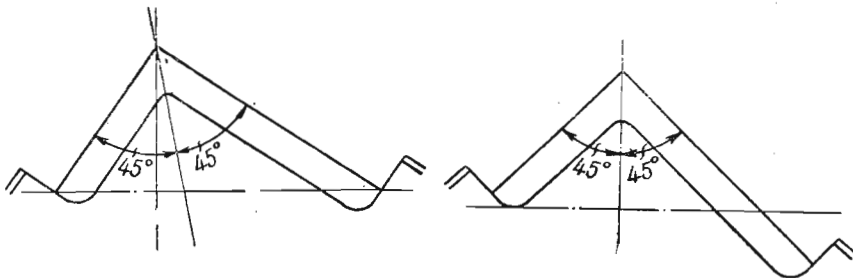


Рис. 144. Два способа расположения неравнобоких калибров в вальках

с разной толщиной полок из одного калибра путем изменения зазора между вальками.

При прокатке неравнобоких уголков иногда удается уменьшить число отделочных калибров путем прокатки профилей одинаковой толщины, но с разной шириной полок (рис. 145), подобно тому, как это было показано на рис. 142 для равнобоких уголков. Способ этот, однако, применяется редко из-за наличия осевых давлений и плохого заполнения кромок профиля.

Задачу квадратной заготовки в первый профильный калибр обычно производят так, как это показано на рис. 146. Лишь в редких случаях, когда размеры квадратной заготовки недостаточны, используется способ, показанный на рис. 147.

При прокатке из квадратной заготовки применяют следующие два основных типа калибровки.

Тип первый: калибровка по методу «сгибания» (рис. 148). При такой калибровке обжатие происходит с одновременным изгибом полок. Величину обжатия и угол изгиба полок при переходе от первого пропуска к последнему постепенно уменьшают соответственно уменьшению пластичности металла.

Этот метод был в свое время предложен Жезом и в настоящее время применяется редко: большая разница в величине катящихся диаметров вызывает в полосе вредные напряжения, кромки полосы выполняются плохо (особенно если число промежуточных толщин велико); кроме того, глубокие врезы ослабляют валки и ухудшают условия захвата.

Тип второй: развернутая калибровка (рис. 149). В этом случае врез в валки значительно меньше. В связи с этим разность рабочих диаметров по ширине калибра невелика, деформация металла более равномерна, кромки полосы хорошо выполняются, условия захвата улучшаются. Развернутая калибровка получила широкое применение на наших заводах.

Метод расчета угловых профилей был предложен в начале текущего столетия Жезом [11]. Сущность его сводится к следующему.

Уголок мысленно разворачивается в полосу так, что ширина полосы равна удвоенной ширине полок, а толщина полосы — толщине полок (рис. 150); закругления пренебрегают. Затем рассчитывают уширение полосы от последнего пропуска к первому, пока не получат квадратного сечения. В процессе расчета предполагают, что полоса прокатывается на гладкой бочке. Затем производят построение калибров. При этом предполагают, что толщина полок угловых профилей равна толщине полос, а ширина полок равна половине ширины полос. Угол изгиба  $\beta$  (рис. 149) прогрессивно увеличивают от последнего (по ходу прокатки) пропуска к первому пропорционально обжатиям, возрастающим в том же направлении.



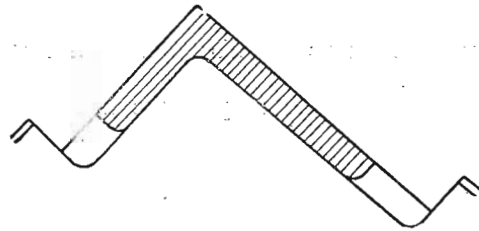


Рис. 145. Чистовой калибр для прокатки угловых профилей с разной шириной полки

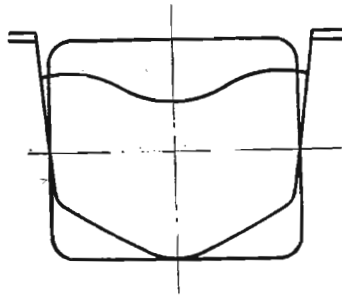


Рис. 146. Обычный способ задачи квадратной заготовки в первый профильный калибр

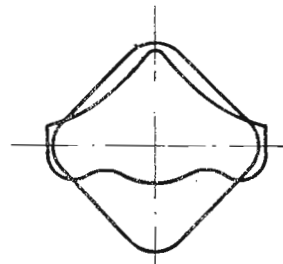


Рис. 147. Способ задачи в угловой калибр, когда размеры заготовки недостаточны

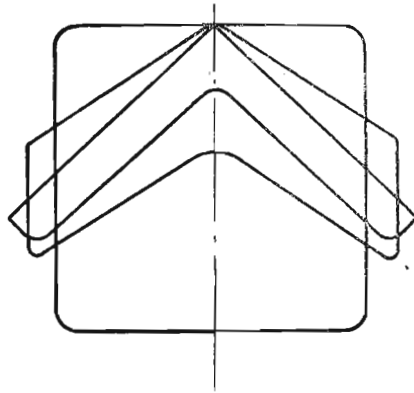


Рис. 148. Калибровка по методу «сгибания»

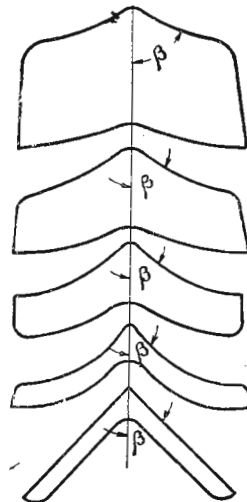


Рис. 149. Калибровка с «развертыванием» полки

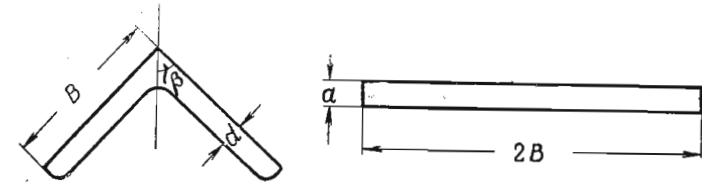


Рис. 150. Схема, поясняющая способ расчета по Жезу

полос, изображенных на рис. 150, не могут быть равны между собой. Но отсюда следует, что отсутствует соответствие между коэффициентами деформации у фиктивной полосы и углового профиля. По этой причине метод Жеза не позволяет правильно рассчитать деформацию углового профиля. Вообще говоря, в данном случае правильнее говорить не о методе расчета, а скорее о приеме расчета.

В нашей стране разработкой способов калибровки угловых профилей занимались А. П. Виноградов [4], А. П. Чекмарев [27], Д. И. Старченко [30, 31], Б. П. Бахтинов [29].

Особо следует отметить методы калибровки угловых профилей, предложенные Д. И. Старченко и Б. П. Бахтиновым; это были попытки теоретического обобщения производственного опыта, накопленного прокатными цехами нашей страны в области производства угловой стали.

Ниже будет изложен разработанный нами новый метод расчета угловых профилей, базирующийся на понятии о соответственной полосе.

Прежде всего выведем геометрические соотношения в калибрах для прокатки равнобокой и неравнобокой угловой стали.

## § 2. Геометрические соотношения в калибрах для прокатки равнобокой угловой стали

Практика выработала следующие правила построения калибров для прокатки угловой стали [16, 29].

Для чистового калибра и двух следующих за ним против хода прокатки угол, образуемый внешними сторонами полок, равен  $90^\circ$ . В первом профильном калибре этот угол принимают равным  $126-145^\circ$ . Чаще встречается величина угла, равная  $145^\circ$ . Во всех промежуточных калибрах разность между указанными крайними значениями  $145 - 90 = 55^\circ$  распределяется равномерно или углы

уменьшаются по ходу прокатки пропорционально уменьшению коэффициента обжатия.

Профиль чистового калибра вычерчивается на основании сортамента с учетом минусового допуска в горячем состоянии.

Пусть  $l$  — ширина полки в чистовом калибре.

Вычерчивание наружной стороны предчистового калибра может быть выполнено различными способами, два из которых изображены на рис. 151. Теми же способами вычерчиваются

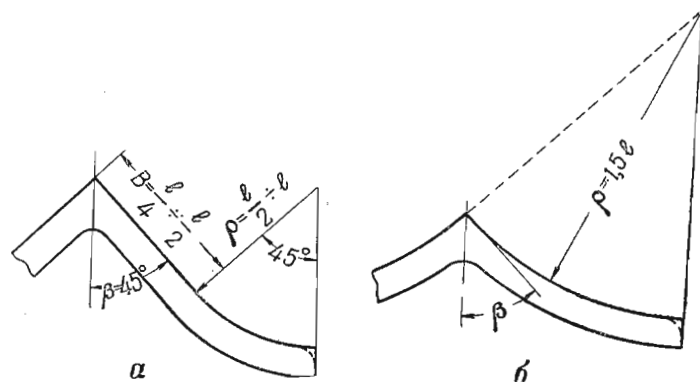


Рис. 151. Способы вычерчивания наружных сторон полок предчистового равнобокого калибра:

а — контур наружной стороны состоит из прямой и дуги окружности  
б — контур наружной стороны состоит только из дуги окружности

наружные стороны полок первого профильного калибра, но угол  $\beta$  берут больше — обычно  $72^\circ 30'$  (рис. 151).

Построение всех промежуточных калибров производится аналогичным путем. Отличие заключается лишь в величине центрального угла, выбираемого согласно правилу, упомянутому выше.

Наиболее распространенным является способ построения калибров, изображенный на рис. 151, а.

Вычерчивание внутренних сторон полок углового профиля производится линиями, параллельными наружным сторонам.

Таким образом, приведенные данные показывают, что все основные размеры углового профиля связаны с шириной полки в чистовом калибре.

Перейдем теперь к отысканию интересующих нас геометрических соотношений в калибрах для прокатки равнобоких угловых профилей.

Прежде всего выведем формулу, которая дает аналитическую зависимость между отношением осей соответственной полосы и отношением характеристических линейных элементов калибра.

На рис. 152 показан один из промежуточных калибров калибровки по методу «развертывания» с обозначением размеров.

Ради упрощения при выводе формул закруглениями (на чертеже показаны пунктиром) будем пренебрегать.

Как видно из чертежа, имеем такие соотношения: характеристическая высота

$$h = \frac{d}{\sin \beta};$$

характеристическая ширина

$$b = 2B \sin \beta + 2\rho \cos \beta;$$

отношение характеристических размеров

$$a = \frac{b}{h} = \frac{2B \sin^2 \beta + 2\rho \sin \beta \cdot \cos \beta}{d};$$

или

$$a = \frac{2B \sin^2 \beta + \rho \sin 2\beta}{d}. \quad (1-VI)$$

Углом  $\beta$  калибровщики задаются по своему усмотрению на основании изложенных в начале этого параграфа соображений.

