А. П. ЧЕКМАРЕВ, М. С. МУТЬЕВ, Р. А. МАШКОВЦЕВ

# КАЛИБРОВКА ПРОКАТНЫХ ВАЛКОВ

А. П. ЧЕКМАРЕВ, М. С. МУТЬЕВ, Р. А. МАШКОВЦЕВ

# КАЛИБРОВКА ПРОКАТНЫХ ВАЛКОВ

*Допущено*
*Министерством высшего и среднего специального образования СССР*
*в качестве учебного пособия*
*для студентов вузов,*
*обучающихся по специальности*
*«Обработка металлов давлением»*

ИЗДАТЕЛЬСТВО «МЕТАЛЛУРГИЯ»
Москва 1971

УДК 621.771.07.8 (075.8)

**Калибровка прокатных валков.** Чекмарев А. П., Мутьев М. С., Машковцев Р. А. Учебное пособие для вузов. Изд-во «Металлургия», 1971, 512 с.

В книге изложены методы калибровки валков для прокатки простых и фасонных профилей, приводятся примерные расчеты калибровок. Приведены литературные данные и практические калнбровки, применяемые на прокатных станах наших передовых металлургических заводов.

Предназначен для студентов высших учебных заведений по специальности «Обработка металлов давлением» и может быть использован нженерно-техническими работникамн металлургических заводов, научно-исследовательских институтов и проектных организаций. Илл. 235. Табл. 91. Бнбл. 48 назв.

3—12—3
53—71

# ОГЛАВЛЕНИЕ


Предисловие . . . . . 5

Глава I. **Основные положения калибровки прокатных валков** . . . . 7

1. Требования, предъявляемые к калибровке валков . . . . . 7
2. Элементы калибра . . . . . 8
3. Расположение калибров на валках . . . . . 9
4. Типы и формы калибров . . . . . 12
5. Системы вытяжных калибров и их характеристика . . . . . 13
6. Определение нейтральной линии калибра . . . . . 40
7. Определение среднего катающего диаметра при прокатке в калибрах . . . . . 51
8. Основные принципы калибровки валков . . . . . 59

Глава II. **Калибровка валков блюминга и расчет режима обжатий** . . 62

1. Краткая характеристика блюмингов . . . . . 62
2. Схемы прокатки и порядок кантовки на блюминге . . . . . 65
3. Углы захвата при прокатке на блюминге . . . . . 68
4. Определение уширения при прокатке на блюминге . . . . . 72
5. Методика расчета режима обжатий на блюминге . . . . . 70
6. Построение калибров и размещение их на валках . . . . . 83
7. Определение скоростного режима и производительность блюминга . . . . . 87

Глава III. **Прокатка и калибровка валков непрерывных заготовочных станов** . . . . . 102

1. Характеристика непрерывных заготовочных станов . . . . . 102
2. Принцип расчета калибровки непрерывных заготовочных станов . . . . . 105
3. Конструирование и расположение калибров на валках непрерывных заготовочных станов . . . . . 111
4. Расчет калибровки валков непрерывных заготовочных станов . . 115

Глава IV. **Калибровка валков заготовочных станов и обжимных клетей трио** . . . . . 157

1. Характеристика заготовочных станов и обжимных клетей трио 157
2. Калибровка валков заготовочных станов и обжимных клетей трио . . . . . 159

Глава V. **Прокатка и калибровка круглой стали** . . . . . 177

1. Способы прокатки и калибровки круглой стали . . . . . 177
2. Метод расчета калибровки круглой стали . . . . . 179
3. Прокатка и калибровка круглой стали на непрерывных станах . . 181
4. Прокатка и калибровка круглой стали на линейных станах . . . 202
5. Прокатка и калибровка катанки на проволочных станах . . . . 220
6. Прокатка и калибровка периодических профилей арматурной стали . . . . . 235
7. Прокатка и калибровка круглых профилей из легированных сталей . . . . . 236
8. Прокатка и калибровка круглой стали на трубозаготовочных станах . . . . . 239

Глава VI. **Прокатка и калибровка квадратной стали** . . . . . 254
1. Способы прокатки квадратной стали . . . . . 254
2. Ход расчета калибровки квадратной стали . . . . . 254
3. Прокатка квадратной стали на непрерывном стане . . . . . 261

Глава VII. **Прокатка и калибровка полосовой стали** . . . . . 265
1. Способы прокатки полосовой стали . . . . . 265
2. Прокатка полосы в закрытых калибрах на линейных станах . 266
3. Прокатка полосы на гладкой бочке с ребровым калибром . . .
4. Калибровка для непрерывной прокатки полосы и штрипсов . 277

Глава VIII. **Прокатка и калибровка угловой стали** . . . . . 283
1. Способы прокатки и калибровки угловой стали . . . . . 283
2. Расчет калибровки уголка . . . . . 285
3. Прокатка и калибровка угловой стали на непрерывных станах 318

Глава IX. **Прокатка и калибровка двутавровых балок** . . . . . 326
1. Характеристика профиля . . . . . 326
2. Способы прокатки двутавровых балок . . . . . 327
3. Деформация металла в балочных калибрах . . . . . 329
4. Число проходов в фасонных калибрах . . . . . 336
5. Уширение при прокатке балок . . . . . 337
6. Определение утяжки, приращения высоты и толщины фланцев . 339
7. Определение размеров разрезных калибров и исходной заготовки . . . . . 344
8. Конструирование и расположение калибров на валках . . . . 350
9. Методы расчета калибровок двутавровых балок . . . . . 355
10. Заводская калибровка двутавровой балки № 45 . . . . . 372
11. Прокатка и калибровка широкополочных и облегченных балок . . . . . 376

Глава X. **Прокатка и калибровка швеллеров** . . . . . 383
1. Характеристика профиля . . . . . 383
2. Способы прокатки швеллеров . . . . . 385
3. Методы расчета калибровки швеллеров . . . . . 387
4. Основы расчета калибровки швеллеров . . . . . 390
5. Развернутая калибровка швеллеров . . . . . 406

Глава XI. **Прокатка и калибровка железнодорожных рельсов** . . . . 409
1. Способы прокатки железнодорожных рельсов . . . . . 409
2. Методы расчета калибровки железнодорожных рельсов . . . 415

Глава XII. **Прокатка и калибровка специальных профилей** . . . . . 456
1. Особенности прокатки и калибровки специальных профилей . . 456
2. Прокатка и калибровка штанцевой полосы . . . . . 460
3. Прокатка и калибровка лемешной полосы . . . . . 461
4. Прокатка и калибровка подкладки для железнодорожных рельсов . . . . . 462
5. Прокатка и калибровка накладки изолирующих стыков к железнодорожным рельсам . . . . . 464
6. Прокатка и калибровка зетовой стали . . . . . 466
7. Прокатка и калибровка оконно-рамных профилей . . . . . 467
8. Прокатка и калибровка автообода . . . . . 471
9. Прокатка и калибровка бортового кольца . . . . . 475
10. Прокатка и калибровка тавровых профилей . . . . . 477
11. Прокатка и калибровка полособульбовых профилей . . . . . 481
12. Прокатка и калибровка шахтной стойки . . . . . 484
13. Прокатка и калибровка шпунтовых свай . . . . . 488
14. Продольная прокатка и калибровка периодических профилей . . . . . 492

Литература . . . . . 507

# ПРЕДИСЛОВИЕ

Новым пятилетним планом развития народного хозяйства СССР на 1971—1975 гг. предусмотрен дальнейший рост выпуска металла для обеспечения машиностроения, строительства, транспорта, сельского хозяйства и других отраслей народного хозяйства страны. К концу пятилетки годовое производство должно составить: 142—150 млн. *т* стали и до 101—105 млн. *т* готового проката.

Около 90% выплавляемой на металлургических заводах стали поступает в прокатные цехи для изготовления сортовых изделий (круглой, квадратной, полосовой, угловой стали, балок, швеллеров и других профилей), листов, рельсов, труб и пр. В новой пятилетке большое внимание уделяется повышению качества проката, расширению его сортамента и экономии металла.

Для решения поставленных перед прокатным производством задач требуется дальнейшее усовершенствование технологического процесса прокатки и прокатного оборудования. Основой технологии сортопрокатного производства является деформация металла в валках с различными калибрами. Вопросы прокатки в калибрах составляют предмет отдельной дисциплины «Калибровка прокатных валков».

В задачу калибровки входит определение формы и размеров калибров, которые растачивают на валках для получения различных прокатных изделий. От того, насколько правильно выбрана калибровка валков, зависят размеры и качество поверхности получаемого готового профиля, который должен отвечать требованиям технических условий и ГОСТов.

При разработке калибровки валков необходимо учитывать особенности деформации металла в калибрах, с тем чтобы избежать образования больших внутренних напряжений в прокатываемом металле и готовом профиле и обеспечить равномерный и минимальный износ калибров.

Калибровка должна удовлетворять требованиям механизации и автоматизации прокатного производства, способствовать улучшению условий труда, а также обеспечить высокую производи-

тельность прокатного стана при минимальном расходе энергии и равномерном распределении нагрузки по клетям.

В соответствии с учебной программой курса «Калибровка прокатных валков» изложены общие положения калибровки прокатных валков.

Рассмотрены особенности прокатки различных профилей, методы расчета калибровок, построение калибров и монтаж их на валках. Даны примерные расчеты калибровок профилей, прокатываемых на блюмингах, заготовочных станах, рельсобалочных, сортовых и проволочных станах. С учетом сортамента указанных станов рассмотрены калибровки для прокатки блюмов, заготовок, круглой, квадратной, полосовой и угловой сталей, двутавровых балок, швеллеров и рельсов. Кроме того, рассмотрены особенности прокатки и калибровки специальных изделий — тавровых и оконнорамных профилей, зетовой стали, автообода, шпунтов, периодических и других профилей.

Для обеспечения требуемого качества изделий и высокой производительности прокатных станов в основу расчетов калибровок положены условия соблюдения максимально возможной равномерности деформации в калибрах, а также допускаемые коэффициенты вытяжки и углы захвата в соответствии с опытом передовых заводов. С целью упрощения расчетов авторами предложены графики для определения углов захвата, коэффициентов вытяжки и уширения в калибрах.

При создании книги авторы использовали свой многолетний опыт чтения лекций по калибровке прокатных валков студентам Днепропетровского металлургического института, а также результаты исследований, опубликованные в отечественной и зарубежной литературе.

Авторы выражают признательность В. Л. Романченко, О. П. Носенко, В. Н. Гринавцеву и О. Е. Кацубе за помощь, оказанную при подготовке и оформлении рукописи.

Отзывы и замечания по книге будут приняты авторами с благодарностью.

Глава I

# ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ КАЛИБРОВКИ ПРОКАТНЫХ ВАЛКОВ

## 1. ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К КАЛИБРОВКЕ ВАЛКОВ

Сортовой и фасонный прокат, т. е. простые и сложные профили, прокатывают в валках с врезами, называемыми ручьями.

Врезы двух или более валков при их положении во время прокатки составляют калибр. Таким образом, калибр — это просвет, образованный ручьями в вертикальной плоскости, проходящей через оси валков.

*Калибровкой прокатных валков* называется определение формы, размеров и числа калибров, размещаемых на валках для получения готового профиля по рассчитанному режиму обжатий.

На сортовых станах, как правило, дают по одному проходу в каждом калибре. На блюмингах и обжимных станах изменением расстояния между валками можно вести прокатку в одном калибре за несколько проходов.

Рациональная калибровка (или расчет режима обжатий) должна обеспечивать:

1) необходимый по размерам профиль в пределах допускаемых отклонений (допусков);

2) хорошее качество проката — отсутствие заусенцев, закатов, трещин, вредных напряжений в металле;

3) максимальную производительность стана за счет минимального числа проходов (калибров) и рационального распределения их по клетям;

4) плавный и надежный захват металла валками;

5) минимальный расход энергии и равномерную нагрузку двигателя по проходам;

6) минимальные износы калибров, парк валков и расход их на тонну готового проката, максимальный срок службы прокатных валков;

7) удобное обслуживание стана при прокатке и возможность его механизации и автоматизации.

Для удовлетворения указанных требований необходимо иметь:

1) металл хорошего качества без наружных пороков (трещин, пузырей и плен);

2) оптимальную температуру нагрева металла и равномерный прогрев его при минимальном количестве окалины;

3) необходимую жесткость рабочих клетей стана и правильную настройку валков.

## 2. ЭЛЕМЕНТЫ КАЛИБРА

На рис. 1 приведен симметричный прямоугольный калибр, основными размерами которого являются высота $h$ и ширина $b$ по дну калибра.

Так как калибр всегда имеет выпуски, т. е. уклоны боковых стенок, то ширина калибра у буртов $B$ больше ширины по дну калибра $b$.

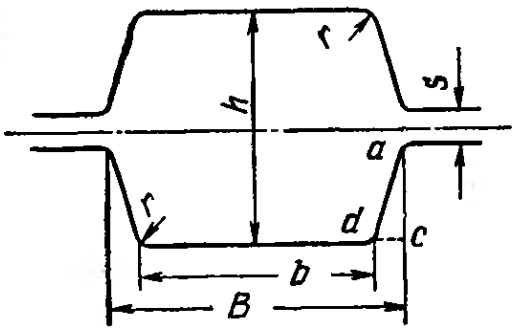



Рис. 1. Прямоугольный (ящичный) калибр и его элементы:

Между валками (буртами) имеется зазор или разъем $s$, величина которого принимается с учетом «игры», или «пружины» (упругого перемещения) валков в момент прокатки. Таким образом, зазор $s$ состоит из двух составляющих — просвета между валками при отсутствии прокатки $s_0$ и «игры» валков во время прокатки $s_{пр}$, так что

$$s = s_0 + s_{пр}.$$

Зазор принимают в зависимости от диаметра валков равным

$$s = (0{,}005 \div 0{,}008)\, D \ мм,$$

что составляет обычно 1—10 *мм*.

Боковые стенки калибра имеют уклон или выпуск, который представляет собой отношение $\frac{dc}{ac} \cdot 100\%$. Уклон делают для облегчения задачи полосы и выхода ее из валков, а также чтобы сохранить первоначальными размеры калибра после переточки (рис. 2). Уклон может составлять 1—10% и больше. В ящичных калибрах применяют также двойные уклоны боковых стенок, обеспечивающие защемление прокатываемой полосы по дну калибра с одновременным простором на уширение у зазора.

Калибр по углам обычно имеет закругления. Это делают для того, чтобы исключить возможность концентрации напряжений в валках, а в самой прокатываемой полосе отсутствовали бы острые углы, которые могут приводить к закатам и трещинам из-за разрывов острых кромок полосы, имеющих более низкую температуру и пониженную пластичность.

Для прямоугольного калибра радиус закругления по дну калибра составляет примерно $r \approx (0{,}1 \div 0{,}15)\, h \ мм$. У буртов калибра радиус закругления берут обычно равным величине зазора между валками.

Для ромбических и квадратных калибров наличие несколько повышенного радиуса закругления буртов (у разъема калибра) дает возможность сделать более широкий калибр, обеспечивая этим простор на уширение и устранение переполнения калибра и образования заусенцев.

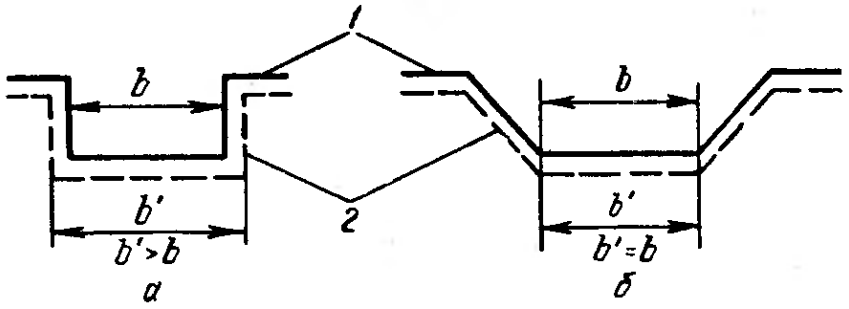



Рис. 2. Схема переточки калибров:

*а* — без уклона боковых стенок; *б* — с уклоном боковых стенок; *1* — до переточки; *2* — после переточки

Выбором соответствующих радиусов закругления у буртов и у вершины квадратных и ромбических калибров можно регулировать высоту и ширину последних при обеспечении простора

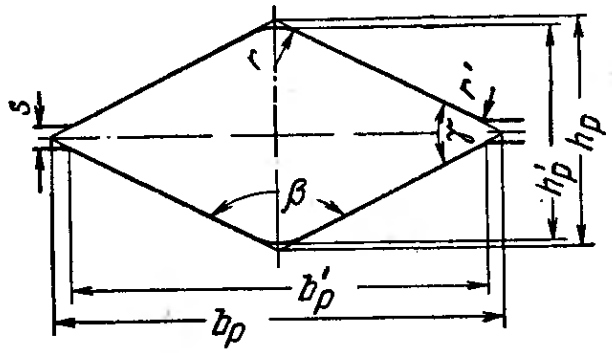



Рис. 3. Построение ромбического калибра

на уширение и прокатки без заусенцев. Поэтому в квадратных и ромбических калибрах различают геометрические размеры, а также фактические размеры с закруглениями (рис. 3).

### 3. РАСПОЛОЖЕНИЕ КАЛИБРОВ НА ВАЛКАХ

При выборе расположения калибров на валках необходимо исходить из основного размера — диаметра валков стана (клети) $D$, представляющего собой расстояние между осями верхнего и нижнего валков в нормальном их положении при прокатке (рис. 4). Диаметр валков стана является также средним начальным диаметром верхнего и нижнего валков:

$$D = \frac{D_в + D_н}{2}.$$

*Начальные диаметры* — это воображаемые диаметры валков, окружности которых соприкасаются между собой; в начальный диаметр валка входит и величина зазора $s$.

Следовательно: $D_в = D_{б.в} + s$;

$$D_н = D_{б.н} + s,$$

где $D_{б.в}$ и $D_{б.н}$ — диаметры верхнего и нижнего валков по буртам калибра.