Размеры  $B$  и  $\rho$  являются функциями ширины полки  $l$  чистового профиля. При этом обычно (см. рис. 151):

$$B = \frac{l}{4} \div \frac{l}{2} \quad \text{и} \quad \rho = \frac{l}{2} \div l.$$

Примем наиболее часто встречающиеся соотношения:

$$B = \frac{l}{2} \quad \text{и} \quad \rho = \frac{l}{2},$$

откуда:

$$\rho = B.$$

Примем во внимание то обстоятельство, что ширина полки в процессе прокатки меняется сравнительно мало. Поэтому соотношение между радиусом закругления полок и характеристическим размером  $B$  можно принять постоянным для всех калибров и численно равным  $B = \rho$ . Подставляя это значение в формулу (I—VI), получим, что

$$a = \frac{2B \sin^2 \beta + B \sin 2\beta}{d},$$

отсюда

$$\frac{B}{d} = \frac{a}{2 \sin^2 \beta + \sin 2\beta}. \quad (2-VI)$$

По этому равенству на рис. 153 построена номограмма для определения отношения  $\frac{B}{d}$ .

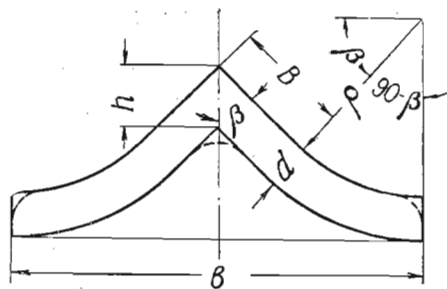


Рис. 152. Схема углового калибра к выводу геометрических соотношений в калибре для прокатки равнобокой стали (без учета закруглений)

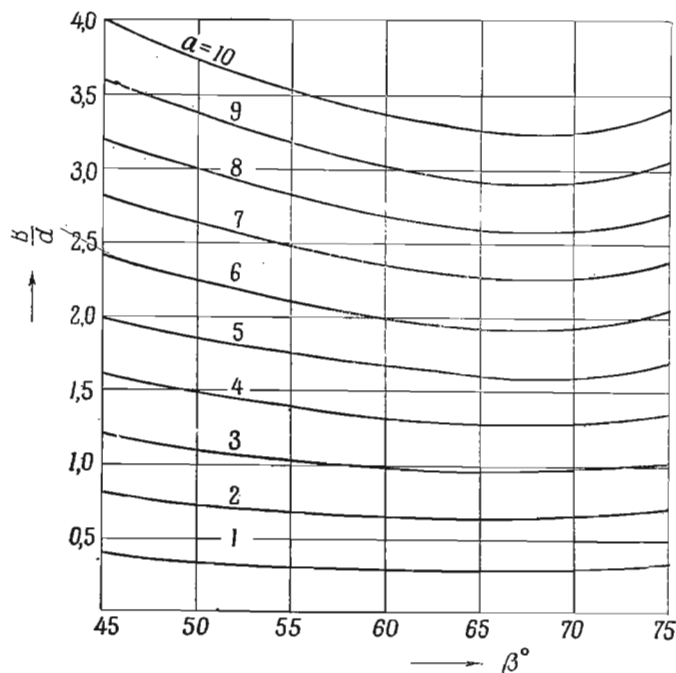


Рис. 153. Номограмма для определения отношения  $\frac{B}{d}$  в равнобоком угловом калибре

Для чистового профиля  $\rho = 0$ ; для этого случая на основании формулы (I—VI) получим, что

$$\frac{B}{d} = \frac{a}{2 \sin^2 \beta}. \quad (3-VI)$$

Указанное соотношение будет справедливо и для всех профильных калибров, если калибровку вести по методу сгибания без «развертывания» полок.

Аналогичным путем легко найти отношение  $\frac{B}{d}$  и при других значениях  $B$  и  $\rho$ .

Пусть, например,  $B = 0$ . Это означает, что мы принимаем второй способ построения калибров (рис. 151,б). В таком случае из равенства (I—VI) получим, что

$$\frac{\rho}{d} = \frac{a}{\sin 2\beta}.$$

Приведенные выше равенства дают возможность рассчитать отношение  $\frac{B}{d}$ , если известно отношение характеристических размеров  $a$  и задан угол  $\beta$ .

Выведем теперь формулы для определения величин  $B$  и  $d$ . Возвращаясь к рис. 152, можем написать следующие соотношения.

Площадь калибра (полосы):

$$\omega = 2d \left( B - \frac{h}{2} \cos \beta \right) + 2 \left[ \frac{1}{2} (\rho + d)^2 - \frac{1}{2} \rho^2 \right].$$

Отсюда после простых преобразований:

$$\omega = 2dB - d^2 \operatorname{ctg} \beta + \left( \frac{\pi}{2} - \beta \right) (2\rho d + d^2)$$

и

$$\frac{d^2}{\omega} = \frac{1}{\left( 2 \frac{B}{d} - \operatorname{ctg} \beta \right) + \left( \frac{\pi}{2} - \beta \right) \left( 2 \frac{\rho}{d} + 1 \right)}, \quad (4-VI)$$

где  $\beta = \frac{\beta^\circ \cdot \pi}{180^\circ}$ .

Из этого основного соотношения получаются различные частные случаи.

Пусть, например,  $\rho = B$ , тогда:

$$\frac{d^2}{\omega} = \frac{1}{\left( 2 \frac{B}{d} - \operatorname{ctg} \beta \right) + \left( \frac{\pi}{2} - \beta \right) \left( 2 \frac{B}{d} + 1 \right)}. \quad (5-VI)$$

По этому равенству построена номограмма, изображенная на рис. 154.

Если калибровка производится по методу сгибания, то «развернутые» части профиля отсутствуют. Поэтому из формулы (4—VI) получим, что

$$\frac{d^2}{\omega} = \frac{1}{2 \cdot \frac{B}{d} - \operatorname{ctg} \beta} \quad (6—VI)$$

Приведенные формулы дают возможность определить отношение  $\frac{d^2}{\omega}$ , когда известно отношение  $\frac{B}{d}$  и задан угол  $\beta$ .

Если известна площадь калибра (полосы)  $\omega$ , то по указанному отношению легко определится толщина полки  $d$ .

Затем уже нетрудно определить размеры  $B$  и  $r$ , например, по приведенным выше равенствам (5—VI) или номограмме (рис. 154).

Полученные соотношения не учитывают площади, теряемые и приобретаемые благодаря устранению закруглений, что сделано ради упрощения выводов.

На рис. 155 изображен калибр для прокатки углового профиля. Радиусы закруглений  $R$ ,  $r$  и  $R_1$  выбираются так.

В чистовом калибре  $R$  и  $r$  определяются сортаментом, а радиус  $R_1$ , разумеется, равен нулю. Во всех остальных калибрах радиусы  $R$  и  $r$  можно назначить, применяя следующее правило.

Вычисляют отношения  $\frac{R}{d}$  и  $\frac{r}{d}$  для чистового калибра используя данные сортамента. Во всех остальных профильных калибрах указанное отношение сохраняют постоянным. В результате, в связи с ростом толщины полки  $d$ , получаем при переходе от последнего калибра к первому возрастающие (приблизительно пропорционально обжатия) значения  $R$  и  $r$ .

Радиус  $R_1$  в первых 3—4 калибрах (против хода прокатки) принимаем равным нулю, что необходимо для лучшего выполнения прямого угла. В остальных калибрах радиус  $R_1$  отличен от нуля. Его величина постепенно возрастает к первому профильному калибру, где принимается равной 10—30 мм (в зависимости от размеров профиля).

Следует иметь в виду, что площадь, потерянная при  $R$ , компенсируется приращением площади на концах полок (при  $r$ ) и для первых пропусков — в вершине калибра при  $R_1$ , а также выпусками калибра.

В последних трех калибрах выпуск равен 3—5% от толщины полки. В первых калибрах выпуск можно назначить равным 5—10 мм.

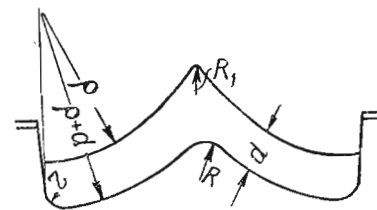
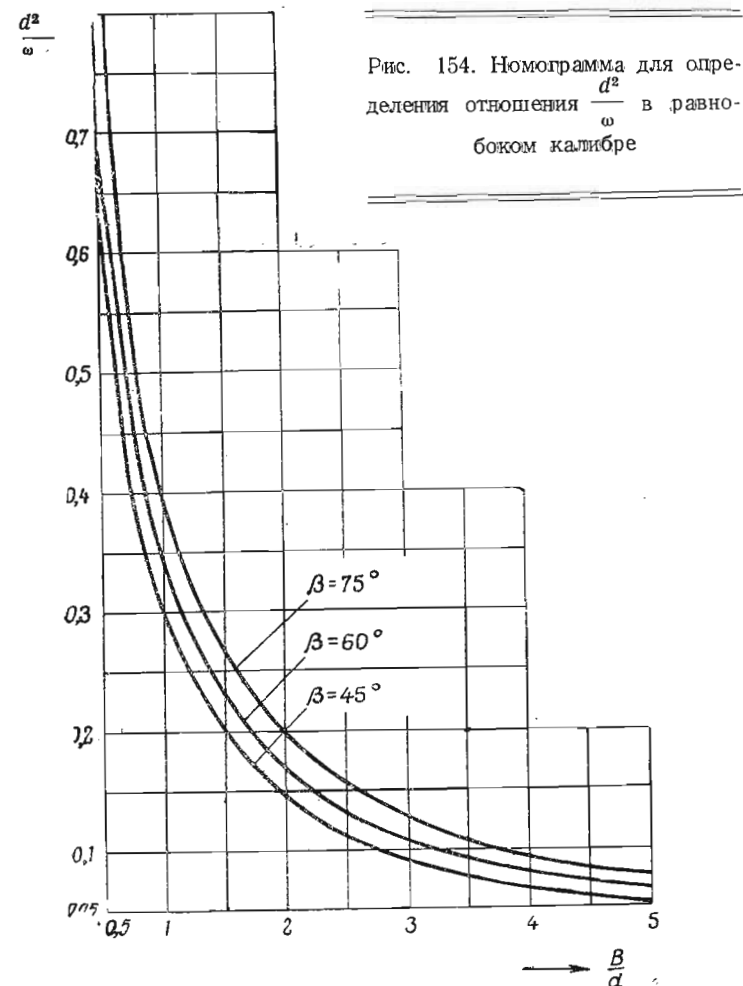


Рис. 155. Калибр для прокатки углового профиля

### § 3. Калибровка равнобокой угловой стали

Расчет деформации полосы при прокатке угловой стали производится «против хода» прокатки в следующем порядке.

Номинальные размеры профиля, калибровку которого надлежит спроектировать, берут из сортамента.

Следует иметь в виду, что один и тот же номер профиля имеет градацию по толщине полок. Мелкие номера угловой стали выкатываются с двумя толщинами, более крупные имеют три, четыре и пять различных толщин. Поэтому калибровку углового профиля приходится вести на одну из заданных по сортаменту толщин и добиваться получения остальных соответствующей настройкой валков в процессе прокатки.