Различают, кроме того, диаметры по дну калибра $D_{к.в}$ и $D_{к.н}$. Линия соприкосновения начальных диаметров называется *линией прокатки*.

Для симметричных прямоугольных, квадратных, ромбических, овальных и круглых калибров горизонтальная ось симметрии совпадает с линией прокатки при расположении калибров на валках. Ось симметрии таких калибров называется *нейтральной линией* калибра; она делит калибр на две части так, чтобы обеспечить прямолинейный выход полосы из калибра.

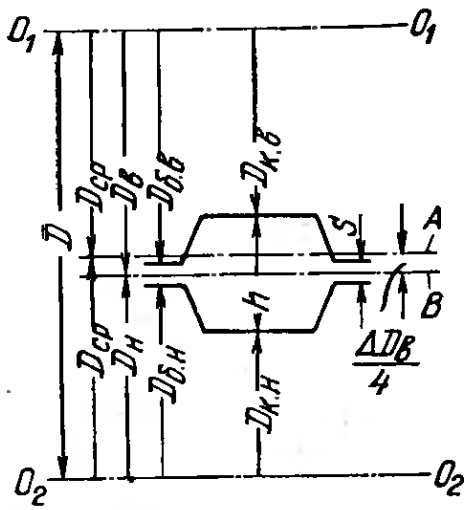



Рис. 4. Расположение калибров на валках:

$O_1O_1$ и $O_2O_2$ — оси верхнего и нижнего валков; $A$ — средняя линия валков; $B$ — линия прокатки

Как правило, начальные диаметры валков неодинаковы. На сортовых станах применяют *верхнее давление*, т. е. начальный диаметр верхнего валка берут несколько больше начального диаметра нижнего валка $\Delta D_в = D_в - D_н$. Верхнее давление обеспечивает изгиб прокатываемого профиля вниз на проводку, поэтому отпадает необходимость устанавливать за валком верхнюю проводку.

При прокатке фасонных профилей бóльший диаметр, т. е. верхнее или нижнее давление, принимают для того валка, в котором врезана закрытая часть калибра.

Верхнее давление $\Delta D_в$ составляет 1—3 *мм* на мелкосортных станах и доходит до 10 *мм* на крупносортных станах.

На блюмингах применяют *нижнее давление* $\Delta D_в = D_н - D_в$, составляющее 10—15 *мм*. Нижнее давление создает некоторый изгиб выходящего из калибра раската вверх, что предохраняет рольганг от ударов.

Как видно из рис. 4, *по средней линии валков*, делящей расстояние между осями валков пополам, начальные диаметры одинаковы и равны диаметру валков стана:

$$D_{ср} = \frac{D_в + D_н}{2} = D.$$

При верхнем давлении $\Delta D_в = D_в - D_н$ линия прокатки располагается на $\Delta D_в/4$ ниже средней линии валков, так как

$$\frac{D_в}{2} = \frac{D_{ср}}{2} + \frac{\Delta D_в}{4}, \quad \frac{D_н}{2} = \frac{D_{ср}}{2} - \frac{\Delta D_в}{4},$$

откуда

$$D_в - D_н = \Delta D_в.$$

При нижнем давлении $\Delta D_н$ линия прокатки располагается на $\Delta D_н/4$ выше средней линии валков.

Так как калибр располагается на линии прокатки, то можно обойтись без построения вспомогательной средней линии валков, имея в виду, что

$$D_в = D + \frac{\Delta D_в}{2};$$

$$D_н = D - \frac{\Delta D_н}{2},$$

где $D$ — расстояние между осями валков, т. е. диаметр валков стана.

Следовательно, зная диаметр валков стана $D$ и верхнее давление $\Delta D_в$, можно определить начальные диаметры верхнего и нижнего валков.

*Пример*

Диаметр валков стана (расстояние между осями валков) равен $D = 600$ *мм*. Верхнее давление $\Delta D_в = 10$ *мм*. Необходимо определить начальные диаметры валков.

Имеем

$$D_в = D + \frac{\Delta D_в}{2} = 600 + \frac{10}{2} = 605 \text{ мм};$$

$$D_н = D - \frac{\Delta D_в}{2} = 600 - \frac{10}{2} = 595 \text{ мм};$$

$$\Delta D_в = D_в - D_н = 605 - 595 = 10 \text{ мм}.$$

Зная начальные диаметры, проводим на чертеже линию прокатки, которая располагается от оси верхнего валка на расстоянии

$$\frac{D_в}{2} = \frac{605}{2} = 302{,}5 \text{ мм}$$

и от оси нижнего валка на расстоянии

$$\frac{D_н}{2} = \frac{595}{2} = 297{,}5 \text{ мм}.$$

При проверке получим

$$D = \frac{D_в}{2} + \frac{D_н}{2} = 302{,}5 + 297{,}5 = 600 \text{ мм}.$$

На линии прокатки наносят зазор $s$ (см. рис. 4). Для несимметричных калибров зазор (разъем) валков не связан с линией прокатки, а зависит от глубины ручья (вреза калибра) в верхний или нижний валок.

## 4. ТИПЫ И ФОРМЫ КАЛИБРОВ

По назначению различают следующие калибры. *Обжимные калибры* служат для уменьшения сечения раската, чтобы получить заготовку, пригодную для прокатки на сортовых станах. Обжимные калибры — обычно прямоугольной формы, применяют на блюмингах, обжимных и заготовочных станах, а также в обжимных клетях сортовых станов.

*Черновые калибры* необходимы, чтобы постепенно подготовить из заготовки требуемый профиль; их располагают в черновых

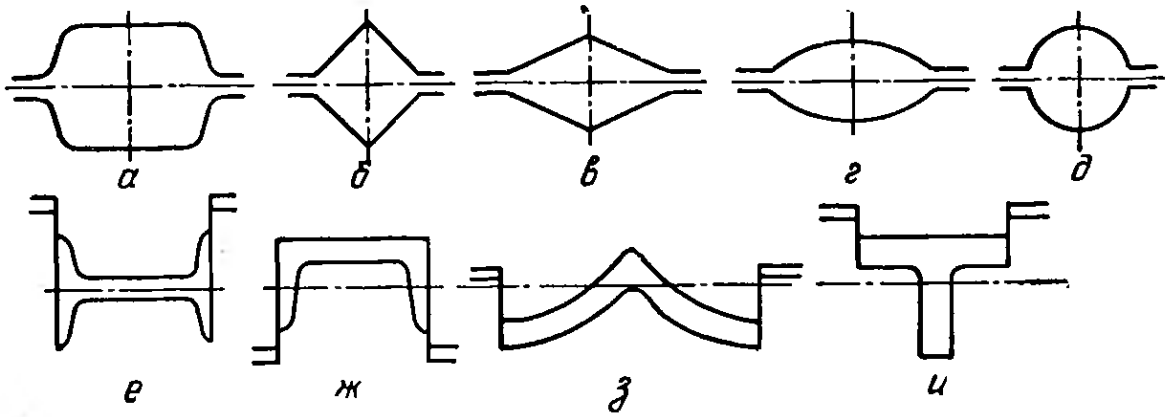



Рис. 5. Формы калибров

клетях стана. К черновым калибрам относятся *вытяжные калибры* систем овал—квадрат, ромб—квадрат, овал—ребровый овал, которые предназначены для дальнейшего уменьшения сечения раската.

*Предчистовые калибры* позволяют получить такие форму и размеры раската, чтобы в следующем чистовом калибре обеспечить необходимые размеры готового профиля.

*Чистовые калибры* выпускают готовый прокат горячих размеров (с учетом усадки металла при охлаждении).

По форме калибры бывают прямоугольные, квадратные, ромбические, овальные, круглые (рис. 5, *а—д*) и фасонные (рис. 5, *е—и*).

Фасонные черновые калибры имеют форму, постепенно приближающуюся к готовому прокату.

По расположению в валках различают открытые и закрытые калибры.

*Открытые калибры* образуются врезами в двух валках, причем боковые стенки калибра образуются двумя буртами. Разъем валков (зазор) в простых калибрах образуется примерно посередине

высоты калибра (рис. 6, *а*). В открытых фасонных калибрах боковые грани раската могут ограничиваться стенками калибра (буртами), врезанными в одном валке или в двух валках (рис. 6, *б*, *в*) с разъемом, находящимся в пределах калибра.

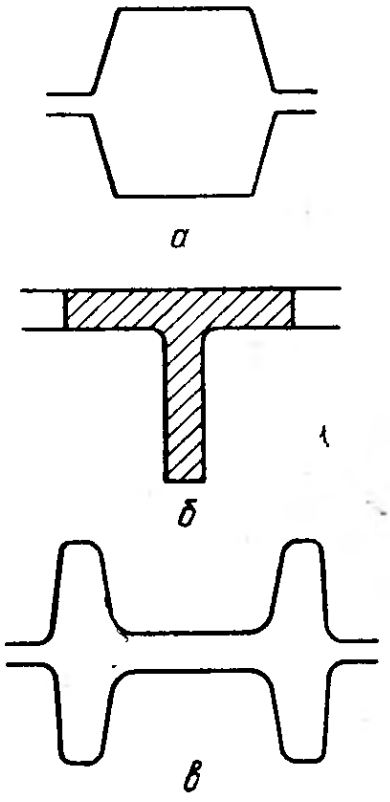



Рис. 6. Открытые калибры:

*а* — ящичный; *б* — тавровый; *в* — разрезной балочный

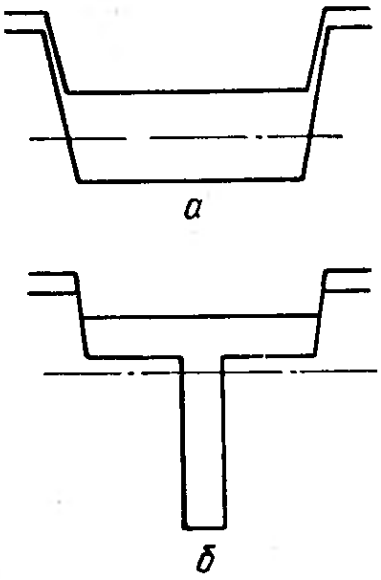



Рис. 7. Закрытые калибры:

*а* — ящичный; *б* — тавровый

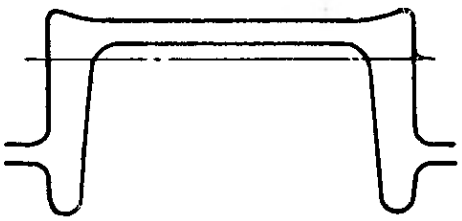


Рис. 8. Полузакрытый швеллерный калибр

*Закрытые калибры* образуются врезом на одном валке и выступом в другом (рис. 7). Боковые грани металла ограничиваются стенками калибра, врезанными в одном валке. В этом случае горизонтальный зазор между валками находится за пределами высоты калибра.

*Полузакрытые* калибры имеют разъем на боковых стенках, (рис. 8), в этом случае боковые грани фланцев обрабатываются двумя валками.

## 5. СИСТЕМЫ ВЫТЯЖНЫХ КАЛИБРОВ И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКА

Для уменьшения сечения прокатываемой полосы применяют вытяжные (черновые) калибры разнообразной формы. В зависимости от сечения, коэффициента вытяжки, диаметра валков стана применяют вытяжные калибры различной формы в определенной последовательности.

Серия чередующихся однотипных вытяжных калибров называется *системой калибров.*

Известны следующие системы вытяжных калибров: прямоугольные калибры, прямоугольник — гладкая бочка, овал—квадрат, ромб—квадрат, овал—ребровый овал, овал—круг, ромб—ромб, квадрат—квадрат, универсальная и смешанная системы.

### *Система прямоугольных (ящичных) калибров*

Эта система представляет собой ряд прямоугольных калибров, в которых прокатку ведут с целью уменьшения сечения раската с применением кантовок или без кантовок, если имеются клети с вертикальными валками (рис. 9). Такую систему применяют на блюмингах, непрерывных заготовочных станах, обжимных станах трио, обжимных клетях сортовых станов, в черновых группах непрерывных станов, а также в случае прокатки товарной заготовки на крупносортных и рельсобалочных станах [1].

Система прямоугольных калибров имеет следующие преимущества:

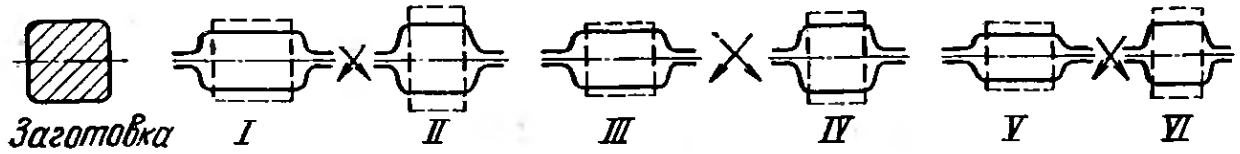



Рис. 9. Система прямоугольных калибров

1) малый врез в валках и возможность применять бóльшие обжатия без опасности поломок валков;

2) равномерное обжатие;

3) малый расход энергии в связи с ограниченным уширением и равномерным обжатием;

4) удобство механизации стана при задаче раската из калибра в калибр;

5) возможность прокатки в прямоугольных калибрах в несколько проходов путем изменения положения верхнего валка, как например на блюминге.

К недостаткам этой системы относятся:

1) опасность образования лампасов при переполнении калибров;

2) возможность перекоса раската, если ширина полосы значительно меньше ширины прямоугольного калибра;

3) невозможность получения в прямоугольных калибрах геометрически правильных квадратов из-за наличия уклонов боковых стенок.

---

[1] В последнем случае раскат кантуют после каждого прохода, а не через два прохода, как это показано на рис. 9.

При прокатке в прямоугольных калибрах большое значение имеют надежный захват, правильное определение уширения во избежание заусенцев или лампасов, а также правильный выбор ширины калибров для обеспечения устойчивости раската.

Углы захвата в прямоугольных калибрах принимают в широких пределах — от 20 до 30° и больше. В калибрах со стесненным уширением углы захвата можно принимать больше, чем при свободном уширении, например на гладкой бочке. Калибры с насечкой обеспечивают наиболее высокие углы захвата до 33° при малых скоростях прокатки.

Как показали исследования В. М. Клименко [1], прокатка с защемлением в прямоугольных калибрах позволяет значительно повысить углы захвата и, следовательно, обжатия при прокатке. Эксперименты показали, что при действии боковых сил трения при прокатке с защемлением угол захвата можно увеличить на 8—12°.

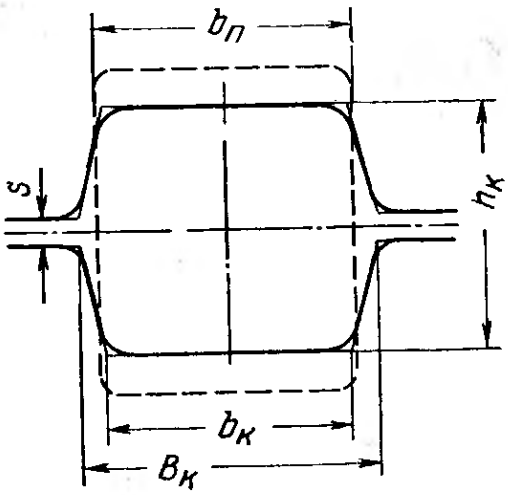



Рис. 10. Прокатка в прямоугольном калибре с защемлением

Однако следует иметь в виду, что при больших защемлениях (большой степени ограничения уширения) возможно переполнение калибра и образование заусенцев и лампасов.

Обычно рекомендуют следующие значения ширины по дну прямоугольного калибра в зависимости от ширины полосы (раската) $b_п$ (рис. 10):

$$b_к \approx (0{,}95 \div 1)\, b_п.$$

Причем металл не должен заполнять калибр на всю его ширину у зазора, т. е. ширина полосы после прокатки должна быть меньше величины $B_к$. В зависимости от размеров прямоугольного калибра можно принимать

$$b_п + \Delta b \approx B_к - (5 \div 10)\ мм.$$

Если в прямоугольном калибре делают несколько проходов, что имеет место при прокатке на блюминге без кантовки, то следует учитывать суммарное уширение $\sum \Delta b$:

$$b_п + \sum \Delta b \approx B_к - (5 \div 10)\ мм.$$

Поэтому имеют большое значение двойные выпуски (уклоны) в прямоугольных калибрах: у дна калибра выпуск составляет примерно 10—15%, у зазора и примерно до половины вреза в валки выпуск принимают равным до 20—25%, чтобы обеспечить простор на уширение.

[1] В. М. Клименко. В сб. трудов НТО ЧМ, т. 2. Днепропетровск, 1957, с. 69.

При расчете уширения в прямоугольном калибре следует учитывать защемление полосы. При прокатке со стесненным уширением можно принимать степень ограничения $k_{огр}$ равной 0,6—0,8 от свободного уширения. Ниже при расчетах уширения в открытых и закрытых прямоугольных калибрах конкретно указаны значения коэффициента ограничения $k_{огр}$.

Уширение в прямоугольных калибрах можно рассчитать по формуле А. П. Чекмарева [1]:

$$\Delta b = \frac{2b_{ср}\,\Delta h\,k_{огр}}{(H+h)\left[1+(1+\alpha)\left(\frac{b_{ср}}{R\alpha}\right)^{n}\right]}, \qquad (1)$$

где $H$ и $h$ — высота раската до и после прокатки;
$b_{ср}$ — средняя ширина очага деформации;
$\alpha$ — угол захвата;
$R\alpha$ — дуга захвата;
$n = 1$ при $b_{ср} < R\alpha$ — узкий очаг деформации;
$n = 2$ при $b_{ср} > R\alpha$ — широкий очаг деформации;
$k_{огр}$ — коэффициент ограничения, который колеблется в пределах 0,6—0,8 (при свободном уширении $k_{огр} = 1$).

Если ожидается небольшое уширение по сравнению с шириной полосы, например при прокатке на блюминге, то при расчете уширения по указанной формуле можно принимать вместо средней ширины начальную ширину $b_0$ или конечную $b$.