При калибровке уголков, которые имеют две толщины полки, расчет можно производить, ориентируясь на любую из двух заданных сортаментом толщин. При наличии большого числа толщин необходимо ориентироваться на одну из промежуточных — средних — толщин.

Угловой профиль по сортаменту имеет плюсовые и минусовые допуски. Прокатку выгодно вести по минусовым допускам, так как при этом уменьшается число перевалок и, следовательно, увеличивается производительность стана.

Кроме того, при прокатке по минусовым допускам обеспечивается значительная экономия металла у потребителя, что в масштабе страны дает значительный народно-хозяйственный эффект.

Учитывая это обстоятельство, размеры горячего профиля и площадь его поперечного сечения определяют с учетом минусовых допусков.

Затем по формуле (I—VI) при  $\varphi = 0$  определяют отношение осей полосы, выходящей из чистового калибра. Таким образом, площадь и отношение осей полосы оказываются известными. Тогда по формулам (II—I) легко определяются высота и ширина поперечного сечения прямоугольной полосы, которая является соответственной для полосы, выходящей из чистового калибра.

Дальнейший расчет деформации при прокатке углового профиля осуществляется совершенно так же, как и расчет полосовой стали при прокатке ее в калибрах (см. § 5 главы IV).

Поправочный коэффициент уширения при расчете угловых профилей можно принимать, как и при прокатке полосы в калибрах, равным  $k_i = 0,425$ .

Заметим, что при прокатке угловых профилей поправочный коэффициент уширения не является постоянной величиной, как это принято нами, и, конечно, отличен от величины, равной 0,425. Однако вследствие отсутствия достаточного количества соответствующих экспериментальных данных мы можем указанную величину поправочного коэффициента принять в качестве первого

приближения. В пользу этого допущения имеются следующие основания.

Во-первых, для того, чтобы обеспечить лучшее выполнение внешнего угла и закруглений на концах полок профиля, необходимо подавать некоторый избыток металла в калибр, что и достигается при ограничении уширения.

Во-вторых, угловые профили одинакового номера, но с разной толщиной полки выкатываются из одних и тех же калибров. Поэтому, как уже было указано, калибровку угловых профилей ведут, ориентируясь на некоторую среднюю, заданную сортаментом, толщину полки, а остальные толщины, необходимые по сортаменту, получают путем соответствующей настройки валков. Некоторое ограничение уширения облегчает получение необходимого диапазона толщин. Действительно, при этом в распоряжении прокатчика всегда имеется в запасе избыточное количество металла, которое обеспечивает выполнение профиля даже при прокатке уголков с более толстой стенкой, получающейся при соответствующем раздвижении валков.

При прокатке же угловых профилей, стенка которых меньше спроектированной при расчете, валки сближаются, и дополнительный металл устремляется в длину.

Таким образом, степень стеснения уширения в некоторых пределах можно изменять по желанию калибровщика или прокатчика. Следовательно, значение поправочного коэффициента уширения может также несколько измениться, и калибровщик имеет право выбирать его с некоторым приближением. Конечно, при этом следует иметь в виду, что поправочный коэффициент уширения не должен быть слишком малым, так как в таком случае возможно переполнение калибра.

Практика показывает, что при прокатке полосовой стали в закрытых калибрах при значении  $k_i = 0,425$ , т. е. при ограничении уширения более чем в два раза против соответствующей его величины в случае прокатки на гладкой бочке, переполнение калибра еще не наблюдается. Проводя аналогию между упомянутым случаем прокатки полосовой стали и прокаткой угловой стали, приходим к выводу, что при значении  $k_i = 0,425$  переполнения калибров при прокатке уголков ожидать не приходится.

Итак, дальнейший расчет калибровки угловой стали ведется в следующем порядке.

Определяют ориентировочные размеры исходного квадратного сечения по формуле (I—IV), которая для данного случая приобретает такой вид:

$$c = \frac{b_{1c} + k_i \left( \frac{\Delta b}{\Delta h} \right)_{cp} \cdot h_{1c}}{1 + \left( \frac{\Delta b}{\Delta h} \right)_{cp} k_i}, \quad (7-VI)$$

или, принимая во внимание, что  $k_i = 0,425$ ,

$$c = \frac{b_{1c} + 0,425 \left( \frac{\Delta b}{\Delta h} \right)_p \cdot h_{1c}}{1 + 0,425 \left( \frac{\Delta b}{\Delta h} \right)_{cp}},$$

В этой формуле  $\left( \frac{\Delta b}{\Delta h} \right)_{cp}$  — среднее за все проходы уширение полосы прямоугольного сечения размерами  $h_1 = h_{1c}$  и  $b_1 = b_{1c}$  при прокатке на гладкой бочке. Для случая прокатки угловых профилей можно принимать значения этого отношения, которые даны в табл. 14.

Следующим шагом является определение суммарного коэффициента относительного обжатия  $\frac{\varepsilon_1}{\eta_2}$ , числа пропусков и коэффициентов относительного обжатия по проходам (см. § 3 гл. IV).

После этого рассчитывают уширение и определяют размеры соответственных прямоугольных сечений по проходам, а также определяют окончательные размеры исходной квадратной заготовки. При этом для расчета квадратной заготовки используют формулы (28—I) и (31—I).

В результате указанного расчета определяются площадь поперечного сечения и отношение осей соответственных полос в каждом проходе.

Далее следует расчет размеров калибров по размерам соответственных полос. Для этого, принимая во внимание значения площади, отношения осей и задавая угол при вершине калибра по номограмме (рис. 153 и 154), определяют основные размеры калибров  $B$ ,  $d$ ,  $\rho$  и строят их «скелеты», т. е. контуры калибра без учета закруглений (рис. 152). В заключение назначают выпуски калибров, радиусы закруглений (см. рис. 155), производят вычерчивание калибров и валков.

#### § 4. Геометрические соотношения в калибрах для прокатки неравнобокой угловой стали

Как уже указывалось, в большинстве случаев калибры неравнобоких угловых профилей располагаются в валках так, что их вертикальные проекции одинаковы. Применительно к указанному случаю и будем вести дальнейшее изложение.

По действующему в настоящее время сортаменту прокатываются угловые профили с таким отношением ширины полок профиля: 1,33; 1,45; 1,50; 1,66; 1,75. Прокатывают также угловые профили с отношением сторон до двух и даже больше.

Практика выработала определенные приемы построения калибров для прокатки неравнобоких угловых профилей (16, 29). Эти приемы в общем аналогичны приведенным в § 2 для равнобоких угловых профилей. Однако числовые соотношения размеров для неравнобоких уголков, разумеется, иные. Не останавливаясь здесь подробно на изложении приемов построения калибров, укажем лишь, что анализ их приводит к следующей форме калибра для прокатки неравнобоких угловых профилей (рис. 156). Закруглениями, ради упрощения формул, пренебре-

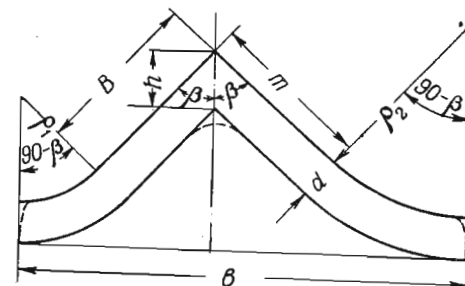


Рис. 156. Схема формы углового калибра к выводу геометрических соотношений в калибре для прокатки неравнобокой стали

гаем. В таком случае получим, что характеристическая высота профиля равна

$$h = \frac{d}{\sin \beta}.$$

Характеристическая ширина профиля:

$$b = \rho_1 \cos \beta + B \cos (90 - \beta) + m \cos (90 - \beta) + \rho_2 \cos \beta$$

или

$$b = (\rho_1 + \rho_2) \cos \beta + (B + m) \sin \beta.$$

Отношение ширины к высоте профиля:

$$a = \frac{(\rho_1 + \rho_2) \cos \beta \cdot \sin \beta + (B + m) \sin^2 \beta}{d}. \quad (8-VI)$$

Из этой формулы легко получить различные частные случаи. Например, анализ заводских данных показывает, что при отношении ширины длинной полки к ширине короткой полки уголка, равном 1,5, можно принимать, что

$$\rho_1 = B$$

и

$$\rho_2 = m = 1,5B.$$

Подставляя эти значения в формулу (8—VI), получим, что

$$a = \frac{2,5B \sin^2 \beta + 2,5B \sin \beta \cdot \cos \beta}{d},$$

откуда:

$$\frac{B}{d} = \frac{a}{2,5 \sin^2 \beta + 1,25 \sin^2 \beta}. \quad (9—VI)$$

По этой формуле построена номограмма для определения отношения  $\frac{B}{d}$  по заданным  $a$  и  $\beta$  (рис. 157).

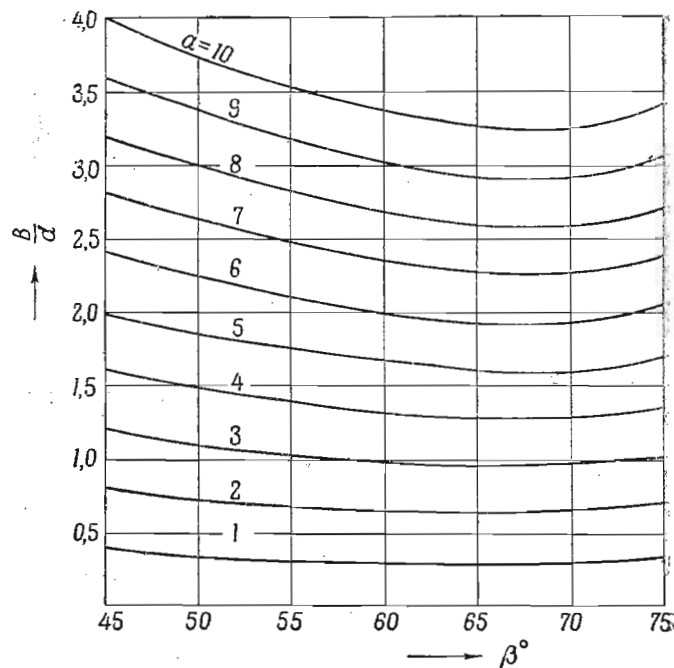


Рис. 157. Номограмма для определения отношения  $\frac{B}{d}$  в неравнобоком угловом калибре

Положим теперь, что  $B = m = \rho_1 = \rho_2$ .

Подставляя эти значения в формулу (8—VI), получим известную уже нам формулу (1—VI) для равнобокого уголка (см. § 2).

Выведем теперь формулу для определения отношения  $\frac{d^2}{\omega}$

Как видно из рис. 156, площадь калибра (полосы):

$$\begin{aligned} \omega = & d \left( B - \frac{h}{2} \cos \beta \right) + d \left( m - \frac{h}{2} \cos \beta \right) + \\ & + \frac{1}{2} (\rho_1 + d)^2 \left( \frac{\pi}{2} - \beta \right) - \frac{1}{2} \rho_2 \left( \frac{\pi}{2} - \beta \right) + \\ & + \frac{1}{2} (\rho_1 + d)^2 \left( \frac{\pi}{2} - \beta \right) - \frac{1}{2} \rho_2 \left( \frac{\pi}{2} - \beta \right). \end{aligned}$$

После простых преобразований получим:

$$\omega = d (B + m - d \operatorname{ctg} \beta) + \left( \frac{\pi}{2} - \beta \right) [(\rho_1 + \rho_2) + d] d$$

и

$$\frac{d^2}{\omega} = \frac{1}{\left( \frac{B+m}{d} - \operatorname{ctg} \beta \right) + \left( \frac{\pi}{2} - \beta \right) \left( \frac{\rho_1 + \rho_2}{d} + 1 \right)}. \quad (10—VI)$$

При  $\rho_1 = B$  и  $\rho_2 = m = 1,5 B$  из этой формулы получаем:

$$\frac{d^2}{\omega} = \frac{1}{\left( 2 \cdot \frac{B}{d} - \operatorname{ctg} \beta \right) + \left( \frac{\pi}{2} - \beta \right) \left( 2,5 \frac{B}{d} + 1 \right)}. \quad (11—VI)$$

По этому равенству построена номограмма, изображенная на рис. 158.

Если положить  $B = m = \rho_1 = \rho_2$  в формуле (10—VI), то получим соотношение (4—VI), выведенное в § 2 для равнобокого профиля.

Для чистового калибра отношение  $\frac{d^2}{\omega}$  знать не обязательно.

Здесь площадь калибра и толщина полок определяются по сортаменту с учетом минусовых допусков и изменения размеров вследствие нагрева перед прокаткой.

Отношение осей профиля можно определить графически или же путем вычислений.

Если биссектриса прямого угла расположена вертикально (рис. 144), то из формулы (8—VI) при  $\rho_1 = \rho_2 = 0$  получаем, что

$$a = \frac{(B + m) \sin^2 \beta}{d},$$

где  $B$  и  $m$  полок берутся из сортамента.

Если биссектриса прямого угла наклонена (рис. 144), то легко получить, что

$$a = \frac{m \sin \beta + \frac{1}{2} B \sin \beta \cdot \cos \beta}{d}. \quad (12—VI)$$



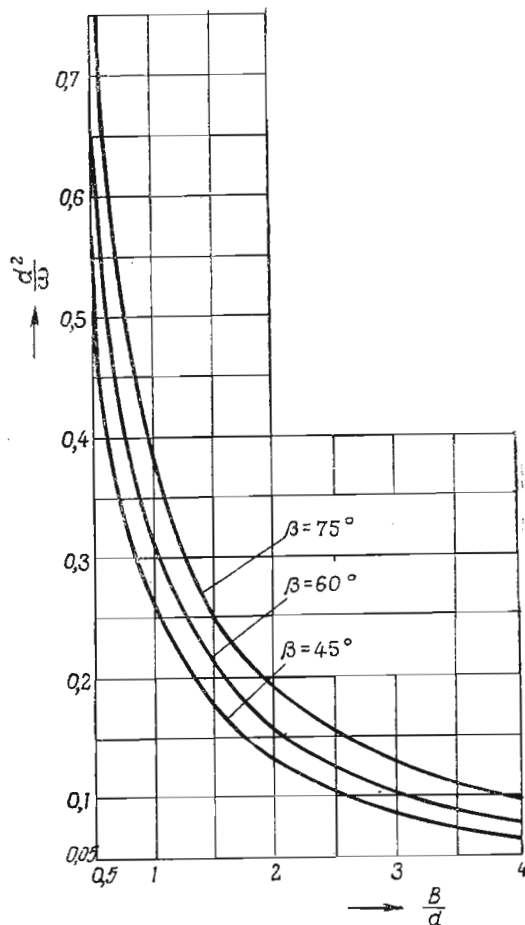


Рис. 158. Номограмма для определения отношения  $\frac{d^2}{\omega}$  в неравнобоком угловом калибре

### § 5. Калибровка неравнобокой угловой стали

Порядок расчета калибровки угловой стали в общем аналогичен порядку расчета равнобокой угловой стали.

Поэтому приведем лишь краткое описание расчета, в котором укажем на некоторые особенности его по сравнению со случаем калибровки равнобокой стали.

1. Берут из сортамента размеры чистового профиля с учетом минусового допуска и строят «скелет» чистового профиля без учета закруглений.

2. По формуле (8—VI) определяют отношение осей чистового профиля.

3. По формулам (11—I) определяют высоту и ширину поперечного сечения полосы, которая соответственна выходящей из чистового калибра.

4. Определяют ориентировочные размеры исходного квадратного сечения по формуле (7—VI).

Если калибруется угловой профиль крупного размера и с большим отношением осей, то сначала можно определить ориентировочные размеры не квадратной, а прямоугольной заготовки, поскольку в этом случае в первый профильный калибр возможна подача и прямоугольной заготовки.

Допустим, что прямоугольную полосу с размерами поперечного сечения  $h_1$  и  $b_1$  предполагается выкатывать из прямоугольной заготовки с размерами  $h_0$  и  $b_0$ .

Очевидно, что:

$$b_1 = b_0 + \Sigma \Delta b,$$

или

$$b_1 = b_0 + \frac{\Sigma \Delta b}{\Sigma \Delta h} \cdot \Sigma \Delta h.$$

Но:

$$\frac{\Sigma \Delta b}{\Sigma \Delta h} = \left( \frac{\Delta b}{\Delta h} \right)_{\text{ср}}; \quad \Sigma \Delta h = h_0 - h_1;$$

$$b_0 = a_0 h_0,$$

поэтому:

$$b_1 = a_0 h_0 + \left( \frac{\Delta b}{\Delta h} \right)_{\text{ср}} \cdot (h_0 - h_1),$$

откуда

$$h_0 = \frac{b_1 + \left( \frac{\Delta b}{\Delta h} \right)_{\text{ср}} h_1}{a_0 + \left( \frac{\Delta b}{\Delta h} \right)_{\text{ср}}}.$$

Допустим, что размеры чистового профиля пересчитаны на соответственные и профиль предполагают выкатывать из прямоугольной заготовки с размерами  $h_0$  и  $b_0$ . На основании только что приведенного равенства будем иметь для этого случая:

$$h_0 = \frac{b_1 \text{ с} + h_1 \text{ с} \left( \frac{\Delta b}{\Delta h} \right)_{\text{ср}}}{a_0 + \left( \frac{\Delta b}{\Delta h} \right)_{\text{ср}}} \quad (13\text{—VI})$$



В этой формуле

$$\left(\frac{\Delta b}{\Delta h}\right)_{\text{ср}} = k_i \left(\frac{\Delta b}{\Delta h}\right)_{\text{ср}}$$

По соображениям, изложенным в § 3, можно принимать  $k_i = 0,425$ .

Величина  $a_0$  принимается равной отношению ширины полок готового профиля. Например, для угловой стали № 20/15 можно принять  $a_0 = 1,5$ .

Таким образом, калибровка сводится к тому, чтобы получить из фасонного профиля плоскую заготовку прямоугольного сечения. По размерам этой заготовки затем рассчитывают квадратную.

Обычно для получения плоской заготовки требуется не больше одного—трех пропусков.

Понятно, что расчет квадратной заготовки следует производить после того, как рассчитана деформация во всех фасонных калибрах и получены окончательные размеры плоской заготовки. В противном случае возможны лишние перерасчеты.

5. Определяют суммарный коэффициент относительного обжатия  $\frac{1}{\eta_{\Sigma}}$ , число пропусков и коэффициенты относительного обжатия по проходам (см. § 3, глава IV).

6. Рассчитывают уширение и определяют размеры соответственных прямоугольных сечений по проходам.

7. Определяют основные размеры калибра:  $d$ ,  $B$ ,  $m$ ,  $\rho_1$ ,  $\rho_2$ . Для этого используют номограммы (рис. 157 и 158).

8. Назначают радиусы закруглений  $R$ ,  $r$ ,  $r_1$  и выпуски.

9. Производят построение калибров.

10. Вычерчивают валки с калибрами.

## § 6. Геометрические соотношения в калибрах для прокатки зетовых профилей

Зетовые профили прокатываются в настоящее время в большинстве случаев с развернутыми и изогнутыми полками (рис. 159), и только в чистовом пропуске изгиб полок уничтожается (рис. 160). Длина наружных сторон полок определяется в общем теми же соотношениями, что и при прокатке угловой стали.

В частности, наружные стороны полок предчистового калибра состоят из прямой линии, проведенной под углом  $45^\circ$  к вертикали и дуги окружности, радиус которого равен половине ширины полки чистового профиля.

Таким образом «скелет» калибра для прокатки зетовых профилей может быть представлен так, как указано на рис. 161.

В целях упрощения формул, как и для случая угловых профилей, закруглениями и выпусками пренебрегаем.

Как видно из рисунка, высота профиля:

$$h = \frac{d}{\sin \alpha}$$

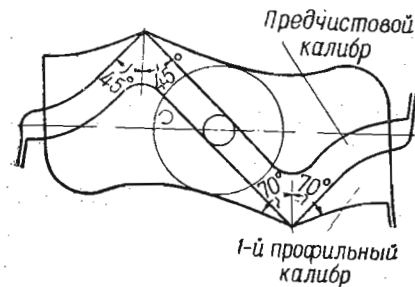


Рис. 159. Калибровка зетового профиля с развернутыми полками

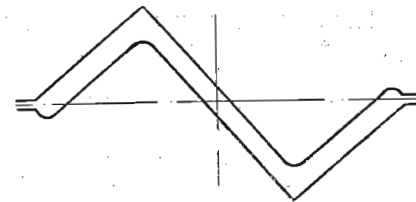


Рис. 160. Чистовой калибр для прокатки зетового профиля с выпрямлением полок

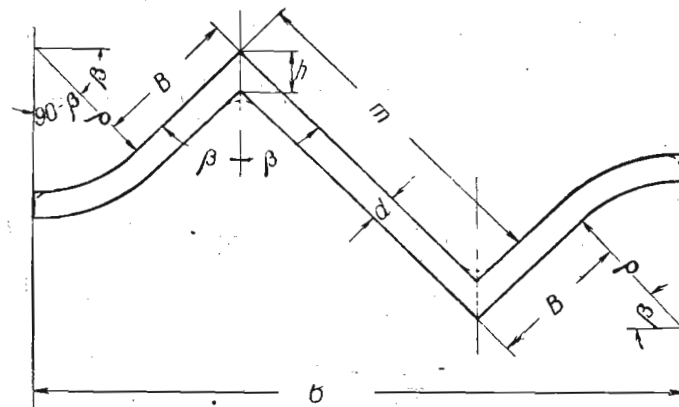


Рис. 161. Схема калибра зетового профиля к выводу геометрических соотношений в калибре для прокатки зетовой стали

Характеристическая ширина профиля:

$$b = 2B \sin \beta + 2\rho \cos \beta + m \sin \beta$$

Отношение ширины к высоте профиля:

$$a = \frac{2B \sin^2 \beta + 2\rho \sin \beta \cdot \cos \beta + m \sin^2 \beta}{d} \quad (14-VI)$$

Из этой формулы можно получить различные частные случаи.