Для расчета свободного уширения можно пользоваться также формулой Б. П. Бахтинова [2], в которой, однако, не учитывается влияние ширины полосы:

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

где $H$ — начальная высота полосы;
$f$ — коэффициент трения.

Коэффициент трения определяется по формуле

$$f = k_1 k_2 k_3\,(1{,}05 - 0{,}0005t),$$

где $k_1$ — коэффициент, учитывающий состояние поверхности и материал валков;
$k_2$ — коэффициент, учитывающий влияние скорости прокатки;
$k_3$ — коэффициент, учитывающий влияние легирующих элементов в стали;
$t$ — температура прокатки, °С.

Для стальных шероховатых валков принимают $k_1 = 1$, для чугунных валков $k_1 = 0{,}8$.

Коэффициент $k_2$ можно определить по графику Б. П. Бахтинова [2].

Коэффициент $k_3$, согласно данным Ю. М. Чижикова [3], для различных сталей равен

| Сталь | $k_3$ |
|---|---|
| Углеродистые (Ст.1) | 1 |
| Ледебуритные (Р18) | 1,1 |
| Перлито-мартенситные (ШХ15, 38ХМЮА) | 1,24—1,30 |
| Аустенитные (Х13Н4Г9) | 1,40 |
| Ферритные (1Х17ЮА) | 1,55 |
| Аустенитные с карбидами (Х15Н60) | 1,60 |

При расчете уширения пользуются также формулой А. И. Целикова [4]:

$$\Delta b = 0{,}58 c_1 c_2 \left(\sqrt{R\Delta h} - \frac{\Delta h}{f}\right) \ln \frac{H}{h}, \qquad (3)$$

где $c_1$ и $c$ — коэффициенты, характеризующие влияние ширины и натяжения полосы.

При $\frac{b_0}{\sqrt{R\Delta h}} = 1;\ 2;\ 4;\ 8$ коэффициент $c_1$ равен соответственно 1,0; 0,75; 0,5; 0,4.

Коэффициент $c_2$ определяют по формуле

$$c_2 = 1 - \frac{\sigma_0}{\sigma_т},$$

где $\sigma_0$ — заднее натяжение;

$\sigma_т$ — истинный предел текучести.

Если система прямоугольных калибров характеризуется наличием ящичных квадратов (см. рис. 9), например в черновых группах непрерывных, зигзагообразных и шахматных станов, то в основу расчета принимают размеры квадратов, определяемые по вытяжкам, исходя из начального и конечного сечений заготовки.

Например, даны ящичные квадраты $c_1$ и $c_3$, необходимо определить размеры промежуточного прямоугольника $b_2 \times h_2$ (рис. 11).

Задавшись показателем уширения, нашли приближенные размеры промежуточного прямоугольника. После этого, уточнив его размеры, определяют уширение по формулам.

Для определения предварительных размеров прямоугольника воспользуемся равенствами (рис. 11):

$$h_2 = c_3 - k_3 (b_2 - c_3);$$
$$b_2 = c_1 + k_2 (c_1 - h_2),$$

откуда высота прямоугольника равна

$$h_2 = \frac{(1 + k_3) c_3 - (k_3 + k_2 k_3) c_1}{1 - k_2 k_3},$$

после чего определяем ширину $b_2$.

Показатели уширения $k_2$ и $k_3$ можно найти по данным для аналогичных калибровок; так для клетей черновых групп они составляют 0,25—0,3.

Если принять $k_2 = k_3 \approx 0{,}3$, то

$$h_2 = \frac{1{,}3c_3 - 0{,}39c_1}{0{,}91}.$$

Для определения промежуточного прямоугольника можно также предварительно задаться углом захвата, например $\alpha = 26°$, чему соответствует обжатие $\Delta h = 0{,}1D_к$.

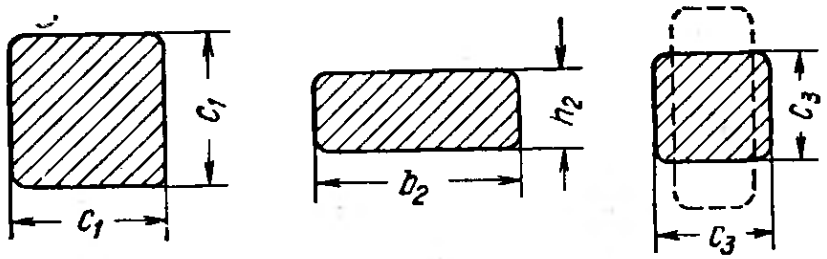



Рис. 11. Схема определения промежуточных прямоугольных сечений

В данном случае (рис. 11)

$$c_1 - h_2 = 0{,}1\,(D - h_2),$$

где $D$ — начальный диаметр валков.

Отсюда

$$h_2 = \frac{c_1 - 0{,}1D}{0{,}9}.$$

Находим затем уширение $\Delta b_2$ по формуле и ширину $b_2$.

Зная $h_2$ и $b_2$, корректируем размеры прямоугольника, чтобы он удовлетворял условиям захвата и уширения при прокатке его в следующем квадрате $c_3$.

### *Система прямоугольник—гладкая бочка*

По этой системе (рис. 12) прокатку ведут попеременно на гладкой бочке и в прямоугольных калибрах черновых групп непрерывных, зигзагообразных и шахматных станов. Эта система

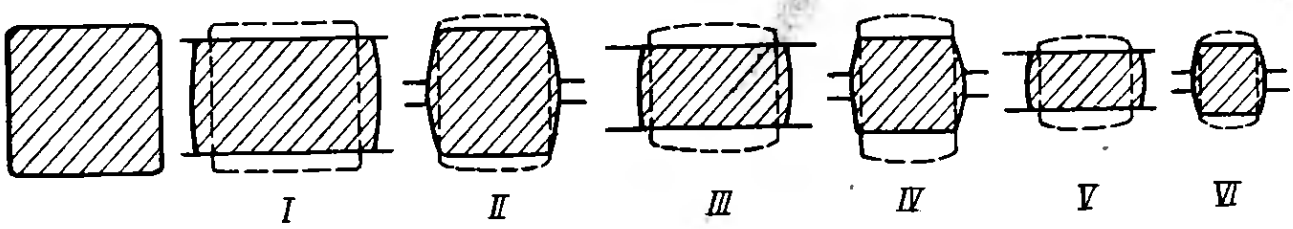



Рис. 12. Система калибров прямоугольник — гладкая бочка для прокатки черновых квадратов с кантовкой после каждого прохода

характеризуется универсальностью, поскольку за счет изменения раствора валков можно изменять обжатия на гладкой бочке и в прямоугольных калибрах, не требуется перевалок при пере-

ходе на другой профиль. Немаловажное значение имеет прокатка на гладких валках для удаления окалины с прокатываемой полосы.

Как видно из рис. 12, на гладкой бочке раскат имеет прямоугольную форму и после кантовки прокатывают в ящичном квадрате, далее идет гладкая бочка, после чего снова ящичный квадрат и т. д.

Возможно также применение подряд двух проходов на гладкой бочке, после чего прокатку осуществляют в прямоугольных ка-

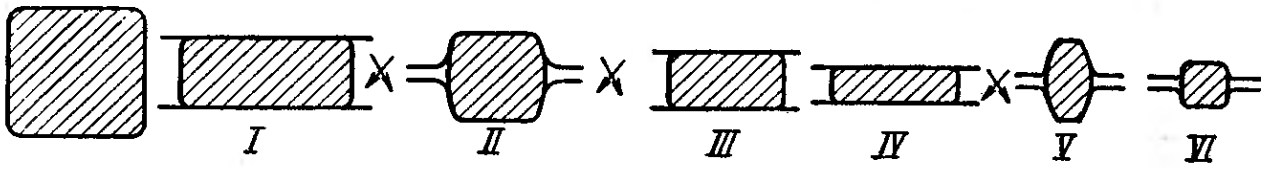



Рис. 13. Система калибров прямоугольник — гладкая бочка для прокатки черновых квадратов с кантовкой после двух проходов на гладкой бочке

либрах (рис. 13). По этому варианту для шести проходов требуется всего три кантовки, в то время как по предыдущей схеме (см. рис. 12) предусмотрено пять кантовок [1].

Углы захвата на гладкой бочке должны быть меньше, чем в прямоугольных калибрах, кроме того, здесь происходит свободное уширение. Таким образом, по интенсивности деформаций и вытяжек система прямоугольник—гладкая бочка уступает системе прямоугольных калибров, однако универсальность системы прямоугольник—гладкая бочка, сокращение перевалок и хорошее удаление окалины обеспечивают ей широкое применение.

Обжатия по системе прямоугольник—гладкая бочка рассчитывают аналогично расчету обжатий для системы прямоугольных калибров. При этом следует иметь в виду, что на гладкой бочке принимают свободное уширение, а максимально допустимые углы захвата будут меньше, чем в прямоугольных калибрах.

### *Система овал—квадрат*

Чередование черновых овальных и квадратных калибров широко применяют на мелкосортных и проволочных станах, где требуется за счет больших вытяжек уменьшить сечение прокатываемой полосы. Как видно из рис. 14, в овальный калибр квадратную полосу задают плашмя, а в квадратный калибр овальную полосу задают на ребро. Отношение размеров овальных калибров колеблется в пределах 1,1—3,5; обычно принимают $b/h = 2 \div 3$.

---

[1] Схема прокатки, приведенная на рис. 13, с точки зрения получения хорошего качества профиля является менее желательной.

Система черновых калибров овал—квадрат имеет следующие преимущества:

1. Возможно получение больших коэффициентов вытяжки, особенно в овальных калибрах. Вытяжки в овальных калибрах изменяются в пределах $\mu_{ов} = 1{,}3 \div 1{,}8$ и в отдельных случаях

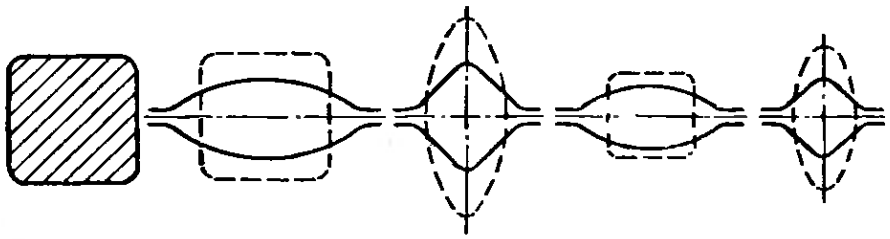


Рис. 14. Система калибров овал — квадрат

доходят до 2,0 и больше. Коэффициенты вытяжки в квадратных калибрах обычно бывают в пределах $\mu_{кв} = 1{,}2 \div 1{,}6$.

2. Удобная задача квадратной полосы в овальный калибр, что облегчает механизацию, например применение обводных аппаратов на линейных станах.

3. Малый врез овальных калибров.

4. При прокатке квадратной полосы в овальном калибре углы квадрата переходят на стороны овала, что благоприятно сказывается на удалении поверхностных дефектов.

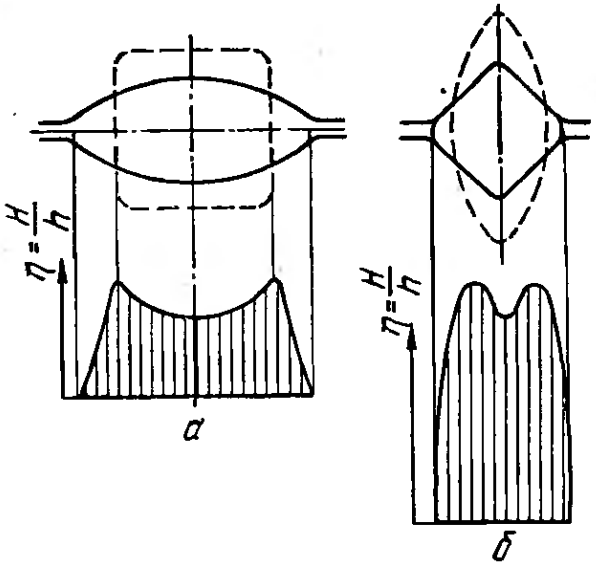



Рис. 15. Условия деформации:
*а* — в овальных; *б* — в квадратных калибрах

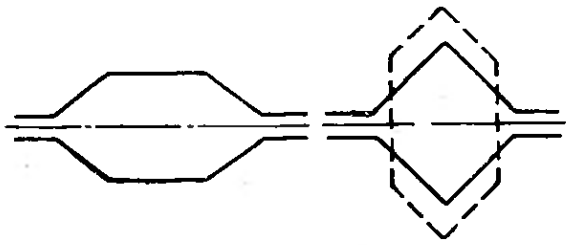


Рис. 16. Система калибров шестигранник— квадрат

Системе овал—квадрат присущи, однако, следующие недостатки:

1. Неустойчивость овальной полосы в квадратном калибре, в результате чего приходится применять тесные вводные пропуски.

2. Затруднительная установка обводных аппаратов при задаче овального раската в квадратный калибр.

3. Неравномерная деформация в овальном и квадратном калибрах (рис. 15). В овальном калибре за счет неравномерного обжатия получается вынужденное уширение боковых граней. В квадратном калибре неравномерное обжатие приводит к растяжению боковых ребер квадрата, что неблагоприятно сказывается на качестве металла.

4. Квадратные калибры, поскольку они врезаны по диагонали, при малых диаметрах валков заметно уменьшают их прочность.

Часто вместо крупных овалов применяют трапецеидальные (шестигранные) калибры, преимущество которых состоит в том, что обеспечивается хороший захват шестигранника квадратным калибром (рис. 16). Боковые грани такого шестигранника хорошо удерживаются линейками. Систему шестигранник—квадрат часто применяют в последних проходах обжимных клетей мелкосортных и проволочных станов линейного типа.

Применяют иногда овальные калибры с плоскими гранями. Такие овалы хорошо удерживаются при задаче в квадратные калибры (рис. 17). Возможны и другие формы овалов, например с вогнутыми гранями, эллипсовидный и др.

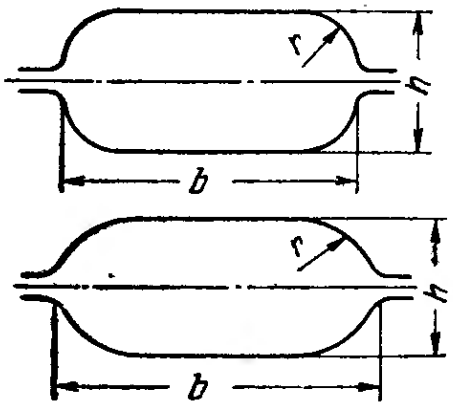



Рис. 17. Овальные калибры с плоскими гранями

При расчете черновых калибров системы овал — квадрат необходимо знать, какие вытяжки можно выбирать в овальных и квадратных калибрах. Коэффициент вытяжки в овальном калибре зависит от отношения $b_{ов}/h_{ов}$, показателя уширения $k_{ов}$ и среднего обжатия, равного

$$\Delta h_{ср} = c_1 - 0{,}74h_{ов},$$

где $0{,}74h_{ов}$ — приближенная средняя толщина овала;
$c_1$ — сторона задаваемого квадрата.

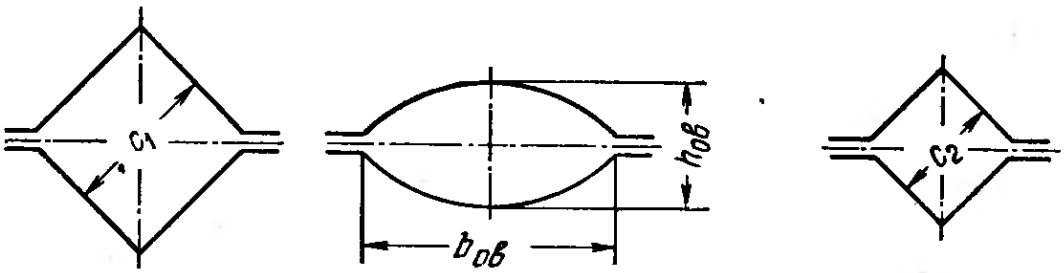



Рис. 18. Система калибров овал—квадрат

Пусть даны три калибра (рис. 18): квадрат со стороной $c_1$, овал размерами $b_{ов} \times h_{ов}$ и квадрат со стороной $c_2$.

Ширина промежуточного овального калибра равна

$$b_{ов} = c_1 + k_{ов}(c_1 - 0{,}74h_{ов}) = (1 + k_{ов})\,c_1 - 0{,}74k_{ов}h_{ов},$$

откуда

$$\frac{b_{ов}}{h_{ов}} = \frac{(1 + k_{ов})\,c_1 - 0{,}74k_{ов}h_{ов}}{h_{ов}}.$$

Если обозначить $\frac{b_{ов}}{h_{ов}}$ через $a$, то

$$h_{ов} = \frac{(1 + k_{ов})\, c_1}{a + 0{,}74 k_{ов}},$$

$$b_{ов} = a h_{ов} = \frac{a(1 + k_{ов})\, c_1}{a + 0{,}74 k_{ов}}.$$

Площадь овального калибра можно принять приближенно равной

$$q_{ов} \approx 0{,}74 h_{ов} b_{ов} = \frac{0{,}74 (1 + k_{ов})^2 a c_1^2}{(a + 0{,}74 k_{ов})^2}.$$

Площадь квадратного калибра с учетом закруглений

$$q_{кв} = 0{,}98 c_1^2.$$

Тогда коэффициент вытяжки в овальном калибре равен

$$\mu_{ов} = \frac{q_{кв}}{q_{ов}} = \frac{1{,}33 \left( \frac{b_{ов}}{h_{ов}} + 0{,}74 k_{ов} \right)^2}{\frac{b_{ов}}{h_{ов}} (1 + k_{ов})^2}. \qquad (4)$$

Из последнего выражения видно, что коэффициент вытяжки в овальном калибре зависит от отношения $b_{ов}/h_{ов}$ и показателя уширения $k_{ов}$.