По данным практики известно, что обычно принимают

$$\rho = \frac{l}{2}; \quad B = \frac{l}{2}; \quad m = 1,15l,$$

где  $l$  — длина полки чистового профиля.

Из этих соотношений следует, что

$$\rho = B \quad \text{и} \quad m = 2,3B.$$

Подставляя эти значения  $\rho$  и  $m$  в формулу (14—VI), после простых преобразований получим, что

$$\frac{B}{d} = \frac{a}{4,3 \sin^2 \beta + \sin 2\beta}. \quad (15-VI)$$

Если в случае (14—VI) положить  $m = 0$ , то получаем известную уже формулу (2—VI) для равнобоких угловых профилей.

Площадь поперечного сечения зетового профиля:

$$\omega = 2d \left( B - \frac{h}{2} \cos \beta \right) + 2 \left[ \frac{1}{2} (\rho + d)^2 - \frac{1}{2} \rho^2 \right] \left( \frac{\pi}{2} - \beta \right) + md.$$

Отсюда после простых преобразований получаем:

$$\omega = 2dB - d^2 \operatorname{ctg} \beta - \left( \frac{\pi}{2} - \beta \right) (2\rho d + d^2) + md$$

и

$$\frac{d^2}{\omega} = \frac{1}{\left( 2 \cdot \frac{B}{d} - \operatorname{ctg} \beta \right) + \left( \frac{\pi}{2} - \beta \right) \left( 2 \frac{\rho}{d} + 1 \right) + \frac{m}{d}}. \quad (16-VI)$$

При  $\rho = B$  и  $m = 2,3 B$  получим из этой формулы:

$$\frac{d^2}{\omega} = \frac{1}{\left( 4,3 \frac{B}{d} - \operatorname{ctg} \beta \right) + \left( \frac{\pi}{2} - \beta \right) \left( 2 \cdot \frac{B}{d} + 1 \right)}. \quad (17-VI)$$

Если же в формуле (16—VI) полагать  $m = 0$ , то получим формулу (4—VI) для равнобоких угловых профилей.

Путем простых преобразований из формул (15—VI) и (17—VI) легко можно было бы получить соответствующие им формулы для неравнобоких угловых профилей.

По формулам (15—VI) и (17—VI) построены номограммы (рис. 162 и 163), которыми можно пользоваться для расчета основных размеров зетовых профилей, необходимых для построения калибров.

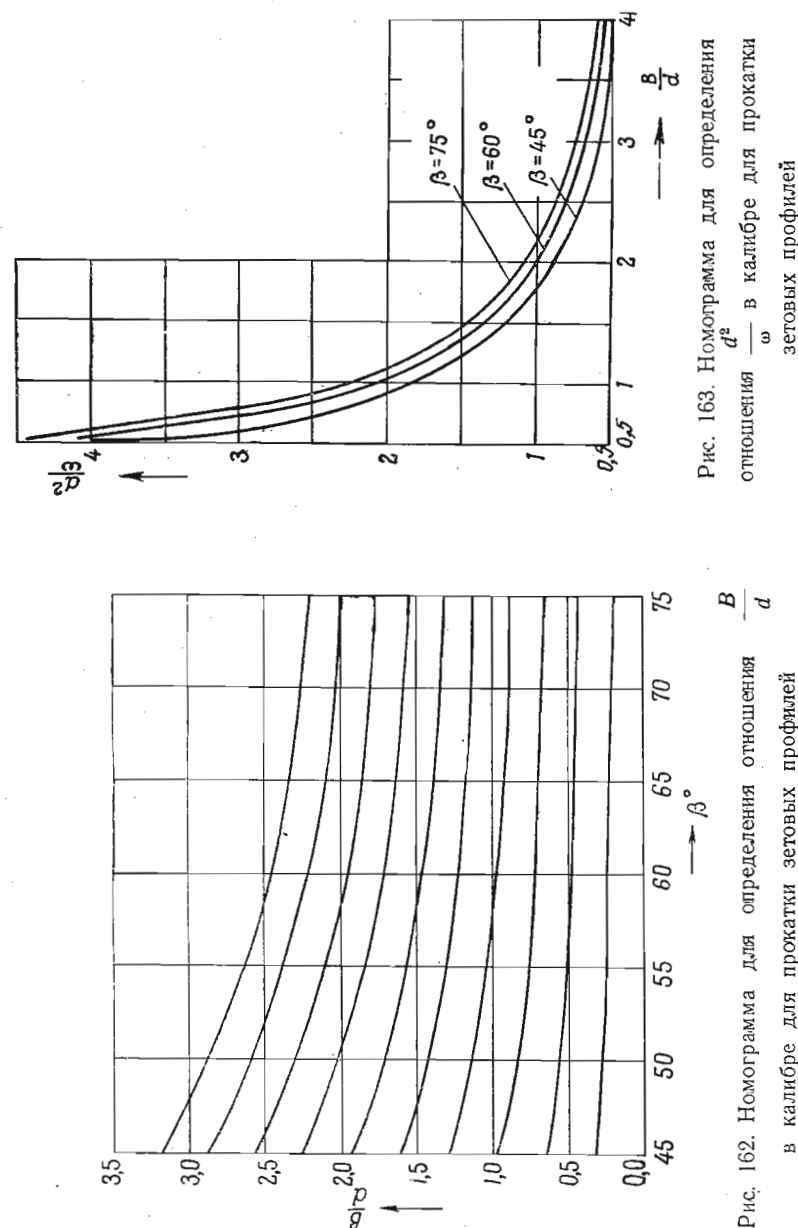


Рис. 163. Номограмма для определения отношения  $\frac{B}{d}$  в калибре для прокатки зетовых профилей

Рис. 162. Номограмма для определения отношения  $\frac{B}{d}$  в калибре для прокатки зетовых профилей

## § 7. Калибровка зетовых профилей

Порядок расчета калибровки зетовых профилей аналогичен порядку расчета неравнобокой угловой стали. Поэтому, не приводя подробного описания расчета, укажем лишь на некоторые особенности его.

Зетовые профили имеют обычно такое соотношение между шириной и высотой их, что в первый профильный калибр приходится задавать прямоугольную заготовку. Поэтому определение ориентировочных размеров исходного прямоугольного сечения производится по формуле (13—VI).

Отношение осей заготовки можно выбирать по такой формуле:

$$a_0 = \frac{b_{\text{ч}} - (10 \div 20 \text{ мм})}{h_{\text{ч}} + (0 \div 5 \text{ мм})}, \quad (18\text{—VI})$$

где  $b_{\text{ч}}$  — ширина чистового профиля в положении прокатки;

$h_{\text{ч}}$  — проекция чистового профиля на вертикаль в положении прокатки.

Использование формул (28—I) и (31—I) для расчета прямоугольной заготовки по заданному отношению диагоналей прямоугольной заготовки окончательных размеров при расчете зетовых профилей, как правило, не обязательно. Действительно, в большинстве случаев прямоугольный профиль является промежуточным и получается из квадратной заготовки. Выбор же соответствующего исходного квадратного сечения для прямоугольной заготовки к зетовому профилю не представляет затруднений.

Для лучшего выполнения вершин прямых углов профиля в двух-трех последних калибрах соответствующие углы берут равными  $45^\circ$  к вертикали и радиус закругления этих вершин полагают здесь равным нулю.

Вообще, все радиусы закруглений, так же как и выпуски зетовых калибров выбираются такие, как и для угловых профилей.

Положение открытой и закрытой части калибра чередуется от пропуска к пропуску для лучшего выполнения профиля.

На рис. 164 показан пример калибровки, выполненный по описанному методу<sup>1</sup>.

## § 8. Калибровка профилей, подобных угловому и зетовому

По методу соответственной полосы можно осуществить калибровку значительного количества профилей, подобных угловому и зетовому. Некоторые из таких профилей для примера изображены на рис. 165. Во всех случаях порядок расчета будет аналогичен описанному выше. Сначала рассчитывают деформацию

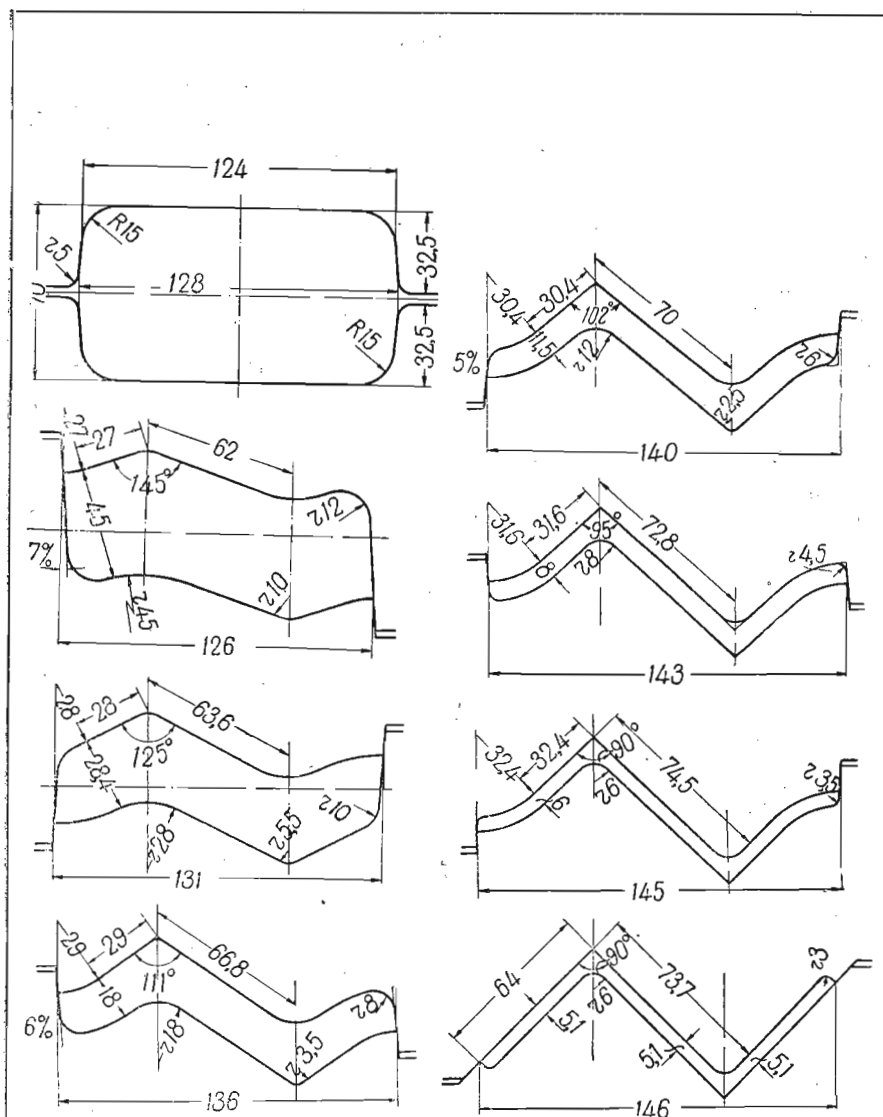


Рис. 164. Калибровка зетового профиля при прокатке в валках диаметром 350 мм. Плоская заготовка, подаваемая в первый профильный калибр, имеет размеры:  $h_0 = 122 \text{ мм}$ ,  $b_0 = 122 \text{ мм}$

<sup>1</sup> Калибровка выполнена П. С. Протасовым.

соответственной полосы в калибрах, в результате чего оказывается известным отношение осей и площадь поперечного сечения профиля по проходам.

Затем осуществляют построение калибров, для чего предварительно строят «скелет» калибра и вводят геометрические соотношения, необходимые для построения калибров.

Понятно, что конкретные числовые соотношения между геометрическими размерами калибра могут быть взяты не только на основании данных практики, как это сделано в настоящей главе, но и введены калибровщиком самостоятельно, на основании учета конкретных условий прокатки и конфигурации чистового профиля. Вывод указанных геометрических соотношений, как было показано выше, принципиальных трудностей не представляет.

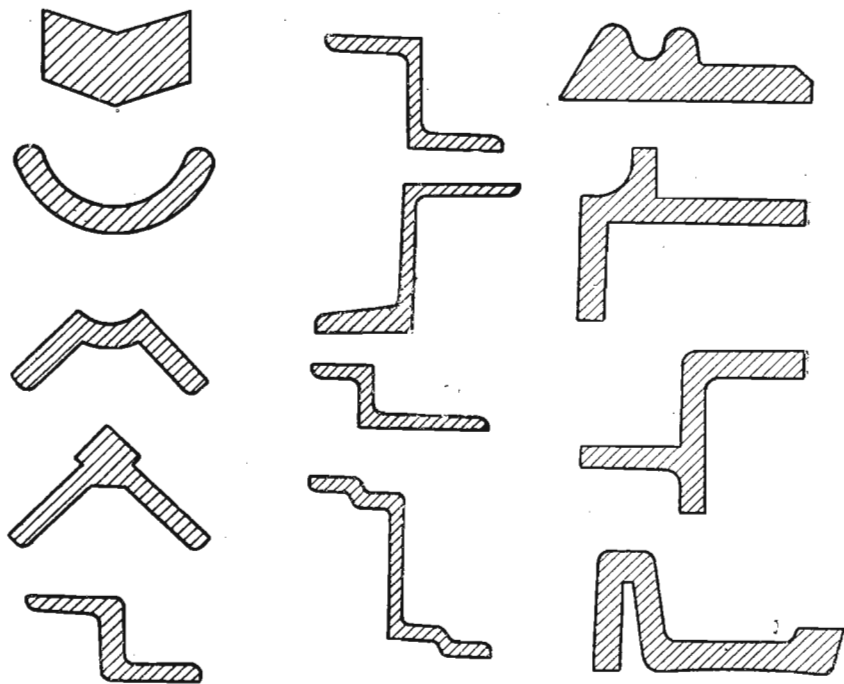


Рис. 165. Примеры угловых и зетовых профилей, калибровка которых выполнена по методу соответственной полосы

Следует, однако, иметь в виду, что не все угловые и зетовые профили можно калибровать по методу соответственной полосы в том его виде, как он изложен в настоящей книге. Например, на

Рис. 166. Примеры профилей, калибровка которых по соответственной полосе пока невыполнима

рис. 166 представлены четыре профиля. У первого, второго и третьего из них величина и положение характеристических осей неопределенны, и, следовательно, задача расчета деформации не имеет однозначного решения.

У четвертого профиля угол между гранями профиля мал; имеются основания полагать, что в этом случае проявит свое действие скоростной фактор, который при данном методе расчета учитывается не точно.

Понятно, что калибровка профилей, подобных изображенному на рис. 166 (четвертый профиль), по методу соответственной полосы была бы возможна, если бы экспериментальным путем были установлены критерии для назначения величины и положения их характеристических осей и влияние скорости на характер заполнения калибров.

### § 9. Пример калибровки угловой стали

Порядок расчета угловой и зетовой стали проследим на конкретном примере калибровки равнобокого углового профиля, выполненной для одного из ленинградских заводов.

**ПРИМЕР 39.** Спроектировать калибровку для прокатки углового профиля № 6,5 (ОСТ 10014—39).

Начальный диаметр валков стана  $D = 470$  мм.

Температура начала прокатки равна  $1100^\circ$ . Температура конца прокатки  $900^\circ$ . Валки стальные.

По ОСТ 10014—39, угловая сталь № 6,5 катается с тремя толщинами полосы — 6; 8 и 10 мм.

Расчет ведем на среднюю толщину полки, равную 8 мм.

Угловой профиль с указанием номинальных размеров изображен на рис. 167, а.

Согласно ОСТ, допуск по ширине  $B$  полки равен  $\pm 1,5$  мм и по толщине  $d$  полки  $\pm 0,7$  мм. Прокатку профиля выгодно вести по минусовым допускам.

Линейные размеры профиля в горячем состоянии приблизительно на 1,5%, или в 1,015 раза больше, чем в холодном состоянии.

Таким образом, горячие размеры чистового профиля с учетом минусового допуска таковы (рис. 167, б):

$$B = 65 \cdot 1,015 - 1,5 = 64,5 \text{ мм};$$

$$d = 8 \cdot 1,015 - 0,7 = 7,45 \text{ мм}.$$

Следовательно, линейные размеры чистового профиля меньше номинальных по ширине в  $\frac{64,5}{65,0} = 0,995$  раза и по толщине в  $\frac{7,45}{8,00} = 0,932$  раза.

Согласно ОСТ 10014—39, номинальная площадь полученного сечения профиля равна

$$\omega = 9,87 \text{ см}^2 = 987 \text{ мм}^2.$$

Очевидно, что площадь поперечного сечения чистового профиля в горячем состоянии с учетом минусового допуска равна

$$\omega_1 = 987 \cdot 0,995 \cdot 0,933 = 915 \text{ мм}^2.$$

В целях упрощения расчета чистовой профиль представим так, как это указано на рис. 167, в.

Размеры  $b$  и  $h$ , даны на чертеже:

$$b = 2B \sin \beta = 2 \cdot 64,5 \cdot \sin 45^\circ = 91,2 \text{ мм};$$

$$h = \frac{d}{\sin \beta} = \frac{7,45}{\sin 45^\circ} = 10,55 \text{ мм}.$$

Согласно формуле (I—VI) при  $\rho = 0$  отношение осей чистового профиля:

$$a = \frac{2B \sin^2 \beta}{d} = \frac{2 \cdot 64,5 \cdot \sin^2 45^\circ}{7,45} = 8,65.$$

Согласно формулам (II—I), высота и ширина полосы, соответственной чистовому профилю:

$$h_{1c} = \sqrt{\frac{\omega_1}{a_1}} = \sqrt{\frac{915}{8,65}} = 10,3 \text{ мм};$$

$$b_{1c} = a_1 h_{1c} = 8,65 \cdot 10,3 = 89 \text{ мм}.$$

Определим ориентировочные размеры исходного квадратного сечения.

По формуле (7—VI) при  $k_i = 0,425$  и  $\left(\frac{\Delta b}{\Delta h}\right)_{cp} = 0,7$  (см. табл. 14).

$$c = \frac{b_{1c} + 0,425 \left(\frac{\Delta b}{\Delta h}\right)_{cp} \cdot h_{1c}}{1 + 0,425 \left(\frac{\Delta b}{\Delta h}\right)_{cp}} = \frac{89 + 0,425 \cdot 10,3 \cdot 0,7}{1 + 0,425 \cdot 0,7} = 71 \text{ мм}.$$

Суммарный за все проходы коэффициент относительного обжатия:

$$\left(\frac{1}{\eta_{\Sigma}}\right)_p = \frac{c}{h_{1c}} = \frac{71}{10,3} = 6,8.$$

По данным А. П. Чекмарева (табл. 15) имеем при среднем режиме:

$$\left(\frac{1}{\eta_{\Sigma}}\right)_r = 6,72.$$

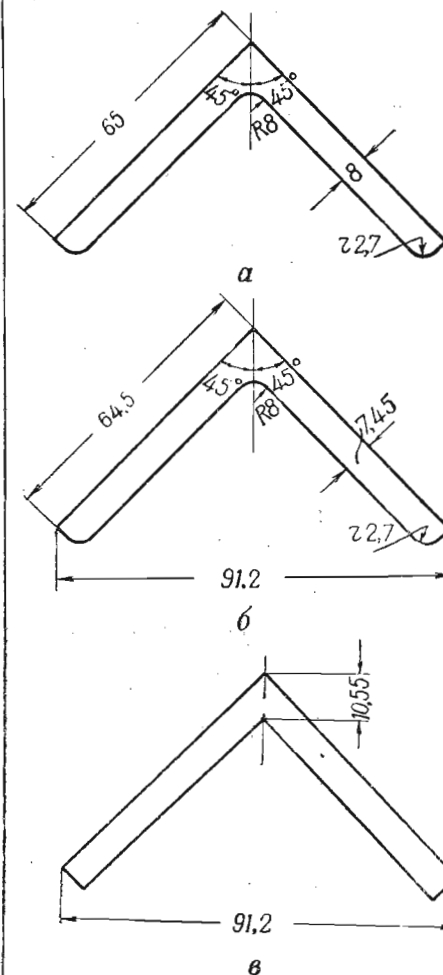


Рис. 167. Угловой профиль № 6,5:  
а — номинальные размеры; б — размеры в горячем состоянии с учетом минусовых допусков; в — «скелет» профиля

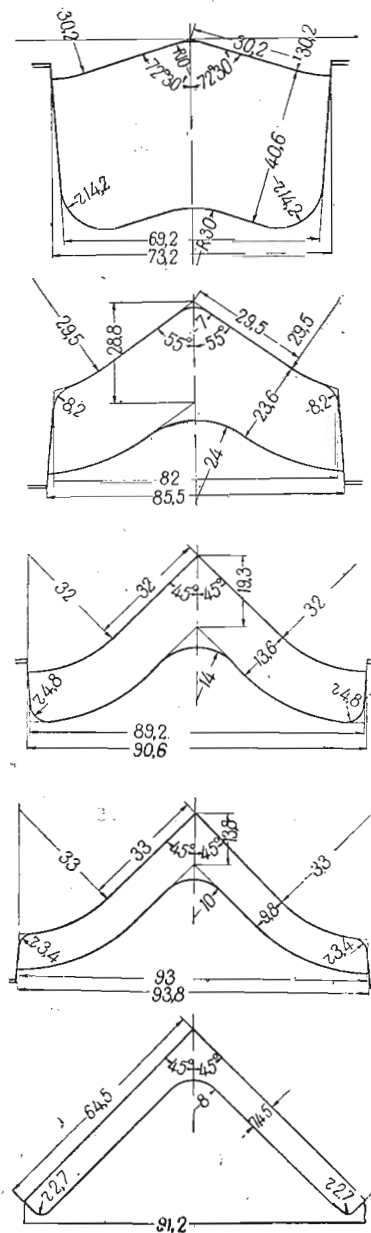


Рис. 168. Калибровка равнобокого углового профиля № 6,5

Этому соответствует пять пропусков с таким рядом коэффициентов (табл. 15):

$$\frac{1}{\eta_5} = 1,25; \quad \frac{1}{\eta_4} = 1,40; \quad \frac{1}{\eta_3} = 1,5; \quad \frac{1}{\eta_2} = 1,6; \quad \frac{1}{\eta_1} = 1,6.$$

Отношение

$$\left( \frac{1}{\eta_{\Sigma}} \right)_p : \left( \frac{1}{\eta_{\Sigma}} \right)_T = 1,012.$$

Поправочный коэффициент по номограмме (рис. 125):  $k = 1,004$ .