В табл. 1 приведены коэффициенты вытяжки $\mu_{ов}$ в зависимости от $b_{ов}/h_{ов}$ и показателя уширения $k_{ов}$ [5], из которой видно, что чем больше $b_{ов}/h_{ов}$ и меньше $k_{ов}$, тем больший коэффициент вытяжки можно получить в овальном калибре.

Таблица 1

**Коэффициенты вытяжки $\mu_{ов}$ в овальном калибре [5]**

| $a = \frac{b_{ов}}{h_{ов}}$ | Значения $\mu_{ов}$ при разных значениях $k_{ов}$ | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 | 1,0 |
| 1,5 | 1,38 | 1,31 | 1,25 | 1,20 | 1,15 | 1,11 |
| 2,0 | 1,66 | 1,55 | 1,46 | 1,38 | 1,31 | 1,25 |
| 2,5 | 1,95 | 1,80 | 1,68 | 1,57 | 1,48 | 1,40 |
| 3,0 | 2,24 | 2,10 | 1,90 | 1,77 | 1,65 | 1,55 |
| 3,5 | 2,53 | 2,30 | 2,10 | 1,96 | 1,83 | 1,71 |

В случае применения больших квадратных калибров ($c_1 = 100 \div 50$ *мм*) при $k_{ов} \approx 0{,}5 \div 0{,}6$ и $b_{ов}/h_{ов} \approx 2$ коэффициент вытяжки составляет $\mu_{ов} = 1{,}65 \div 1{,}55$.

Для средних квадратных калибров ($c_1 = 50 \div 20$ *мм*) при $k_{ов} = 0{,}6 \div 0{,}8$ и $b_{ов}/h_{ов} = 2 \div 3$ коэффициент вытяжки изменяется в пределах $\mu_{ов} = 2 \div 1{,}4$.

Наконец, для малых квадратных калибров ($c_1 = 20 \div 7$ *мм*) показатель уширения составляет $k_{ов} = 0{,}8 \div 1{,}0$. Если принять $\frac{b_{ов}}{h_{ов}} = 2{,}5 \div 3{,}0$, то коэффициент вытяжки изменяется в пределах $\mu_{ов} = 1{,}7 \div 1{,}4$. Таким образом, для малых квадратных калибров ($c_1 < 20$ *мм*) получается небольшой коэффициент вытяжки вследствие большого показателя уширения.

Наибольшие коэффициенты вытяжки получают в средних квадратных калибрах ($c_1 = 50 \div 20$ *мм*) $\mu_{он} = 1{,}8 \div 1{,}6$ при $\frac{b_{ов}}{h_{ов}} \approx \approx 2{,}5$.

Ниже приведен расчет коэффициента вытяжки в квадратном калибре в зависимости от $a = \frac{b_{ов}}{h_{ов}}$ и $k_{кв} = \frac{\Delta b}{\Delta h_{ср}}$:

$$h_{ов} = b_{кв} - k_{кв}\,(b_{ов.\,ср} - h_{кв.\,ср}) = 1{,}29c_2 - k_{кв}\,(0{,}74b_{ов} - 0{,}76c_2) = (1{,}29 + 0{,}76k_{кв})\,c_2 - 0{,}74k_{кв}b_{ов};$$

$$\frac{b_{ов}}{h_{ов}} \doteq a = \frac{b_{ов}}{(1{,}29 + 0{,}76k_{кв})\,c_2 - 0{,}74k_{кв}b_{ов}},$$

откуда

$$b_{ов} = \frac{(1{,}29 + 0{,}76k_{кв})\,ac_2}{1 + 0{,}74ak_{кв}};$$

$$h_{ов} = \frac{b_{ов}}{a} = \frac{(1{,}29 + 0{,}76k_{кв})\,c_2}{1 + 0{,}74ak_{кв}}.$$

В этих выражениях $b_{кв} = 1{,}29c_2$ представляет собой ширину квадратного калибра с закруглениями при $r \approx 0{,}15c_2$ и средней высоте квадратного калибра, равной

$$h_{кв.\,ср} = \frac{0{,}98c^2}{1{,}29c} = 0{,}76c.$$

Площадь овального калибра

$$q_{ов} = 0{,}74b_{ов}h_{ов} = \frac{0{,}74\,(1{,}29 + 0{,}76k_{кв})^2\,ac_2^2}{(1 + 0{,}74ak_{кв})^2}.$$

Площадь меньшего квадратного калибра

$$q_2 = 0{,}98c_2^2.$$

Тогда коэффициент вытяжки в квадратном калибре равен

$$\mu_{кв} = \frac{q_{ов}}{q_2} = \frac{0{,}755\,\frac{b_{ов}}{h_{ов}}\,(1{,}29 + 0{,}76k_{кв})^2}{\left(1 + 0{,}74\,\frac{b_{ов}}{h_{ов}}\,k_{кв}\right)^2}. \qquad (5)$$

В табл. 2 приведены коэффициенты вытяжки в квадратном калибре для $\frac{b_{ов}}{h_{ов}} = 1{,}5 \div 3{,}5$ и $k_{кв} = 0{,}4 \div 0{,}7$.

При сравнении данных табл. 1 и 2 видно, что коэффициенты вытяжки в квадратных калибрах значительно меньше, чем в овальных. При $\frac{b_{ов}}{h_{ов}} = 2 \div 3$ вытяжка $\mu_{он} = 2{,}24 \div 1{,}25$ в овальных калибрах и $\mu_{кв} = 1{,}61 \div 1{,}15$ — в квадратных. В зависимости от

Таблица 2

**Коэффициенты вытяжки $\mu_{кв}$ в квадратном калибре**

| $a = \frac{b_{ов}}{h_{ов}}$ | Значения $\mu_{кв}$ при разных величинах $k_{кв}$ | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 |
| 1,5 | 1,38 | 1,31 | 1,24 | 1,19 |
| 2,0 | 1,52 | 1,39 | 1,29 | 1,21 |
| 2,5 | 1,58 | 1,42 | 1,29 | 1,19 |
| 3,0 | 1,61 | 1,42 | 1,27 | 1,15 |
| 3,5 | 1,62 | 1,40 | 1,23 | 1,11 |

показателей уширения $k_{ов}$ и $k_{кв}$ соотношение между указанными коэффициентами вытяжки можно представить в виде [5]:

$$\mu_{ов} \approx 1 + (1{,}8 \div 1{,}2)\,(\mu_{кв} - 1).$$

При определении предварительных размеров овальных калибров можно пользоваться средним соотношением коэффициентов вытяжки в овале и квадрате:

$$\mu_{ов} \approx 1 + 1{,}5\,(\mu_{кв} - 1), \qquad (6)$$

которое соответствует соотношению

$$\frac{b_{ов}}{h_{ов}} \approx 2{,}2 \div 2{,}7.$$

Следует отметить, что при выборе коэффициентов вытяжки в черновых калибрах (системы овал—квадрат, ромб—квадрат и др.) необходимо иметь в виду устойчивость полосы при прокатке, т. е. допускаемые деформации полосы без скручивания относительно продольной оси [6, 7]. Устойчивость полосы может оказаться лимитирующим фактором при определении коэффициентов вытяжки.

Расчет черновых калибров по системе овал—квадрат состоит в следующем [1].

По допускаемым углам захвата находим коэффициенты вытяжки в квадратных калибрах, используя графики зависимости $\mu_{кв}$ от угла захвата $\alpha$. Зная коэффициент вытяжки в квадрате, находим коэффициент вытяжки в большем овале (считая против хода прокатки), пользуясь указанным выше соотношением (6).

[1] Подробно расчет черновых калибров по этой системе на примере калибровки для круглых профилей даи в гл. V.

Находим таким путем вытяжки от квадрата к квадрату, корректируем размеры квадратов, после чего определяем размеры промежуточных овалов.

При определении высоты овала находим по графикам или по формулам уширение в овальных и квадратных калибрах, с тем чтобы обеспечить нормальное заполнение калибров во избежание

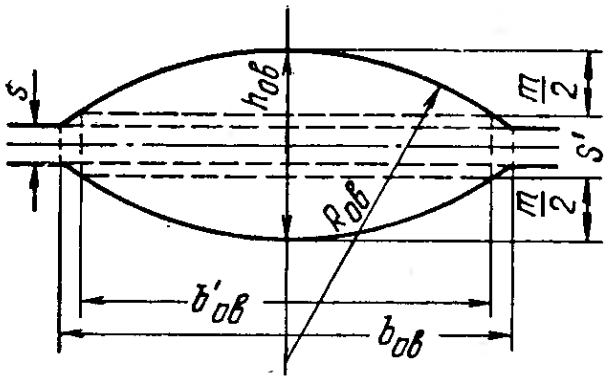



Рис. 19. Схема построения овального калибра

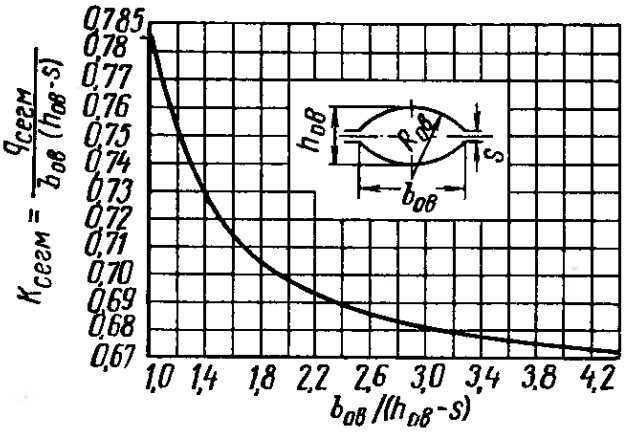



Рис. 20. К определению площади овалов

образования заусенцев. Поэтому размеры промежуточных овалов после определения уширения приходится корректировать.

Перейдем к определению площадей овальных и квадратных калибров.

Как видно из рис. 19, площадь овального калибра состоит из двух площадей — средней прямоугольной части $b_{ов}s$ и площади двух сегментов, равной приближенно

$$q_{сегм} \approx \frac{2}{3} b_{ов}(h_{ов} - s), = \frac{R_{об}^2}{2}\left(\frac{\pi\alpha}{180} - \sin\alpha\right)$$

следовательно, площадь овального калибра равна

$$q_{ов} = b_{ов}s + \frac{2}{3} b_{ов}(h_{ов} - s). \qquad (7)$$

Площадь овального калибра можно определить более точно, зная отношение $k_{сегм} = \frac{b_{ов}}{h_{ов} - s}$, соответственно чему изменяется коэффициент $k_{сегм}$ для площади сегмента (рис. 20):

$$q_{сегм} = k_{сегм} b_{ов}(h_{ов} - s). \qquad (8)$$

Если овальный калибр не заполняется, т. е. ширина по металлу $b'_{он}$ меньше ширины калибра $b_{ов}$, то следует определить средний прямоугольник $b'_{ов}s'$ и площадь сегмента, равную

$$q'_{сегм} = k_{сегм} b'_{ов}(h_{ов} - s'),$$

где

$$k_{\text{сегм}} = \frac{b'_{\text{ов}}}{h_{\text{ов}} - s'}.$$

Величина $m = h_{\text{ов}} - s'$ равна

$$m = 2R_{\text{ов}} - 2\sqrt{R_{\text{ов}}^2 - 0{,}25b_{\text{ов}}'^2}. \qquad (9)$$

Радиус очертания овала $R_{\text{ов}}$, согласно рис. 20, равен

$$R_{\text{ов}} = \frac{b_{\text{ов}}^2 + h_{\text{ов}}'^2}{4h'_{\text{ов}}}, \qquad (10)$$

где

$$h'_{\text{ов}} = h_{\text{ов}} - s.$$

Это выражение можно получить из равенства (см. рис. 19)

$$R^2 = \frac{b_{\text{ов}}^2}{4} + \left(R - \frac{h'_{\text{ов}}}{2}\right)^2.$$

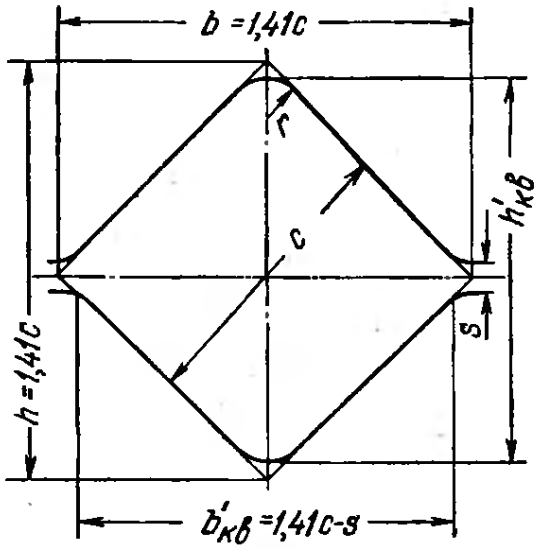


Рис. 21. Построение квадратного калибра

На рис. 21 показан квадратный калибр с геометрическими размерами

$$b_{\text{кв}} = h_{\text{кв}} = 1{,}41c.$$

Фактические размеры квадрата, т. е. с учетом закруглений, равны

$$b'_{\text{кв}} = 1{,}414c - s;$$

$$h'_{\text{кв}} = 1{,}414c - 0{,}828r;$$

$$r \approx 0{,}15c.$$

Площадь квадратного калибра с учетом закруглений равна

$$q'_{\text{кв}} = q_{\text{кв}} - 0{,}858r^2,$$

в расчетах можно принимать

$$q'_{\text{кв}} \approx 0{,}98q_{\text{кв}} = 0{,}98c^2.$$

### *Система ромб—квадрат*

Эту систему (рис. 22) применяют в основном на среднесортных, мелкосортных и непрерывных заготовочных станах, когда нужны вытяжки меньшие, чем вытяжки, обеспечиваемые системой овал—квадрат. По системе ромб—квадрат коэффициенты вытяжки в ромбических и квадратных калибрах применяют примерно одинаковые, изменяющиеся в пределах 1,15—1,40. Угол у вершины ромба обычно равен $\alpha = 110 \div 115°$.

Преимущества этой системы: получение точных квадратов с острыми ребрами, всестороннее обжатие в калибре, получение хорошей поверхности раската за счет удаления окалины.

Недостатки системы: глубокий врез калибров, возможность получения заусенцев и закатов в случае переполнения калибров.

Ниже приведен анализ вытяжек в ромбах и квадратах и установлена зависимость коэффициентов вытяжки от отношения $\frac{b_р}{h_р} = \operatorname{tg}\frac{\beta}{2}$ и показателей уширения $k_р$ и $k_{кв}$.

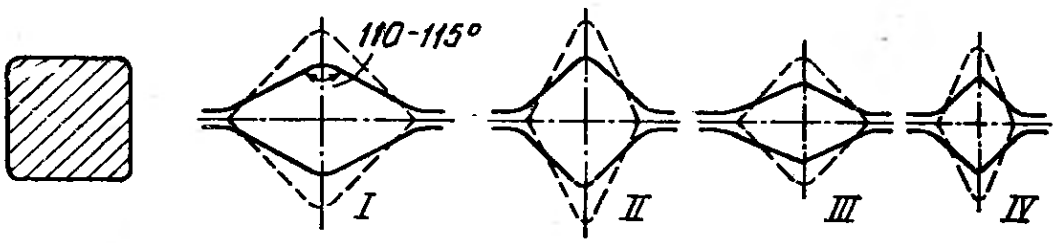



Рис. 22. Система калибров ромб—квадрат

Рассмотрим три калибра: квадратный со стороной $c_1$, ромбический размерами $h_р \times b_р$ и квадратный со стороной $c_2$ (рис. 23).

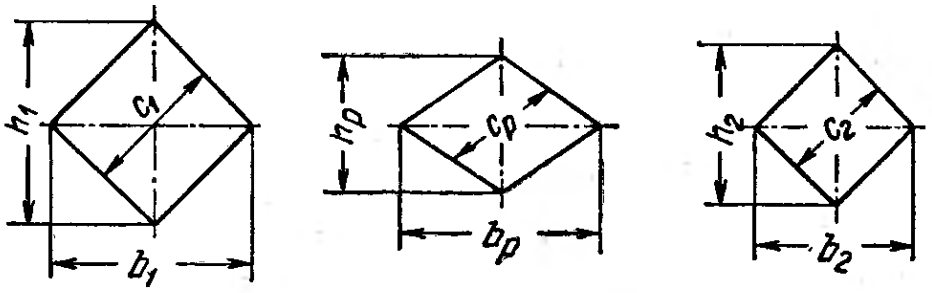



Рис. 23. К определеиию размеров сечений по системе ромб — квадрат

Размеры ромба без закруглений будут:

$$b_р = 1{,}41c_1 + k_р\,(h_{1\,ср} - h_{р.\,ср}) = 1{,}41c_1 + 0{,}5k_р\,(1{,}41c_1 - h_р) = (1 + 0{,}5k_р)\,1{,}41c_1 - 0{,}5k_р h_р;$$

$$k_р = \frac{\Delta b}{0{,}5\,(h_1 - h_р)};$$

$$\frac{b_р}{h_р} = a = \frac{(1 + 0{,}5k_р)\,1{,}41c_1 - 0{,}5k_р h_р}{h_р};$$

$$h_р = \frac{(1 + 0{,}5k_р)\,1{,}41c_1}{a + 0{,}5k_р};$$

$$b_р = ah_р = \frac{a\,(1 + 0{,}5k_р)\,1{,}41c_1}{a + 0{,}5k_р}.$$

Площадь ромба

$$q_р = \frac{h_р b_р}{2} = \frac{a\,(1 + 0{,}5k_р)^2\,c_1^2}{(a + 0.5k_р)^2}.$$

Коэффициент вытяжки в ромбе

$$\mu_р = \frac{c_1^2}{q_р} = \frac{(a + 0{,}5k_р)^2}{a(1 + 0{,}5_{кр})^2}. \qquad (11)$$

В табл. 3 приведены расчетные коэффициенты вытяжки в ромбических калибрах в зависимости от $b_р/h_р$ и $k_р$.