Применительно к расчету нашей калибровки получим следующий ряд основных коэффициентов:

$$\frac{1}{\eta_5} = 1,004 \cdot 1,25 = 1,255;$$

$$\frac{1}{\eta_4} = 1,004 \cdot 1,4 = 1,406;$$

$$\frac{1}{\eta_3} = 1,004 \cdot 1,5 = 1,506;$$

$$\frac{1}{\eta_2} = 1,004 \cdot 1,6 = 1,608;$$

$$\frac{1}{\eta_1} = 1,004 \cdot 1,6 = 1,608.$$

При изменении температуры полосы от 1100 до 900° коэффициент трения при прокатке уменьшается в пределах от 0,28 до 0,32 (рис. 13). Вследствие малого диапазона изменения коэффициента трения примем, что коэффициент трения при прокатке во всех пяти пропусках равен среднему арифметическому из указанных крайних значений, т. е.  $\mu = 0,3$ .

Перейдем теперь к расчету деформации полосы при прокатке.

Этот расчет для каждого пропуска состоит из двух этапов: сначала рассчитывается деформация полосы в предположении, что она прокатывается на гладкой бочке, а затем уже определяются соответственные размеры полосы при прокатке ее в калибре.

*V калибр (чистовой).*

а) Расчет деформации при прокатке на гладкой бочке.

Выше были рассчитаны соответственные размеры полосы по выходе ее из чистового калибра. Они равны  $h_{1c} = 10,3$  мм и  $b_{1c} = 89$  мм.

Рассчитаем деформацию равновеликой прямоугольной полосы размерами  $h_1 = h = 10,3$  или  $b_1 = b = 89$  мм в предположении, что она прокатывается на гладкой бочке.

Высота полосы до прокатки:

$$h_0 = \frac{1}{\eta_5} \cdot h_1 = 1,255 \cdot 10,3 = 12,9 \text{ мм.}$$

Линейное обжатие:

$$\Delta h = h_0 - h_1 = 12,9 - 10,3 = 2,6 \text{ мм.}$$

Относительное обжатие:

$$\frac{\Delta h}{h_0} = \frac{2,6}{12,9} = 0,201.$$

Рабочий диаметр валков:

$$D_p = D - h_1 = 470 - 10,3 \approx 460 \text{ мм.}$$

Отношение:

$$\frac{D_p}{h_0} = \frac{460}{12,9} = 35,6.$$

По номограмме (рис. 14) при  $\frac{\Delta h}{h_0} = 0,201$  и  $\frac{D_p}{h_0} = 35,6$  получаем, что  $\frac{\Delta b}{\Delta h} = 1,10$ .

б) Расчет деформации в калибре  
Коэффициент уширения в калибре:

$$\frac{\Delta b_c}{\Delta h_c} = k_i \frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,425 \cdot 1,10 = 0,468.$$

Обжатие в калибре:

$$\Delta h_c = \Delta h = 2,6 \text{ мм.}$$

Уширение в калибре:

$$\Delta b_c = 0,468 \Delta h_c = 0,468 \cdot 2,6 = 1,2 \text{ мм.}$$

Высота полосы до прокатки в калибре:

$$h_{0c} = h_0 = 12,9 \text{ мм.}$$

Ширина полосы до прокатки в калибре

$$b_{0c} = b_{1c} - \Delta b_c = 89 - 1,2 = 87,8 \text{ мм.}$$

Площадь полосы (она же — площадь калибра):

$$\omega = h_{0c} b_{0c} = 12,9 \cdot 87,8 = 1135 \text{ мм.}$$

Отношение осей полосы (калибра):

$$a = \frac{b_{0c}}{h_{0c}} = 6,8.$$

## IV калибр (предчистовой)

а) Расчет деформации при прокатке на гладкой бочке

Для четвертого пропуска размеры полосы после прокатки равны размерам соответственной полосы до прокатки ее в пятом калибре. Таким образом:

$$h_1 = 12,9 \text{ мм}; \quad b_1 = 87,8 \text{ мм}; \quad h_0 = \frac{1}{\gamma_4} \cdot h_1 = 1,406 \cdot 12,9 = 18,1 \text{ мм};$$

$$\Delta h = 18,1 - 12,9 = 5,2 \text{ мм}; \quad D_p = D - h_1 = 470 - 12,9 \approx 457 \text{ мм};$$

$$\frac{\Delta h}{h_0} = 0,287; \quad \frac{D_p}{h_0} = \frac{457}{18,1} = 30,7.$$

По номограмме (рис. 14) получаем, что  $\frac{\Delta b}{\Delta h} = 1,28$ .

б) Расчет деформации в калибре

$$\frac{\Delta b_c}{\Delta h_c} = k_i \frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,425 \cdot 1,28 = 0,544;$$

$$\Delta h_c = \Delta h = 5,2 \text{ мм}; \quad \Delta b_c = 0,544 \Delta h_c = 0,544 \cdot 5,2 = 2,8 \text{ мм};$$

$$h_{0c} = h_0 = 18,1 \text{ мм}; \quad b_{0c} = b_{1c} - \Delta b_c = 87,8 - 2,8 = 85 \text{ мм};$$

$$\omega_0 = h_{0c} b_{0c} = 18,1 \cdot 85 = 1540 \text{ мм}^2;$$

$$a = \frac{b_{0c}}{h_{0c}} = \frac{85}{18,1} = 4,7.$$

## III калибр

а) Расчет деформации при прокатке на гладкой бочке

$$h_1 = 18,1 \text{ мм}; \quad b_1 = 85 \text{ мм}; \quad h_0 = \frac{1}{\gamma_3} \cdot h_1 = 1,506 \cdot 18,1 = 27,3 \text{ мм};$$

$$\Delta h = 27,3 - 18,1 = 9,2 \text{ мм}; \quad D_p = D - h_1 = 470 - 18,1 \approx 452 \text{ мм};$$

$$\frac{\Delta h}{h_0} = \frac{9,2}{27,3} = 0,337; \quad \frac{D_p}{h_0} = \frac{452}{27,3} = 16,5.$$

По номограмме (рис. 14)  $\frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,99$ .

б) Расчет деформации в калибре

$$\frac{\Delta b_c}{\Delta h_c} = k_i \frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,425 \cdot 0,99 = 0,42;$$

$$\Delta h_c = \Delta h = 9,2 \text{ мм}; \quad \Delta b_c = 0,42 \Delta h_c = 0,42 \cdot 9,2 = 3,9 \text{ мм};$$

$$h_{0c} = h_0 = 27,3 \text{ мм}; \quad b_{0c} = b_{1c} - \Delta b_c = 85 - 3,9 = 81,1 \text{ мм};$$

$$\omega_0 = h_{0c} b_{0c} = 27,3 \cdot 81,1 = 2235 \text{ мм}^2;$$

$$a = \frac{b_{0c}}{h_{0c}} = \frac{81,1}{27,3} = 2,97.$$

## II калибр

а) Расчет деформации при прокатке на гладкой бочке

$$h_1 = 27,3 \text{ мм}; \quad b_1 = 81,1 \text{ мм}; \quad h_0 = \frac{1}{\gamma_2} \cdot h_1 =$$

$$= 1,608 \cdot 27,3 = 43,9 \text{ мм};$$

$$\Delta h = 43,9 - 27,3 = 16,6 \text{ мм}; \quad D_p = D - h_1 = 470 - 27,3 \approx 443 \text{ мм};$$

$$\frac{\Delta h}{h_0} = 0,38; \quad \frac{D_p}{h_0} = \frac{443}{43,9} = 10,1.$$

По номограмме (рис. 14):  $\frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,77$ .

б) Расчет деформации в калибре

$$\frac{\Delta b_c}{\Delta h_c} = k_i \frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,425 \cdot 0,77 = 0,327;$$

$$\Delta h_c = \Delta h = 16,6 \text{ мм}; \quad \Delta b_c = 0,327 \Delta h_c = 0,327 \cdot 16,6 = 5,4 \text{ мм};$$

$$h_{0c} = h_0 = 43,9 \text{ мм}; \quad b_{0c} = b_{1c} - \Delta b_c = 81,1 - 5,4 = 75,5 \text{ мм};$$

$$\omega_0 = h_{0c} b_{0c} = 43,9 \cdot 75,5 = 3310 \text{ мм}^2;$$

$$a = \frac{b_{0c}}{h_{0c}} = \frac{75,5}{43,9} = 1,72.$$

## I калибр

а) Расчет деформации при прокатке на гладкой бочке

Размеры поперечного сечения полосы после первого пропуска равны размерам соответственной полосы до прокатки ее во втором калибре. Следовательно,  $h_1 = 43,9 \text{ мм}$  и  $b_1 = 75,5 \text{ мм}$ .

Задача заключается в том, чтобы по указанным значениям  $h_1$  и  $b_1$  рассчитать размеры исходной квадратной заготовки. В отличие от ориентировочного расчета, приведенного в начале примера, расчет, который должен быть произведен здесь, является уже окончательным.

По формуле (28—I) имеем:

$$\Delta h = \frac{b_1 - h_1}{1 + \frac{\Delta b}{\Delta h}}.$$

Предварительно примем  $\frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,30$  тогда

$$\Delta h = \frac{75,5 - 43,9}{1 + 0,3} = \frac{31,6}{1,3} = 24,3 \text{ мм};$$

$$h_0 = h_1 + \Delta h = 43,9 + 24,3 = 68,2 \text{ мм}; \quad \frac{\Delta h}{h_0} = \frac{24,3}{68,2} = 0,357;$$

$$D_p = D - h_1 = 470 - 43,9 \approx 426 \text{ мм}; \quad \frac{D_p}{h_0} = \frac{426}{68,2} = 6,26.$$

По номограмме (рис. 14):  $\frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,53$ .

Полученное расчетом отношение  $\frac{\Delta b}{\Delta h}$  используем для того, чтобы произвести окончательный расчет исходной заготовки квадратного сечения.