Таблица 3

**Коэффициент вытяжки в ромбическом калибре $\mu_р$**

| β град. | $a = \frac{b_р}{h_р}$ | Коэффициеит $\mu_р$ при разиых зиачениях $k_р$ | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 0 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 |
| 100 | 1,19 | 1,19 | 1,13 | 1,12 | 1,10 | 1,10 | 1,09 |
| 105 | 1,30 | 1,30 | 1,20 | 1,18 | 1,16 | 1,15 | 1,14 |
| 110 | 1,43 | 1,43 | 1,29 | 1,26 | 1,24 | 1,22 | 1,20 |
| 115 | 1,57 | 1,57 | 1,39 | 1,35 | 1,32 | 1,29 | 1,25 |
| 120 | 1,73 | 1,73 | 1,50 | 1,45 | 1,41 | 1,37 | 1,34 |
| 125 | 1,92 | 1,92 | 1,63 | 1,57 | 1,52 | 1,47 | 1,43 |
| 130 | 2,15 | 2,15 | 1,79 | 1,72 | 1,65 | 1,59 | 1,55 |

Как видно из табл. 3, чем больше отношение $\frac{b_р}{h_р} = \operatorname{tg}\frac{\beta}{2}$, т. е. чем более вытянутый ромб, тем коэффициент вытяжки $\mu_р$ больше.

При отсутствии уширения, когда $k_р = 0$, коэффициент вытяжки

$$\mu_р = \frac{b_р}{h_р} = \operatorname{tg}\frac{\beta}{2}.$$

С увеличением показателя уширения $k_р$ коэффициент вытяжки уменьшается.

При прокатке квадратов со стороной $c_1 = 10 \div 50$ *мм* в ромбических калибрах с углом $\beta = 110 \div 120°$ показатель уширения $k_р \approx 0{,}8 \div 0{,}5$; для этих случаев коэффициент вытяжки $\mu_р = 1{,}20 \div 1{,}45$. Для более крупных сечений квадратов с $c_1 = 50 \div 150$ *мм* при $\beta = 105 \div 115°$ и $k_р = 0{,}6 \div 0{,}4$ коэффициент вытяжки $\mu_р = 1{,}15 \div 1{,}40$.

Рассмотрим значения коэффициентов вытяжки $\mu_{кв}$ при прокатке ромбов в квадратном калибре.

Согласно рис. 23, высота и ширина ромба равны:

$$h_р = 1{,}41c_2 - 0{,}5k_{кв}(b_р - 1{,}41c_2) = 1{,}41c_2(1 + 0{,}5k_{кв}) - 0{,}5k_{ов}b_р;$$

$$\frac{b_р}{h_р} = a = \frac{b_р}{1{,}41c_2(1 + 0{,}5k_{кв}) - 0{,}5k_{кв}b_р};$$

$$b_р = \frac{a(1 + 0{,}5k_{кв})\,1{,}41c_2}{1 + 0{,}5ak_{кв}};$$

$$h_р = \frac{b_р}{a} = \frac{(1 + 0{,}5_{кв})\,1{,}41c_2}{1 + 0{,}5ak_{кв}},$$

Площадь ромба

$$Q_р = \frac{b_р h_р}{2} = \frac{a\left(1 + 0{,}5k_{кв}\right)^2 c_2^2}{\left(1 + 0{,}5ak_{кв}\right)^2}.$$

Коэффициент вытяжки в квадратном калибре

$$\mu_{кв} = \frac{Q_р}{c_2^2} = \frac{a\left(1 + 0{,}5k_{кв}\right)^2}{\left(1 + 0{,}5ak_{кв}\right)^2}. \qquad (12)$$

В табл. 4 приведены значения коэффициентов вытяжки $\mu_{кв}$ при прокатке ромбической полосы в квадратном калибре в зависимости от $b_р/h_р$ и $k_{кв}$.

Таблица 4

**Коэффициент вытяжки в квадратном калибре**

| β град. | $a = \frac{b_р}{h_р}$ | Коэффициент $\mu_{кв}$ при разных значениях $k_{кв}$ | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 0 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 |
| 100 | 1,19 | 1,19 | 1,13 | 1,11 | 1,10 | 1,09 | 1,08 |
| 105 | 1,30 | 1,30 | 1,21 | 1,18 | 1,16 | 1,14 | 1,12 |
| 110 | 1,43 | 1,43 | 1,28 | 1,25 | 1,21 | 1,19 | 1,16 |
| 115 | 1,57 | 1,57 | 1,36 | 1,31 | 1,27 | 1,23 | 1,19 |
| 120 | 1,73 | 1,73 | 1,44 | 1,37 | 1,32 | 1,27 | 1,22 |
| 125 | 1,92 | 1,92 | 1,53 | 1,44 | 1,37 | 1,31 | 1,25 |
| 130 | 2,15 | 2,15 | 1,62 | 1,52 | 1,42 | 1,34 | 1,27 |

В случае прокатки в квадратных калибрах размерами 5÷30 *мм* при $k_{кв} = 0{,}65 \div 0{,}4$ коэффициент вытяжки $\mu_{кв} = 1{,}19 \div 1{,}37$.

В случае прокатки в больших квадратных калибрах со стороной $c_2 = 40 \div 120$ *мм* при $k_{кв} = 0{,}4 \div 0{,}3$ коэффициент вытяжки $\mu_{кв} = 1{,}18 \div 1{,}44$.

В общем случае коэффициенты вытяжки в ромбических калибрах примерно такие же, как в квадратных, поэтому при определении размеров соседних ромбических и квадратных калибров можно принимать

$$\mu_р \approx \mu_{кв}.$$

Общий ход расчета черновых калибров по системе ромб—квадрат аналогичен ходу расчета вытяжных калибров системы овал—квадрат.

Если задан исходный квадрат и конечное квадратное сечение, то при расчете черновых калибров по системе ромб—квадрат сначала находим коэффициенты вытяжки в квадратных калибрах (расчет ведем против хода прокатки), для чего используем графики зависимости $\mu_{кв}$ от допускаемых углов захвата $\alpha$ (см. в гл. VI).

Определив размеры квадратов, находим площади и размеры промежуточных ромбов, пользуясь графиками или формулами

для определения уширения ромбической полосы в квадратном калибре [1].

На рис. 3 приведен ромбический калибр с геометрическими и фактическими размерами. Фактические размеры и площадь ромбического калибра с учетом закруглений определяют по формулам:

$$b_p = h_p \operatorname{tg}\frac{\beta}{2};\quad h_p = b_p \operatorname{tg}\frac{\gamma}{2};$$

$$c_p = \frac{b_p}{2\sin\frac{\beta}{2}} = \frac{h_p}{2\cos\frac{\beta}{2}};$$

$$q_p = 0{,}5 b_p h_p = c_p^2 \sin\beta = c_p^2 \sin\gamma;$$

$$b_p' = b_p - s\operatorname{tg}\frac{\beta}{2} = b_p - \frac{b_p}{h_p}s;$$

$$h_p' = h_p - 2r\left(\frac{1}{\sin\frac{\beta}{2}} - 1\right);$$

$$q_p' = q_p - 2r^2\left[\operatorname{tg}\left(90 - \frac{\beta}{2}\right) - 0{,}0087\,(180 - \beta) - \frac{b_p}{h_p}\frac{s^2}{2}\right], \quad (13)$$

где $0{,}0087 = \frac{3{,}14}{360}$.

Радиус закругления у вершины

$$r \approx (0{,}15 \div 0{,}20)\, c_p.$$

Радиус закругления у зазора

$$r' \approx 0{,}15 h_p.$$

В табл. 5 приведены размеры и площади ромба с учетом закруглений.

Таблица 5

**Размеры и площади ромба с закруглениями**

| $\beta$ град. | $\frac{b}{h_p} = \operatorname{tg}\frac{\beta}{2}$ | $h_p'$ | $b_p'$ | $q_p'$ |
|---|---|---|---|---|
| 100 | 1,19 | $h_p - 0{,}61r$ | $b_p - 1{,}19s$ | $q_p - 0{,}29r^2 - 0{,}59s^2$ |
| 105 | 1,30 | $h_p - 0{,}52r$ | $b_p - 1{,}30s$ | $q_p - 0{,}23r^2 - 0{,}65s^2$ |
| 100 | 1,43 | $h_p - 0{,}44r$ | $b_p - 1{,}43s$ | $q_p - 0{,}18r^2 - 0{,}72s^2$ |
| 115 | 1,57 | $h_p - 0{,}37r$ | $b_p - 1{,}57s$ | $q_p - 0{,}14r^2 - 0{,}79s^2$ |
| 120 | 1,73 | $h_p - 0{,}31r$ | $b_p - 1{,}73s$ | $q_p - 0{,}112r^2 - 0{,}87s^2$ |
| 125 | 1,92 | $h_p - 0{,}26r$ | $b_p - 1{,}92s$ | $q_p - 0{,}085r^2 - 0{,}96s^2$ |
| 130 | 2,15 | $h_p - 0{,}21r$ | $b_p - 2{,}15s$ | $q_p - 0{,}052r^2 - 1{,}08s^2$ |

[1] Расчет чериовых калибров по системе ромб—квадрат приведен в гл. VI на примере калибровки квадратной стали.

Площадь ромба с закруглениями приближенно можно принимать равной

$$q_{\text{р}}' \approx 0{,}98 q_{\text{р}} = 0{,}49 b_{\text{р}} h_{\text{р}}.$$

### *Система овал—ребровый овал*

Систему черновых калибров овал—ребровый овал применяют в основном на непрерывных мелкосортных станах. Обычные овальные калибры размещают на вертикальных, а ребровые — на горизонтальных валках непрерывных станов (рис. 24).

Основное преимущество при использовании этой системы на непрерывных станах заключается в том, что прокатываемая полоса не нуждается в кантовке, в то время как при использовании других систем черновых калибров (например, овал—квадрат) необходима кантовка. Кроме того, ребровый калибр с небольшим

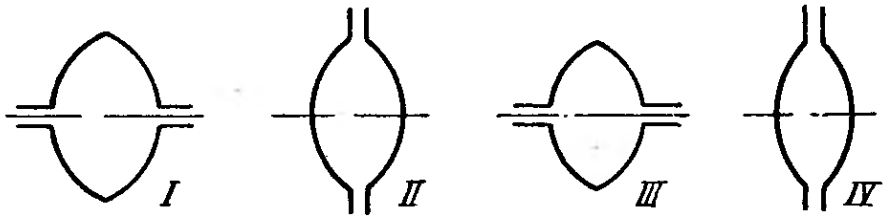



Рис. 24. Система калибров овал—ребровый овал:
*I* и *III* — ребровый овал; *II* и *IV* — овал

отношением размеров $\frac{h}{b} \approx 1{,}2 \div 1{,}3$ обеспечивает устойчивое положение полосы при прокатке в нем овального раската.

Калибры системы овал—ребровый овал имеют плавные очертания, обеспечивающие хорошее качество поверхности раската.

Рассмотрим, в каких пределах изменяются коэффициенты вытяжки в овалах и ребровых овалах, для чего выполним анализ зависимости вытяжки от $h_{\text{ов}}/b_{\text{ов}}$, $k_{\text{ов}}$ и $k_{\text{р.ов}}$.

Коэффициент вытяжки в овальном калибре определим при отношении размеров ребрового овала $\frac{h_1}{b_1} = 1{,}2$.

Согласно рис. 25, высота овального калибра равна

$$h_{\text{ов}} = h_1 + k_{\text{ов}} (b_{1\,\text{ср}} - b_{\text{ов. ср}}) = 1{,}2 b_1 + k_{\text{ов}} (0{,}75 b_1 - 0{,}74 b_{\text{ов}}) = (1{,}2 + 0{,}75 k_{\text{ов}}) b_1 - 0{,}74 k_{\text{ов}} b_{\text{ов}};$$

показатель уширения

$$k_{\text{ов}} = \frac{\Delta b}{\Delta h_{\text{ср}}}.$$

Принимая отношение $\frac{h_{\text{ов}}}{b_{\text{ов}}} = a$, получили

$$a = \frac{(1{,}2 + 0{,}75 k_{\text{ов}})\, b_1 - 0{,}74 k_{\text{ов}} b_{\text{ов}}}{b_{\text{ов}}},$$

откуда

$$b_{ов} = \frac{(1{,}2 + 0{,}75k_{ов})\, b_1}{a + 0{,}74k_{ов}}; \qquad h_{ов} = \frac{a\,(1{,}2 + 0{,}75k_{ов})\, b_1}{a + 0{,}74k_{ов}}.$$

Площадь овального калибра

$$q_{ов} \approx 0{,}74 b_{ов} h_{ов} = \frac{0{,}74a\left(1{,}2 + 0{,}75k_{ов}\right) b_1^2}{(a + 0{,}74k_{ов})^2}.$$

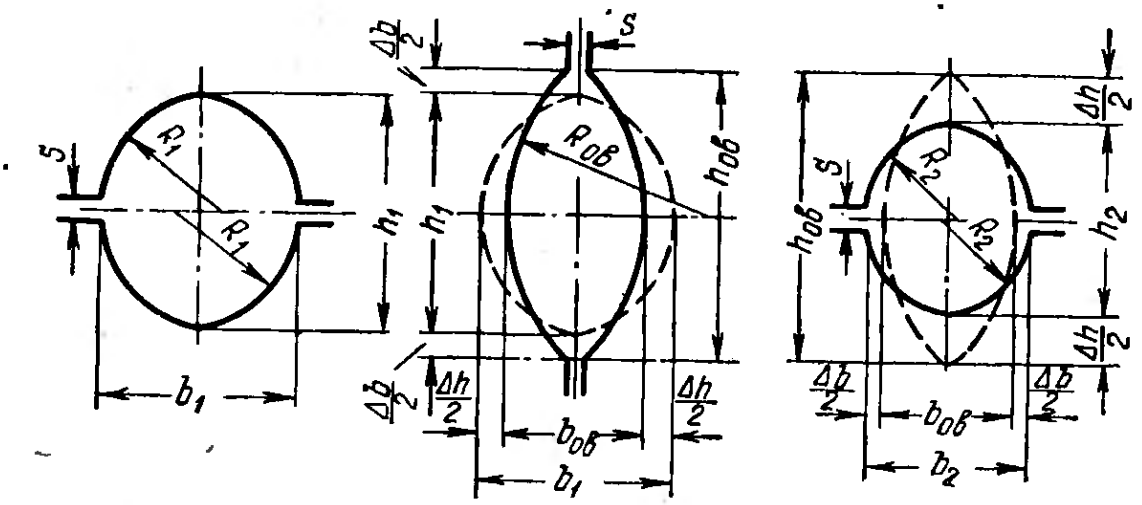



Рис. 25. Схема построения калибров по системе овал — ребровый овал

Площадь большего ребрового овала

$$q_1 = k_{ср} h_1 b_1 = 0{,}75 \cdot 1{,}2 b_1 b_1 = 0{,}9 b_1^2.$$

Тогда коэффициент вытяжки в овальном калибре

$$\mu_{ов} = \frac{1{,}215\left(\frac{h_{ов}}{b_{ов}} + 0{,}74k_{ов}\right)^2}{\frac{h_{ов}}{b_{ов}}(1{,}2 + 0{,}75k_{ов})^2}. \qquad (14)$$

В табл. 6 приведены результаты расчета коэффициента вытяжки $\mu_{ов}$ при прокатке в овальном калибре раската из ребрового овала [5].

Обычно принимают отношение $\frac{h_{ов}}{b_{ов}} = 2 \div 2{,}5$; для таких овалов коэффициент вытяжки равен $\mu_{ов} = 1{,}61 \div 1{,}18$, что значительно меньше, чем для овалов в системе овал—квадрат.

Определим коэффициенты вытяжки в меньшем ребровом овале.

Согласно рис. 25 имеем

$$b_{ов} = b_2 - k_{р.\,ов}\,(h_{ов.\,ср} - h_{2ср}) = b_2 - k_{р.\,ов}\,(0{,}74h_{ов} - 0{,}9b_2) = (1 + 0{,}9k_{р.\,ов})\, b_2 - 0{,}74k_{р.\,ов} h_{ов};$$

Таблица 6

**Коэффициент вытяжки $\mu_{ов}$ в овальном калибре**

| $a=\frac{h_{ов}}{b_{ов}}$ | Коэффициент $\mu_{ов}$ при разных значениях $k_{ов}$ | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 | 1,0 | 1,1 |
| 1,5 | 1,16 | 1,14 | 1,13 | 1,11 | 1,10 | 1,09 | 1,07 | 1,07 |
| 2,0 | 1,43 | 1,37 | 1,33 | 1,29 | 1,27 | 1,23 | 1,20 | 1,18 |
| 2,5 | 1,69 | 1,61 | 1,55 | 1,49 | 1,45 | 1,39 | 1,35 | 1,31 |
| 3,0 | 1,95 | 1,86 | 1,77 | 1,68 | 1,63 | 1,55 | 1,49 | 1,44 |

$$a=\frac{h_{ов}}{(1+0{,}9k_{р.\,ов})\,b_2-0{,}74k_{р.\,ов}h_{ов}};$$

$$h_{ов}=\frac{(1+0{,}9k_{р.\,ов})\,ab_2}{1+0{,}74ak_{р.\,ов}};\qquad b_{ов}=\frac{(1+0{,}9k_{р.\,ов})\,b_2}{1+0{,}74ak_{р.\,ов}}.$$

Площадь овала

$$q_{ов}=0{,}74b_{ов}h_{ов}=\frac{0{,}74\,(1+0{,}9k_{р.\,ов})^2ab_2^2}{(1+0{,}74ak_{р.\,ов})^2}.$$

Площадь меньшего ребрового овала $q_2=0{,}9b_2^2$.
Коэффициент вытяжки в ребровом овале

$$\mu_{р.\,ов}=\frac{q_{ов}}{q_2}=\frac{0{,}822\frac{h_{ов}}{b_{ов}}(1+0{,}9k_{р.\,ов})^2}{\left(1+0{,}74\frac{h_{ов}}{b_{ов}}k_{р.\,ов}\right)^2}. \qquad (15)$$

В табл. 7 приведены данные расчета коэффициентов вытяжки в ребровом овале.