б) Расчет деформации при прокатке в калибре

Коэффициент уширения при прокатке в калибре:

$$\frac{\Delta b_c}{\Delta h_c} = k_i \frac{\Delta b}{\Delta h} = 0,425 \cdot 0,53 = 0,225.$$

Обжатие при прокатке в калибре по равенству (31—1):

$$\Delta h_c = \frac{b_{1c} - h_{1c}}{1 + \frac{\Delta b_c}{\Delta h_c}} = \frac{75,5 - 43,9}{1,225} = 25,8 \text{ мм}.$$

Уширение при прокатке в калибре:

$$\Delta b_c = 0,225 \Delta h_c = 0,225 \cdot 25,8 = 5,8 \text{ мм}.$$

Линейные размеры исходной квадратной заготовки:

$$h_0 = h_{1c} + \Delta h_c = 43,9 + 25,8 = 69,7 \text{ мм};$$

$$b_0 = b_{1c} - \Delta b_c = 75,5 - 5,8 = 69,7 \text{ мм}.$$

Таким образом, мы получили сечение, близкое к предварительно заданному, которое было равно  $71 \times 71 \text{ мм}$ .

Подсчитаем величину коэффициента относительного обжатия:

$$\frac{1}{\eta_{\Sigma}} = \frac{h_0}{h_{1c}} = 6,76.$$

Предварительно принятая величина коэффициента относительного обжатия составляла 6,8.

Различие между предварительно принятой величиной коэффициента относительного обжатия и полученной в результате окончательного расчета невелико и является результатом изменения

величины исходного квадратного сечения при окончательном расчете.

Результаты расчета деформации полосы сведены в табл. 19. Размеры исходного квадратного сечения принимаем равными  $70 \times 70 \text{ мм}$ .

Перейдем теперь к определению основных размеров калибров и их построению.

V калибр (чистовой)

Этот калибр строится по данным ОСТ 10014—39 с учетом допусков для профиля в горячем состоянии. Разъем валков делается по необходимости с наружной стороны полок, с тем чтобы обеспечить выполнение закруглений на концах полок в соответствии с требованием ОСТ.

Чистовой калибр изображен на рис. 168.

IV калибр (предчистовой)

Все калибры, следующие за чистовым, открыты поочередно — то снизу, то сверху. Таким образом, в предчистовом калибре открытая его часть выполняется снизу. Благодаря такому чередованию можно избежать переполнения.

Для лучшего выполнения вершины прямого угла профиля соответствующий угол в первых двух-трех калибрах перед чистовым берут равным  $45^\circ$  и радиус закругления  $R_1$  этого угла полагают равным нулю.

На этом основании угол при вершине калибра в четвертом и третьем калибрах примем равным  $\beta = 45^\circ$ .

Согласно расчету деформации (табл. 19), отношение осей полосы после прокатки в четвертом калибре  $a = 6,8$ . При  $a = 6,8$  и  $\beta = 45^\circ$  по номограмме (рис. 153) отношение  $\frac{B}{d} = 3,40$ .

При  $\frac{B}{d} = 3,4$  и  $\beta = 45^\circ$  по номограмме (рис. 154) отношение  $\frac{d^2}{\omega} = 0,085$ .

Согласно расчету деформации (табл. 19), площадь поперечного сечения полосы после прокатки в четвертом калибре  $\omega_k = 1135 \text{ мм}^2$ .

Таким образом, толщина полки:

$$d = \sqrt{0,085 \omega_k} = \sqrt{0,085 \cdot 1135} = 9,8 \text{ мм}.$$

Длина прямой части наружной стороны полки профиля:

$$B = 3,4d = 3,4 \cdot 9,8 \approx 33 \text{ мм}.$$

Радиус закругления «развернутой» части наружной стороны полки профиля:

$$r = B = 33 \text{ мм}.$$



## Калибровка равнобокой угловой стали № 6,5

№ пропуски	Соответственная								
	$h_c$ мм	$b_c$ мм	$\Delta h_c$ мм	$\Delta b_c$ мм	$\frac{\Delta b_c}{\Delta h_c}$	$\omega$ мм <sup>2</sup>	$a$	$\beta$	$\frac{B}{d}$
5	10,3	89,0	2,6	1,2	0,468	987	8,65	45°	—
4	12,9	87,8	5,2	2,8	0,544	1135	6,8	45°	3,4
3	18,1	85,0	9,2	3,9	0,420	1540	4,7	45°	2,35
2	27,3	81,1	16,6	5,4	0,327	2235	2,97	55°	1,25
1	43,9	75,5	25,8	5,8	0,225	3310	1,72	72°30'	0,75
0	69,7	69,7	—	—	—	4900	1,00	—	—

Радиус закругления «развернутой» части внутренней стороны полки профиля:

$$\rho' = B + d = 33 + 9,8 = 42,8 \text{ мм.}$$

Характеристическая высота и ширина профиля:

$$h = \frac{d}{\sin 45^\circ} = \frac{9,8}{0,707} = 13,8 \text{ мм;}$$

$$b = ah = 6,8 \cdot 13,8 = 93,7 \text{ мм.}$$

По этим данным строится «скелет» калибра так, как это показано на рис. 152.

Назначаем теперь радиусы закруглений и выпуск калибра, принимая во внимание соображения, изложенные в § 2 настоящей главы.

Для чистового профиля отношение радиуса закруглений на концах полок к толщине полки профиля равно:

$$\frac{r}{d} = \frac{2,7}{8,0} \approx 0,35.$$

Для этого же профиля отношение радиуса закругления внутреннего угла при вертикальной оси калибра к толщине полки профиля:

$$\frac{R}{d} = \frac{8,0}{8,0} = 1,0.$$

Полученные отношения  $\frac{r}{d}$  и  $\frac{R}{d}$  примем постоянными для всего рассматриваемого ряда калибров.

Таким образом, для чистового калибра:

$$r = 0,35d = 0,35 \cdot 9,8 = 3,4 \text{ мм;}$$

Таблица 19

при прокатке на стане  $D = 470 \text{ мм}$

полоса			Калибр						
$\frac{d^2}{\omega}$	$d$	$B$	$h$	$b$	$b_3$	$\beta$	$R$	$r$	$R'$
—	7,45	64,5	—	91,2	—	$\infty$	8,0	2,7	0
0,085	9,8	33	13,8	93,8	93,0	33	10	3,4	0
0,120	13,6	32	19,3	90,6	89,2	32	14	4,8	0
0,25	23,6	29,5	28,8	85,5	82,0	29,5	24,0	8,2	7,0
0,50	40,6	30,2	42,6	73,2	69,2	30,2	30	14,2	10
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

$$R = 1,0d = 1,0 \cdot 9,8 = 9,8 \text{ мм.}$$

Радиус закругления наружного угла при вертикальной диагонали четвертого и третьего калибра примем равным нулю, что, как уже указывалось, необходимо для лучшего выполнения угла. Таким образом, в четвертом калибре

$$R_1 = 0.$$

Выпуск калибра примем равным 4%, т. е.

$$\Delta = 0,04d = 0,04 \cdot 9,8 = 0,4 \text{ мм.}$$

Таким образом, ширина в закрытой части калибра:

$$b_3 = b - 2\Delta = 93,8 - 2 \cdot 0,4 = 93,0 \text{ мм.}$$

Теперь без труда можно осуществить построение калибра.

Для этого сначала вычерчивают «скелет» его, потом намечают выпуски и, наконец, показывают радиусы закруглений и линии разъема валков. Четвертый калибр изображен на рис. 168 (второй снизу).

Определение размеров и построение остальных калибров (третьего, второго и первого) производится аналогичным путем. Результаты вычислений сведены в табл. 19, а калибры изображены на рис. 168.

## ЛИТЕРАТУРА

1. И. П. Бардин и Н. П. Банний. Черная металлургия в новой пятилетке. Издание АН СССР, 1947.
2. В. Е. Грум-Гржимайло. Прокатка и калибровка. Кубуч, 1933.
3. И. М. Павлов. Теория прокатки и основы пластической деформации металлов. М., ГОНТИ, 1938.
4. А. П. Виноградов и Г. А. Виноградов. Калибровка прокатных валков. Металлургиздат, 1950.
5. А. П. Чекмарев. — ДОМЕЗ, 1934, № 6.
6. А. Ф. Головин. Прокатка, ч. III. Калибровка, ОНТИ, 1936.
7. Б. П. Бахтинов и М. М. Штернов. Калибровка балок и швеллеров. М., Металлургиздат, 1950.
8. С. И. Губкин. Теория обработки металла давлением. Металлургиздат, 1947.
9. А. Ф. Головин. Прокатка, ч. II, ОНТИ, Свердловск — Москва — Ленинград, 1934.
10. А. Ф. Головин. Прокатка, ч. I. ОНТИ, Свердловск — Москва — Ленинград, 1933.
11. Жез. Калибровка валков при прокатке железа и стали. Издание Техника и производство, 1929.
12. С. А. Кушакевич. Применение сверхобжатий при прокатке. — Металлург, 1939, № 10—11.
13. Н. М. Федосов. О прокатке легированных сталей при больших обжатиях. — Металлург, 1940, № 8.
14. Ю. М. Чижигов. Оценка пластичности металлов и сплавов применительно к условиям горячей обработки давлением. — Заводская лаборатория, 1949, № 2.
15. Ю. М. Чижигов. Новый метод определения пластичности. — Заводская лаборатория, 1948, № 5.
16. Н. Мец. Горячая прокатка и калибровка валков. ОНТИ, 1937.
17. Г. В. Логинов. Законы калибровки черновых фасонных профилей. Сборник трудов Московского института стали, Вып. XVI. Оборонгиз, 1940.
18. В. С. Смирнов. Рациональная калибровка овальных и квадратных ручьев. Сб. Труды Уральского индустриального института им. С. М. Кирова. Вып. Девятнадцатый. Металлургиздат, 1944.
19. И. Я. Тарновский. Основы расчета калибровки для прокатки простых сортовых профилей. Учебное пособие Свердловск, 1950.
20. Ю. М. Чижигов. — Закономерности уширения при прокатке и анализ формул для его определения, Сталь, 1948, № 11.
21. М. И. Золотников. — Металлург, 1934, № 6.
22. Б. П. Бахтинов. — Некоторые вопросы теории прокатки. Сталь, 1946, № 4—5.
23. И. Я. Тарновский. Основы деформации при ковке и прокатке. Учебное пособие по курсу «Обработка металлов давлением». Свердловск, 1947.
24. П. А. Александров, В. А. Писанко и С. Т. Богатырев. Рационализация калибровок валков сортовых прокатных станков. ОНТИ, 1938.
25. Ю. М. Чижигов. Прокатка и ковка высоколегированных сталей. Металлургиздат, М., 1941.
26. В. Семков. — Новости техники, 1940, № 19.
27. А. П. Чекмарев и др. Курс прокатки в сжатом виде. ОНТИ, 1936.
28. М. Л. Зарошинский. Прокатка стали, Металлургиздат, 1948.
29. Б. П. Бахтинов. — Сталь, 1940, № 4.
30. Д. И. Старченко. — Теория и практика металлургии, 1937, № 7.
31. Д. И. Старченко. — Теория и практика металлургии, 1938, № 2.