Показатель уширения колеблется в пределах $k_{р.\,ов}=0{,}3\div0{,}5$. При отношении размеров овала $h_{ов}/b_{ов}=2\div2{,}5$ вытяжка колеблется в пределах $\mu_{р.\,ов}=1{,}37\div1{,}14$. Как показал анализ [5], коэффициент вытяжки в овале можно брать несколько больший, чем в ребровом овале, согласно выражению

$$\mu_{ов}\approx 1+(1{,}2\div1{,}3)\,(\mu_{р.\,ов}-1). \qquad (16)$$

Таблица 7

**Коэффициеиты вытяжки $\mu_{р.\,ов}$ в ребровом овале**

| $a=\frac{h_{ов}}{b_{ов}}$ | Коэффициент $\mu_{р.\,ов}$ при разных зиачениях $k_{р.\,ов}$ | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 |
| 1,5 | 1,17 | 1,12 | 1,09 | 1,07 | 1,04 |
| 2,0 | 1,37 | 1,27 | 1,21 | 1,14 | 1,09 |
| 2,5 | 1,53 | 1,37 | 1,26 | 1,16 | 1,10 |
| 3,0 | 1,65 | 1,43 | 1,27 | 1,17 | 1,08 |

Ход расчета черновых калибров по системе овал—ребровый овал следующий. Общий коэффициент вытяжки от ребрового овала к ребровому овалу можно принимать $M = \mu_{ов}\mu_{р.ов} = 1{,}4 \div 1{,}9$. Меньшие значения вытяжки соответствуют $b_1 \approx 5 \div 15$ *мм*, большие значения — для $b_1 \approx 30 \div 40$ *мм*. Находим сначала размеры всех ребровых овалов, зная начальное и конечное сечения раската. Затем определяем площади и размеры промежуточных овалов, пользуясь указанным выше соотношением вытяжек.

При определении размеров промежуточных овалов необходимо определить уширение в овале и ребровом овале по соответствующим формулам и графикам (см. гл. V).

### *Система овал—круг*

Эту систему (рис. 26) применяют на линейных сортовых станах. Преимущества системы:

1) отсутствие острых углов, что обеспечивает равномерное остывание, хорошее качество поверхности;

2) равномерное обжатие по сечению, что устраняет напряженность внутри профиля;

3) меньший износ калибров по сравнению с системой овал—квадрат.

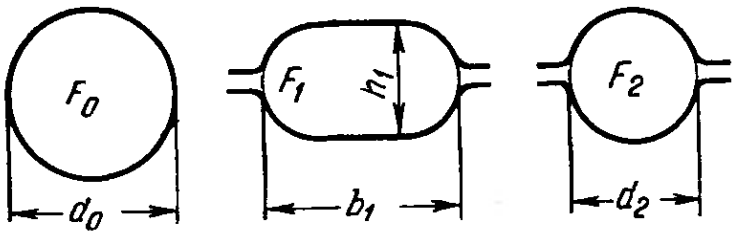



Рис. 26. Система калибров овал—круг

Однако этой системе присущи и существенные недостатки:

1) трудная задача овальной полосы в круг;

2) скручивание прокатываемой полосы в калибре;

3) небольшие коэффициенты вытяжки $\mu = 1{,}2 \div 1{,}4$.

Систему овал—круг применяют также в последних клетях чистовой группы непрерывного проволочного стана для использования промежуточного круглого калибра как чистового круга при прокатке проволоки большего диаметра.

За рубежом систему овал—круг применяют на непрерывных мелкосортных станах, однако практика наших заводов показала, что система овал—круг применительно к этим станам уступает системе овал—ребровый овал или овал—квадрат.

В отдельных случаях при прокатке качественных и высоколегированных сталей, когда требуется получить профиль без напряжений и с хорошей поверхностью, возможно применение системы овал—круг на линейных станах.

## *Система ромб—ромб*

Систему ромб—ромб (рис. 27) применяют на крупносортных и среднесортных станах при прокатке качественных сталей.

Преимущества системы: возможность получения точного профиля с хорошими гранями, малые напряжения внутри профиля, небольшое уширение в калибре.

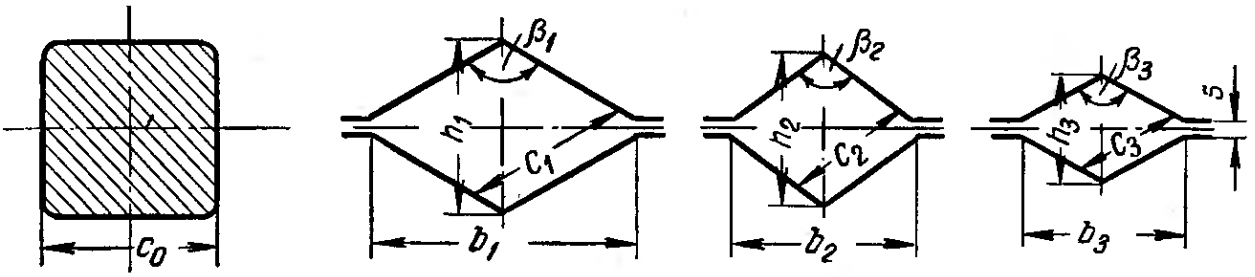



Рис. 27. Система калибров ромб—ромб

Недостатки системы: свертывание прокатываемой полосы в калибре, опасность получения заусенцев, ограничение вытяжки в пределах $\mu = 1{,}1 \div 1{,}3$.

Между геометрическими размерами ромба (рис. 27) существуют следующие зависимости:

$$b_1 = h_1 \operatorname{tg} \frac{\beta_1}{2}; \quad b_2 = h_2 \operatorname{tg} \frac{\beta_2}{2}.$$

Коэффициент вытяжки во втором ромбе равен

$$\mu_2 = \frac{Q_1}{Q_2} = \frac{0{,}5 b_1 h_1}{0{,}5 b_2 h_2} = \frac{h_1^2 \operatorname{tg} \frac{\beta_1}{2}}{h_2^2 \operatorname{tg} \frac{\beta_2}{2}}.$$

Если принять, что уширение отсутствует, т. е. $h_1 = b_2$, то в этом случае будет максимальная вытяжка, равная

$$\mu_2 = \frac{b_1 h_1}{h_1 h_2} = \frac{b_1}{h_2} = \frac{h_1 \operatorname{tg} \frac{\beta_1}{2} \operatorname{tg} \frac{\beta_2}{2}}{b_2} = \operatorname{tg} \frac{\beta_1}{2} \operatorname{tg} \frac{\beta_2}{2}. \qquad (17)$$

При наличии уширения коэффициент вытяжки будет уменьшаться по мере увеличения $k_р$, аналогично тому, как это было показано при анализе системы ромб—квадрат.

Согласно табл. 3, для системы ромб—квадрат при отсутствии уширения, когда $k_р = 0$, коэффициент вытяжки в ромбе или квадрате равен

$$\mu_р = \mu_{кв} = \frac{b_р}{h_р} = \operatorname{tg} \frac{\beta}{2}.$$

В системе ромб—ромб коэффициент вытяжки равен произведению тангенсов половины углов смежных калибров или произведению отношений сторон двух ромбов.

Если углы при вершине одинаковые, то коэффициент вытяжки равен

$$\mu_2 = \frac{h_1^2}{h_2^2} = \frac{b_1^2}{b_2^2} = \frac{c_1^2}{c_2^2}.$$

Таким образом, если коэффициент вытяжки в ромбе задан, то размеры большего ромба равны

$$b_1 = b_2\sqrt{\mu_2};$$

$$h_1 = h_2\sqrt{\mu_2};$$

$$c_1 = c_2\sqrt{\mu_2}.$$

С другой стороны, если принять, что уширение отсутствует, т. е. $h_1 = b_2$, то

$$\frac{b_1}{b_2} = \frac{b_1}{h_1} = \sqrt{\mu_2}$$

или

$$\mu_2 = \left(\frac{b_1}{h_1}\right)^2 = \operatorname{tg}^2\frac{\beta}{2}.$$

Если принять угол при вершине ромба $\beta = 100°$, то коэффициент вытяжки в нашем случае будет равен

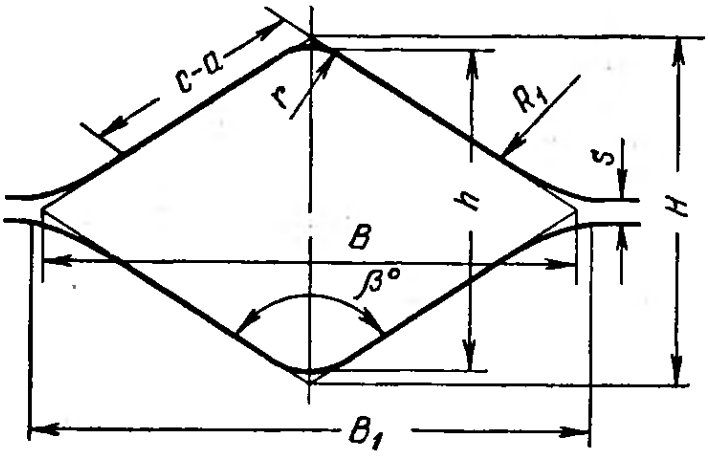



Рис. 28. Схема построения ромба с развалом

$$\mu_2 = \operatorname{tg}^2\frac{100}{2} = 1{,}19^2 = 1{,}416.$$

Для системы ромб — квадрат коэффициент вытяжки равен $\mu_{кв} = \mu_р = 1{,}19$ (см. табл. 3 и 4).

При расчете калибров по системе ромб — ромб задаются коэффициентами вытяжки с учетом простора на уширение.

Уширение можно подсчитать по формуле

$$\Delta b = b_2 - h_1 = (0{,}35 \div 0{,}40)\sqrt{(b_1 - h_1)R_{к2}}\,\frac{b_1 - h_2}{b_1}, \qquad (18)$$

где $R_{к2}$ — катающий радиус в глубине калибра.

Углы захвата в глубине калибра составляют 24—26°. Когда требуется получить заготовку квадратного сечения, раскат пропускают в ромбическом калибре дважды, но с кантовкой. Правда, грани такой заготовки имеют некоторую выпуклость (восьмигранную форму), которая является неудобной при проталкивании заготовки в печи.

При построении ромбов принимают радиус закругления у вершины

$$r \approx 0{,}2c,$$

у зазора

$$r' \approx 0{,}15h.$$

В тех случаях, когда необходимо обеспечить большие вытяжки в системе ромб—ромб, применяют ромбы с развалом (рис. 28). При конструировании таких ромбов на участке $a \approx \frac{1}{3} c$ прямую линию заменяют дугой радиусом $R_1 = c$.

### *Система квадрат—квадрат*

Эту систему иногда применяют для получения исходных квадратов различных размеров. Из-за малых коэффициентов вытяжки ($\mu = 1{,}08 \div 1{,}15$) эту систему применяют только в отдельных случаях. Чтобы обеспечить простор на уширение, угол у вершины квадратного калибра принимают не 90°, а несколько больше: $\beta = 91—93°$. В этом случае ширина квадрата будет болъше высоты, а именно:

$$b_{кв} = (1{,}427 \div 1{,}453)\, c;$$

$$h_{кв} = (1{,}42 \div 1{,}379)\, c.$$

Прокатку в таких калибрах ведут с кантовкой полосы.

### *Универсальная система калибровки*

Универсальная система калибров включает в себя следующие калибры: квадрат, полоса, ребро, овал, круг (рис. 29). Такая калибровка получила распространение при прокатке кругов из качественных сталей на среднесортных и крупносортных станах. Преимущества универсальной системы калибровки следующие:

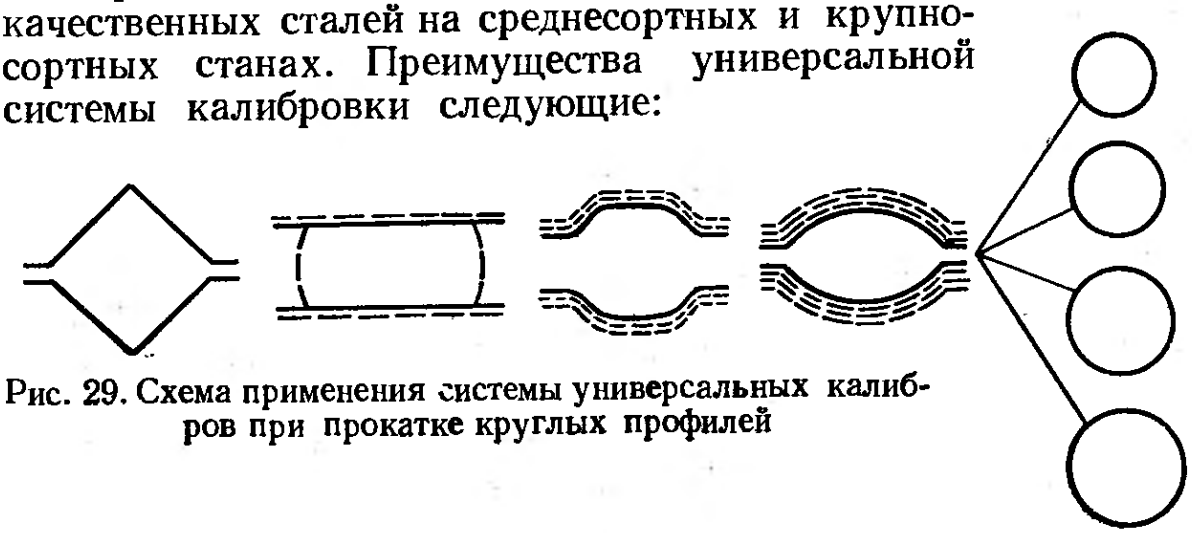


Рис. 29. Схема применения системы универсальных калибров при прокатке круглых профилей

1) регулировкой раствора валков можно в одних и тех же калибрах (полоса, ребро, овал) получать различные размеры;

2) в калибрах создается свободное уширение, в результате чего исключается возможность получения закатов;

3) окалина хорошо счищается с боковых поверхностей благодаря большим зазорам в калибрах (полоса, ребро);

4) обеспечивается хорошая поверхность, так как раскат имеет выпуклые грани;

5) упрощается монтаж калибров на валках и значительно сокращается парк валков;

6) сокращаются простои для перевалок валков, что имеет значение при прокатке профилей небольшими партиями.

Следует, однако, отметить, что на мелкосортных станах, когда прокатывают профиль одного размера большим тоннажом, пре-

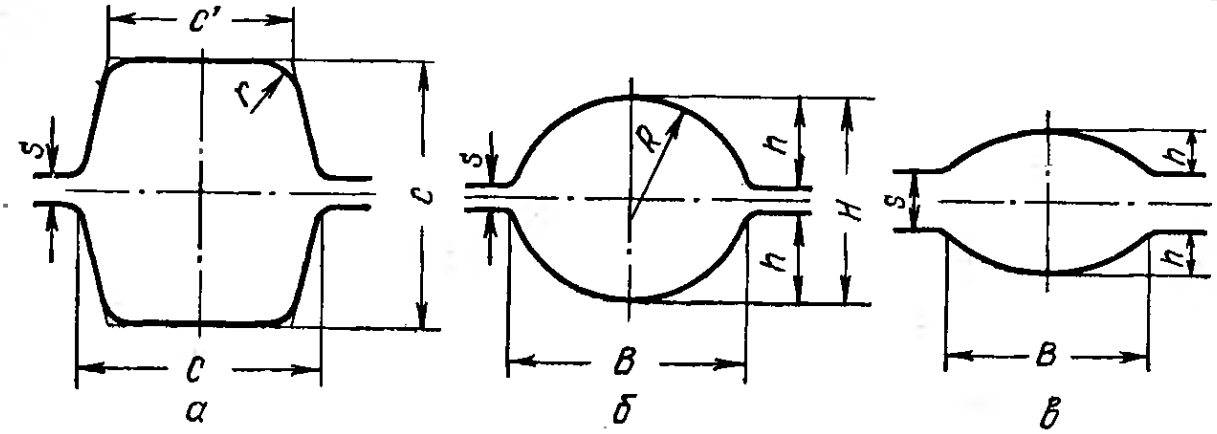



Рис. 30. Типы ребровых калибров:

*а* — «ящичный квадрат»; *б* — круг; *в* — овал

имущества универсальной калибровки не проявляются, так как перевалку приходится производить не из-за перемены сорта, а для замены изношенных валков.

Необходимо также иметь в виду, что при значительном изменении высоты предчистового овала последний может получится настолько тупым, что в чистовом калибре могут образоваться складки и морщины на поверхности профиля.

Наличие универсальных калибров дает возможность настройкой валков (подъемом или опусканием их) прокатывать в одних калибрах круглые профили нескольких размеров (3—4 и больше).

Так, например, в пяти овальных калибрах различных размеров на среднесортных станах можно прокатывать почти весь сортамент кругов (диаметром 25—65 *мм*), так что на один овальный калибр приходится до четырех чистовых кругов. Меняя зазор $s$ для овального калибра в пределах нескольких миллиметров, можно получать необходимые овальные полосы, задаваемые в чистовые калибры. Коэффициент вытяжки в овале колеблется в пределах $\mu_{ов} = 1{,}2 \div 1{,}25$.

На рис. 30 приведены типы ребровых калибров, применяемых в универсальной системе. Ребровый калибр типа «ящичный квадрат» (рис. 30, *а*) имеет уклоны 20—25%, зазор $s$ может колебаться в пределах 3—10 *мм*, радиус закругления у дна калибра составляет $r \approx 0{,}2c$. Угол захвата допускается до 21—22°. Коэф-

фициенты вытяжки в ребровом калибре принимают относительно большими ($\mu = 1{,}3 \div 1{,}35$), прокатку в этом случае ведут с защемлением.

На гладкой бочке исходный квадрат обжимается по высоте, причем коэффициент вытяжки на гладкой бочке колеблется в пределах $\mu = 1{,}1 \div 1{,}2$ в зависимости от требуемого сечения. При расчете уширения в ребровом калибре можно пользоваться формулой А. П. Чекмарева, принимая коэффициент ограничения $k_{огр} = 0{,}7$.

На рис. 30, *б* показан ребровый калибр типа «круг». В одном ребровом калибре за счет изменения зазора можно вести прокатку круглого профиля 4—5 размеров. Центр радиуса очертания ребрового калибра находится ниже горизонтальной оси при минимальном зазоре $s$.

Например, для прокатки кругов диаметром 27—33 *мм* служит ребровый калибр размерами: $B = 36$ *мм*, $h = 15$ *мм*, $R = 18{,}3$ *мм*.

При прокатке круга диаметром 27 *мм* зазор $s = 3$ *мм*, а высота $H = 33$ *мм*; для круга диаметром 33 *мм* зазор увеличивают до 6 *мм*.

Ребровый калибр типа овал приведен на рис. 30, *в*. Этот калибр характеризуется большим зазором между валками, способствующим хорошему удалению окалины.

Ширина калибра $B = 1{,}15d + 5$ *мм*, где $d$ — диаметр наибольшего размера круга для группы профилей, прокатываемых в этом калибре. Врез составляет $h = 2{,}5 \div 7$ *мм* в зависимости от размера круга. Зазор колеблется в значительных пределах, поскольку калибр врезан на небольшую величину. Коэффициент вытяжки в этом калибре $\mu = 1{,}18 \div 1{,}24$.

Размер исходного квадрата принимают

$$c_0 \approx 1{,}3d,$$

где $d$ — диаметр чистового круга.

Толщину полосы перед ребровым проходом принимают

$$h \approx d.$$

Применяют также *комбинированные системы черновых калибров*. Например, в обжимных и заготовочных станах сначала идут прямоугольные калибры, а затем черновые калибры системы ромб—квадрат или ромб—ромб.

В обжимных клетях сортовых станов также ведут прокатку в прямоугольных калибрах, после чего идут калибры шестигранник—квадрат.

Характеристика и методы расчета черновых калибров различных систем приведены в работах [2, 5, 7, 8, 9].

## 6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕЙТРАЛЬНОЙ ЛИНИИ КАЛИБРА

При калибровке валков большое значение имеет правильное определение нейтральной линии калибра, под которой понимают линию, делящую калибр на две части так, что совмещение этой линии с линией прокатки в случае равенства начальных диаметров обеспечивает прямолинейный выход полосы из валков и плавность хода прокатного стана без толчков и ударов [1].

Таким образом, при правильном расположении нейтральной линии верхний и нижний валки одинаково воздействуют на металл, создавая равенство скоростей выхода металла по верхнему и нижнему валкам.

Если принять силы трения и коэффициент трения на верхнем и нижнем валке одинаковыми, то равенство скоростей можно заменить равенством средних катающих радиусов верхнего и нижнего валков:

$$R_{к.\,ср} = R'_{к.\,ср}.$$

При неправильном положении нейтральной линии калибра, когда катающие диаметры и окружные скорости валков неодинаковы, валок с бóльшим катающим диаметром является ведущим и через полосу увлекает за собой валок с меньшим катающим диаметром.

Благодаря зазорам в муфтах и шпинделях меньший валок опережает связанный с ним шестеренный валок, иногда почти на полоборота. Когда полоса выйдет из валков, меньший валок останавливается, так как он уже не увлекается бóльшим валком, и начинает вращаться от шестеренного валка, как только в муфтах и шпинделях исчезнет зазор. В этот момент возникает удар, который может привести к поломке муфт и шпинделей. Кроме того, во время прокатки малый валок, увлекаемый бóльшим, является тормозом, что приводит к увеличению расхода энергии и возникновению напряжений на прокатываемой полосе.

Изгиб полосы за счет неравенства катающих диаметров является причиной сильного износа привалковой арматуры (выводных проводок) и может вызвать оковывание полосы вокруг валка.

Таким образом, правильное положение нейтральной линии калибра обеспечивает:

1) прямолинейный выход полосы из валков;

2) отсутствие ударов и излишних напряжений в муфтах и шпинделях;

3) меньший расход энергии при прокатке;

4) меньший износ калибров;

---

[1] При равенстве начальных диаметров линия прокатки представляет собой среднюю линию валков. В дальнейшем изложении везде приняты начальные диаметры и радиусы для верхнего и нижнего валков одинаковыми.

5) отсутствие напряжений и трещин в прокатываемой полосе, т. е. отсутствие растяжения внешних слоев металла вследствие разности скоростей;

6) надежную работу привалковой арматуры.

Положение нейтральной линии калибра можно определить различными способами, в зависимости от чего она может проходить через середину высоты калибра, являясь осью симметрии калибра, через центр тяжести сечения калибра или через центр тяжести контура калибра. Наконец, нейтральную линию располагают так, чтобы обеспечить равенство средних катающих диаметров на обоих валках или равенство окружных скоростей валков.

Наиболее просто определить положение нейтральной линии по первому способу, когда калибр симметричен относительно горизонтальной оси. В этом случае ось симметрии и является нейтральной линией калибра, которая обеспечивает равенство площадей по обе стороны линии и, следовательно, равномерную деформацию и равенство катающих диаметров.

Простые калибры — прямоугольные, квадратные, ромбические, шестигранные, овальные, круглые имеют нейтральную линию калибра, проходящую через середину сечения и совпадающую с осью симметрии и центром тяжести. В симметричных фасонных калибрах (балка, рельс и др.) нейтральная линия также проходит через середину профиля.

Расположение нейтральной линии по первому способу применяют также для калибров, имеющих основной элемент сечения в виде горизонтального прямоугольника с расположением по обеим сторонам его приблизительно одинаковых по сечению элементов калибра.

Следует иметь в виду, что для прямоугольного калибра закрытого типа боковые стенки калибра по-разному будут влиять на выход полосы из калибра в зависимости от того, как располагается разъем валков — сверху или снизу. В этом случае ось симметрии не будет соответствовать нейтральной линии.

Более сложной задачей является определение положения нейтральной линии для несимметричных фасонных профилей.

В заводской практике для фасонных профилей нейтральную линию часто определяют как линию, проходящую через центр тяжести калибра.

Для этого профиль делят на элементарные участки и для каждого участка находят центр тяжести и статический момент [1].

---

[1] Подробно методика определения положения нейтральной линии калибра по центру тяжести изложена в работе [7].

Например, для швеллерного калибра ордината центра тяжести, согласно рис. 31, равна

$$y = \frac{M_1 + 2M_2}{q_1 + q_2} = \frac{q_1 y_1 + 2q_2 y_2}{q_1 + q_2}, \qquad (19)$$

где $q_1 = Bd$ — площадь стенки;

$q_2 = 0{,}5\,(a + b)\,h$ — площадь одного фланца;

$y_1 = \frac{d}{2}$ — ордината центра тяжести стенки;

$y_2 = \frac{h}{3}\left(\frac{2a + b}{a + b}\right)$ — ордината центра тяжести фланца.

Расстояние от наружной грани калибра до нейтральной линии

$$z = d + y.$$

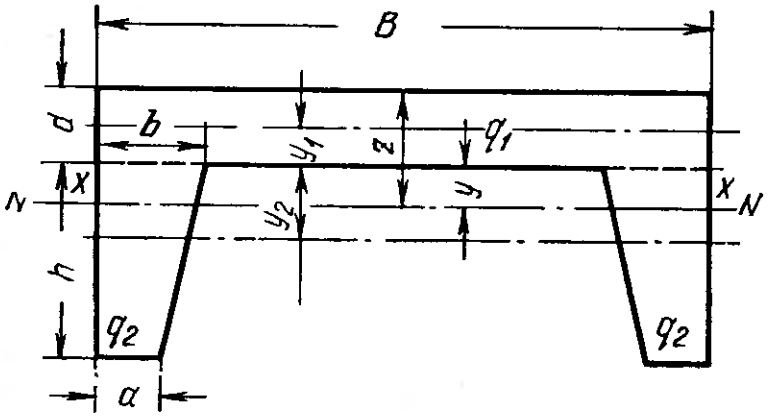



Рис. 31. К определению положения центральной линии калибра по центру тяжести

В ряде случаев определение положения нейтральной линии по центру тяжести дает удовлетворительные результаты, однако этот способ теоретически необоснован и для фланцевых калибров может давать неправильные результаты. Это объясняется тем, что фланцы могут быть открытые или закрытые, т. е. обрабатываться одним или двумя валками, что сказывается на изменении сил трения, действующих со стороны верхнего и нижнего валков. Положение нейтральной линии по центру тяжести не отражает такого изменения сил трения в калибре.

Наиболее обоснованная методика определения нейтральной линии калибра должна базироваться на расчете сил трения в калибре для верхнего и нижнего валков с учетом зоны отставания и опережения.

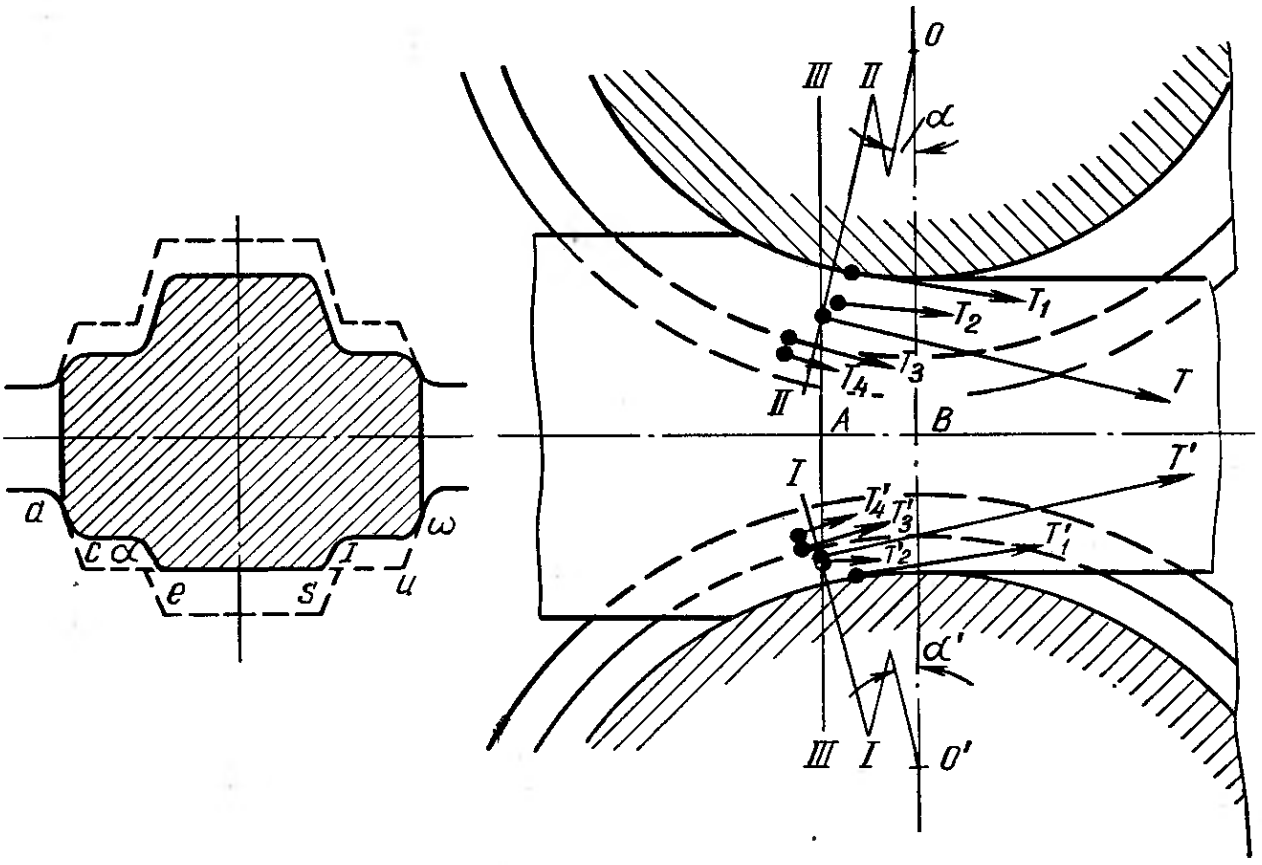
В общем виде, согласно рис. 32, величина $y_{ср} = R_к$, характеризующая точку приложения равнодействующей всех сил трения по ручьям нижнего или верхнего валков, определяется по формуле [1]

$$y_{ср} = R_{к.\,ср} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \rho_i f_i p_i b_i l_{дi} y_i}{\sum_{i=1}^{n} \rho_i f_i p_i b_i l_{дi}},$$

[1] В. С. Пестов. В сб. «Современные достижения прокатного производства». Труды межвузовской научно-технической конференции, т. 2, Изд. ЛПИ, 1959, с. 156.

где $\rho_i = \frac{l'_{дi} - l''_{дi}}{l_{дi}}$ — коэффициент, учитывающий соотношение длин зон отставания и опережения $[\rho_i = (-1{,}0) \div (+1{,}0)]$.

Однако в фасонных калибрах весьма сложно рассчитать силы трения по отдельным элементам с учетом зон отставания и опере-




Рнс. 32. Схема действия сил трения в калибре, ограниченном прямыми линиями (по данным В. С. Пестова)

жения, поэтому для определения нейтральной линии приходится делать упрощения, например принимать постоянными $f_i$, $f_i p_i$ и $\rho_i p_i f_i$, $l_{дi}$. В этом случае

$$y_{ср} = R_{к.ср} = \frac{\sum_{i=1}^{n} b_i y_i}{\sum_{i=1}^{n} b_i}.$$

Ниже изложен метод определения положения нейтральной линии калибра на основе равенства средних катающих радиусов верхнего и нижнего валков с учетом сил трения на боковых стенках калибра [1].

---

[1] М. С. Мутьев. В сб. «Обработка металлов давлением» (ДМетИ), вып. 54. Изд-во «Металлургия», 1970, с. 55.

Рассмотрим этот метод на примере швеллерного калибра с открытыми фланцами.

Согласно рис. 33, напишем равенство средних катающих радиусов верхнего и нижнего валков:

$$R_{к.\,ср} = \frac{\sum R_к l}{\sum l};\quad R'_{к.\,ср} = \frac{\sum R'_к l'}{\sum l'}.$$

При $R_{к.\,ср} = R'_{к.\,ср}$ имеем

$$\frac{\sum R_к l}{\sum l} = \frac{\sum R'_к l'}{\sum l'},$$

где $\sum R_к l = R_1 l_1 + R_2 l_2 + \cdots + R_n l_n$ — сумма произведений катающих радиусов на параметры калибров по контуру верхнего валка;

$\sum R'_к l' = R'_1 l'_1 + R'_2 l'_2 + \cdots + R'_n l'_n$ — то же, по контуру нижнего валка;

$\sum l$ и $\sum l'$ — параметры калибра по верхнему и нижнему валкам.

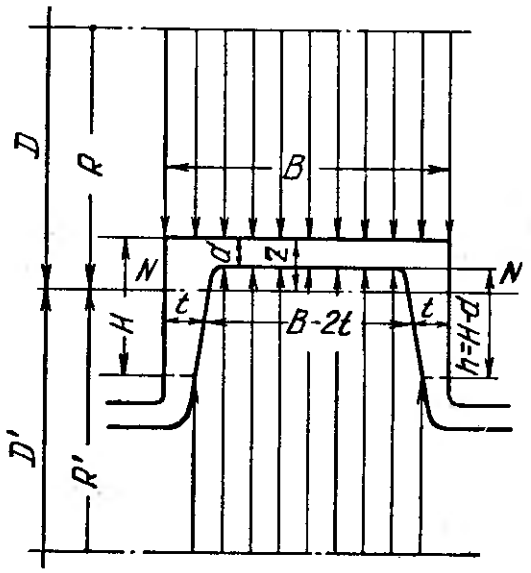



Рис. 33. К определению положения нейтральной линии чистового швеллерного калибра

Последнее равенство можно записать так:

$$\left.\begin{aligned} &\sum R_к l = \sum R'_к l' \frac{\sum l}{\sum l'} \\ &\text{или} \\ &\sum R_к l' = \sum R'_к l a, \end{aligned}\right\} \qquad (20)$$

где $a = \dfrac{\sum l}{\sum l'}$ — отношение указанных параметров.

Начальные диаметры $D$ и $D'$ и радиусы $R$ и $R'$ принимаем одинаковыми.

Для упрощения принимаем среднюю толщину фланцев $t$ без учета наклона внутренних граней фланцев.

Расстояние от верхней грани калибра до нейтральной оси обозначаем величиной $z$. Определим средние катающие диаметры и величину $z$ для швеллера с учетом катающих радиусов на боковых стенках калибра. Так как на боковых стенках калибра давление может быть меньше, чем на горизонтальных отрезках периметра, вводим для боковых стенок поправочный коэффициент $k \leqslant 1$ [10].

Определим положение нейтральной линии для швеллера с открытыми фланцами, когда края последних не обрабатываются валками.

Как видно из рис. 33, сумма произведений катающих радиусов на параметры калибров для верхнего валка равна

$$\sum R_к l = k\,2H\left(R - z + \frac{H}{2}\right) + B\,(R - z),$$

для нижнего валка

$$\sum R'_к l = (B - 2t)(R + z - d) + 2k\,(H - d)\left(R + z - \frac{H}{2} - \frac{d}{2}\right).$$

Отношение периметров калибра по верхнему и нижнему валкам равно

$$a = \frac{k\,2H + B}{B - 2t + 2k\,(H - d)} = \frac{B + 2kH}{B - 2t + 2k\,(H - d)}.$$

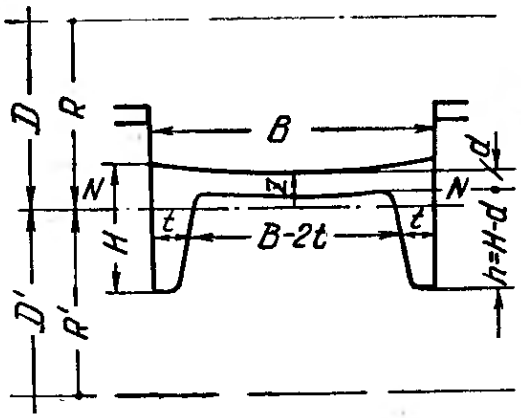



Рис. 34. К определению положения нейтральной линии предчистового закрытого швеллерного калибра

Согласно уравнениям (20), имеем

$$2kH\left(R - z + \frac{H}{2}\right) + B\,(R - z) = \left[(B - 2t)(R + z - d) + \right.$$

$$\left. + 2k\,(H - d)\left(R + z - \frac{d}{2} - \frac{H}{2}\right)\right] a$$

и после преобразования находим

$$z = \frac{(B - 2t)\,d + \frac{kH^2}{a} + kH^2 - kd^2}{B + \frac{B}{a} + \frac{2kH}{a} + 2kH - 2kd}. \qquad (21)$$

Определим величину $z$ для швеллера с закрытыми фланцами (рис. 34).

Сумма произведений катающих радиусов на параметры калибров для верхнего валка равна

$$\sum R_к l = B\,(R - z),$$

для нижнего валка

$$\sum R'_к l' = k\,2H\left(R + z - \frac{H}{2}\right) + 2t\,(R + z - H) +$$

$$+ (B - 2t)(R + z - d) + 2k\,(H - d)\left(R + z - \frac{d}{2} - \frac{H}{2}\right).$$

Отношение $a$ равно

$$a = \frac{B}{2t + B - 2t + 2k(H-d)} = \frac{B}{B + 2k(2H-d)}.$$

При равенстве средних катающих радиусов верхнего и нижнего валков имеем

$$B(R-z) = \left[2kH\left(R+z-\frac{H}{2}\right) + 2t(R+z-H) + \right.$$

$$\left. + (B-2t)(R+z-d) + 2k(H-d)\left(R+z-\frac{d}{2}-\frac{H}{2}\right)\right] a.$$

После преобразований получим величину $z$ для швеллера с закрытыми фланцами

$$z = \frac{2tH + (B-2t)d + k(2H^2-d^2) + R\left(\frac{b}{a} - B - 4kH + 2kd\right)}{B + \frac{B}{a} + 2k(2H-d)},$$

где сомножитель при $R$ равен нулю, если в выражение $\frac{B}{a} - B - 4kH + 2kd$ подставить значение

$$a = \frac{B}{B + 2k(2H-d)}.$$

Окончательно имеем

$$z = \frac{2tH + (B-2t)d + k(2H^2-d^2)}{B + \frac{B}{a} + 2k(2H-d)}. \qquad (22)$$

## Примерный расчет положения нейтральной линии чистового калибра для швеллера № 10

На примере чистового калибра швеллера № 10 найдем положение нейтральной линии для открытых и закрытых фланцев (рис. 35). Если фланцы открытые (см. рис. 33), то применяем фор-

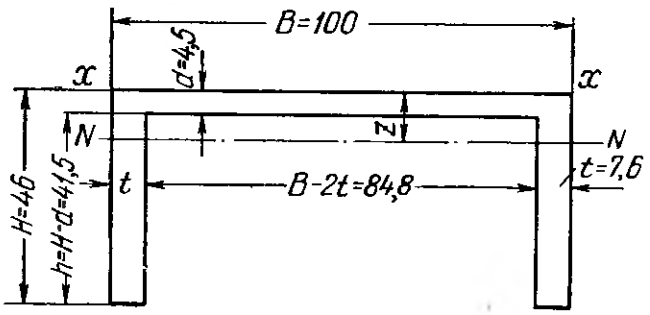



Рис. 35. К определению положения нейтральной линии чистового калибра швеллера № 10

мулу (21). Коэффициент $k$ в фасонных калибрах принимают $k = 1 \div 0{,}5$ [10]. Во избежание оковывания полосы лучше пользоваться коэффициентом $k = 1$, имея в виду возможное защемление металла во фланцах.

При $k = 1$ получим

$$a = \frac{100 + 2 \cdot 46}{100 - 2 \cdot 7{,}6 + 2(46 - 4{,}5)} = 1{,}145;$$

$$z = \frac{(100 - 2 \cdot 7{,}6)\, 4{,}5 + \frac{46^2}{1{,}145} + 46^2 - 4{,}5^2}{100 + \frac{100}{1{,}145} + \frac{2{,}46}{1{,}145} + 2 \cdot 46 - 2 \cdot 4{,}5} = 12{,}3 \text{ мм}.$$

Если $k = 0$, т. е. без учета влияния боковых стенок, величина $z = 5{,}4$ *мм*. В этом случае калибр будет глубже врезан в нижний валок, что может привести к окову полосы.

Рекомендуется проверять правильность расчета положения нейтральной линии калибра. Для этого следует задаться начальным радиусом валков и проверить равенство средних катающих радиусов.

Пусть начальный радиус составляет $R = 250$ *мм*.

Для швеллера, согласно рис. 33, величина $z = 12{,}3$ *мм*.

Средний катающий радиус для нижнего валка равен

$$R'_{\text{к. ср}} = \frac{\sum R'_{\text{к}l'}}{\sum l} = \frac{(B - 2t)(R + z - d) + 2k(H - d)\left(R + z - \frac{H}{2} - \frac{d}{2}\right)}{B - 2t + 2k(H - d)} =$$

$$= \frac{(100 - 2 \cdot 7{,}6)(250 + 12{,}3 - 4{,}5) + 2(46 - 4{,}5)\left(250 + 12{,}3 - \frac{46}{2} - \frac{4{,}5}{2}\right)}{100 - 2 \cdot 7{,}6 + 2(46 - 4{,}5)} =$$

$$= 249 \text{ мм};$$

для верхнего валка

$$R_{\text{к. ср}} = \frac{\sum R_{\text{к}l}}{\sum l} = \frac{2kH\left(R - z + \frac{H}{2}\right) + B(R - z)}{B + 2kH} =$$

$$= \frac{2 \cdot 46\left(250 - 12{,}3 + \frac{46}{2}\right) + 100(250 - 12{,}3)}{100 + 46} = 249 \text{ мм}.$$

Катающие радиусы верхнего и нижнего валков получились одинаковые, следовательно, правильно определено расстояние от верхней грани швеллера до нейтральной линии калибра.

Определим значение $z$ для швеллера с закрытыми фланцами (см. рис. 34, 35).

Подставляя в формулу (22) размеры в соответствии с рис. 35, находим

$$z = \frac{2 \cdot 7{,}6 \cdot 46 + 84{,}8 \cdot 4{,}5 + 2 \cdot 46^2 - 4{,}5^2}{100 + \frac{100}{a} + 4 \cdot 46 - 4 \cdot 4{,}5} = 9{,}7 \text{ мм};$$

$$a = \frac{B}{B + 2k(2H - d)} = \frac{100}{100 + 2(2 \cdot 46 - 4{,}5)} = \frac{100}{275} = 0{,}0364.$$

При $k = 0{,}5$ величина $z = 8{,}5$ *мм*.

Как видно из приведенного примера при $k = 0{,}5 \div 1$, величина $z = 8{,}5 \div 9{,}7$ *мм*.

Очевидно, можно принимать большее значение $z$ (при $k = 1$), учитывая защемление металла во фланцах, так что в нашем случае $z \approx 10$ *мм*.

Проверим правильность полученного нами значения $z = 9{,}7$ *мм*.

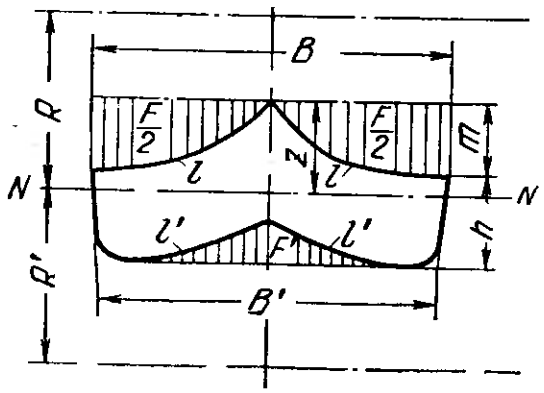



Рис. 36. К определению положения нейтральной линии углового калибра

Для верхнего валка средний катающий радиус равен

$$R_{\text{к. ср}} = \frac{B(R-z)}{B} = R - z = 250 - 9{,}7 = 240{,}3 \text{ мм};$$

для нижнего валка

$$R'_{\text{к. ср}} = \frac{2kH\left(R+z-\frac{H}{2}\right) + 2t(R+z-H) + (B-2t)(R+z-d)}{B+2k(2H-d)} +$$

$$+ \frac{2k(H-d)\left(R+z-\frac{d}{2}-\frac{H}{2}\right)}{B+2k(2H-d)} =$$

$$= \frac{2\cdot 46\left(250+9{,}7-\frac{46}{2}\right) + 15{,}2(250+9{,}7-46)}{100+2(2\cdot 46-4{,}5)} +$$

$$+ \frac{(100-2\cdot 7{,}6)(250+9{,}7-4{,}5) + 2(46-4{,}5)\left(250+9{,}7-\frac{4{,}5}{2}-\frac{46}{2}\right)}{100+2(2\cdot 46-4{,}5)} =$$

$$= 240{,}3 \text{ мм}.$$

Рассмотрим методику определения положения нейтральной линии для углового калибра с учетом влияния боковых стенок на величину $z$.

Согласно рис. 36, напишем равенство средних катающих радиусов для верхнего и нижнего валков:

$$R_{\text{к. ср}} = \frac{\left(R - z + \frac{F}{B}\right) 2l}{2l} =$$

$$= \frac{\left(R + z - m - h + \frac{F'}{B'}\right) 2l' + 2k\left(R + z - m - \frac{h}{2}\right) h}{2l' + 2kh},$$

где $l$ и $l'$ — длина полок по верхнему и нижнему контурам калибра;

$F$ — площадь между верхним контуром калибра и горизонталью;

$F'$ — площадь между нижним контуром калибра и горизонталью;

$R - z + \frac{F}{B}$ — средний катающий радиус для верхней грани полки;

$R + z - m - h - \frac{F'}{B'}$ — средний катающий радиус для нижней грани полки.

Принимая отношение длины контура калибра по верхнему и нижнему валкам

$$a = \frac{2l}{2l' + 2kh},$$

запишем следующее равенство:

$$\left(R - z + \frac{F}{B}\right) 2l = \left[\left(R + z - m - h + \frac{F'}{B'}\right) 2l' + \right.$$

$$\left. + 2k\left(R + z - m - \frac{h}{2}\right) h\right] a.$$

После преобразований получим следующую формулу для определения величины $z$, характеризующей положение нейтральной линии калибра:

$$z = \frac{\frac{l}{a}\frac{F}{B} + l'm + l'h - l'\frac{F'}{B'} + khm + 0{,}5kh^2}{\frac{l}{a} + l' + kh}. \qquad (23)$$

При прокатке уголка со свободным уширением боковые стенки калибра не влияют на положение нейтральной линии калибра, т. е. $k = 0$. В этом случае получим следующую связь средних катающих радиусов верхнего и нижнего валков (рис. 37):

$$R_{\text{к. ср}} = R - z + \frac{F}{B} = R + z - m - h + \frac{F'}{B'},$$

откуда $$z = \frac{F}{2B} - \frac{F'}{2B'} + \frac{m+h}{2}. \qquad (24)$$

Если разность $\frac{F}{2B} - \frac{F'}{2B'}$ получится незначительной, нейтральная линия проходит примерно посередине общей высоты калибра $m + h$.

В тех случаях, когда прокатка ведется со свободным уширением и силы трения на боковых стенках калибра не влияют на

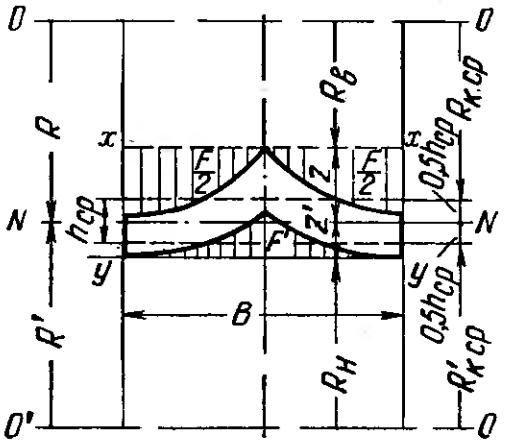



Рис. 37. К определению положения нейтральной линии углового калибра (по методу Д. И. Старченко)

катающий диаметр, определить положение нейтральной линии можно по методу Д. И. Старченко [11]*, основанному на данных работы [12].

Проводим горизонтальные линии $x$—$x$ и $y$—$y$ через выступающие точки калибра по высоте (рис. 37). При равенстве начальных радиусов и средних катающих радиусов можно написать

$$R_{к.ср} = R_0 - 0{,}5h_{ср},$$

где $h_{ср} = \frac{Q}{B}$ — средняя высота калибра.

С другой стороны, средние катающие радиусы равны

$$R_{к.ср} = R_в + \frac{F}{B} = R_0 - z + \frac{F}{B};$$

$$R_{к.ср} = R_н + \frac{F'}{B} = R_0 - z' + \frac{F'}{B},$$

где $F$ и $F'$ — площади, ограниченные осями $x$—$x$ и $y$—$y$ и контуром калибра;

$\frac{F}{B}$ и $\frac{F'}{B}$ — средние высоты этих площадей;

$z$ и $z'$ — расстояния от вершин калибра до нейтральной линии.

Следовательно:

$$R_0 - 0{,}5h_{ср} = R_0 - z + \frac{F}{B},$$

---

* Данный метод применим для определения положения нейтральной линии различных фасонных профилей. (*Прим. ред.*)

откуда

$$z = \frac{F}{B} + 0{,}5h_{ср} = \frac{F + 0{,}5Q}{B}.$$

Если отсчет вести от нижней крайней точки, получим

$$z' = \frac{F' + 0{,}5Q}{B}.$$

Проводим через крайнюю точку (верхнюю или нижнюю) калибра горизонтальную линию, определяем площадь, ограниченную этой линией и контуром калибра $F$ (или $F'$), и расстояние от крайней точки до нейтральной линии:

$$\left.\begin{aligned} z &= \frac{F + 0{,}5Q}{B} \\ \text{или} \quad z' &= \frac{F' + 0{,}5Q}{B}. \end{aligned}\right\} \qquad (25)$$

По конфигурации калибра судим, какую площадь удобнее рассчитать — верхнюю $F$ или нижнюю $F'$.

## 7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРЕДНЕГО КАТАЮЩЕГО ДИАМЕТРА ПРИ ПРОКАТКЕ В КАЛИБРАХ

При прокатке приходится сопоставлять окружную скорость валков $v$ со скоростью выхода полосы из валков $v_п$ с учетом опережения $S$:

$$v_п = (1 + S)\, v,$$

где

$$S = \frac{v_п - v}{v} = \frac{v_п}{v} - 1; \quad v = \frac{\pi D_к n}{60}.$$

При прокатке в калибрах, когда диаметры валков в каждой точке калибра разные, необходимо оперировать средним катающим диаметром

$$D_{к.\,ср} = \frac{\sum_1^n D_к}{n}.$$

В практических расчетах можно отнести опережение к определенной точке калибра. Например, при прокатке уголка можно брать точку в глубине калибра или посередине полки; при прокатке двутавровой балки или швеллера опережение определяют относительно стенки профиля и т. п. В каждом случае нужно оговаривать, относительно какой точки калибра определяется опережение.

Однако в ряде случаев приходится пользоваться средними катающими диаметрами, чтобы определить средний нейтральный угол, крутящий момент, мощность прокатки и т. д.

Как указывалось в предыдущем параграфе, средний катающий диаметр или радиус валка можно определить, найдя равнодействующие сил трения, действующих по ручью нижнего или верхнего валков. Расчет указанным способом представляет значительные трудности, поэтому приходится применять следующие упрощенные методы определения среднего катающего диаметра: 1) по контактной поверхности калибра; 2) по средней высоте калибра; 3) по периметру калибра.

Рассмотрим эти методы применительно к различным калибрам.

Метод определения среднего катающего диаметра, исходя из величины контактной поверхности, предложен А. П. Чекмаревым и Н. М. Санько [1].

По этому методу средний катающий диаметр (среднедействующий диаметр) равен

$$D_{к.\,ср} = \frac{\sum D_к F}{F_к},$$

где $\sum D_к F$ — сумма катающих диаметров в каждой точке по всей поверхности соприкосновения металла с валками в очаге деформации;

$F_к$ — поверхность соприкосновения металла с валками.

Значение среднего катающего диаметра зависит от степени заполнения калибра.

Часто определяют средний катающий диаметр по средней высоте калибра:

$$D_{к.\,ср} = D - h_{ср} = D - \frac{Q}{b},$$

где $Q$ — площадь выходящей из калибра полосы;

$b$ — ширина выходящей полосы.

Этот метод более прост, однако пригоден не во всех случаях. Например, при прокатке в фасонных калибрах он не дает правильных результатов, поскольку не учитывается влияние боковых стенок калибра.

По средней высоте удобно определять средний катающий диаметр в простых калибрах — квадратных, ромбических, круглых, овальных.

Метод определения среднего катающего диаметра по периметру часто применяют при прокатке в фасонных калибрах, когда приходится учитывать влияние трения на боковых стенках калибра.

---

[1] А. П. Чекмарев, Н. М. Санько. В сб. «Обработка металлов давлением» (ДМетИ), вып. 39. Металлургиздат, 1960, с. 127.

Этот метод пригоден также при прокатке в прямоугольных калибрах — открытых и закрытых, когда учитывают влияние боковых стенок.

Ниже определены средние катающие диаметры для отдельных калибров.

*Овальный калибр*

Средний катающий диаметр для овального калибра, рассчитанный по контактной поверхности, можно определить из формулы

$$D_{к.\,ср} = D_д + 2r_{ов}\,(1 - \cos\varphi_{ср}), \qquad (26)$$

где $D_д$ — диаметр валка по дну калибра;
$r_{ов}$ — радиус очертания овала;
$\varphi_{ср}$ — угол приложения среднего катающего диаметра, равный

$$\varphi_{ср} = 0{,}25\left(\arcsin\frac{b_{ов}}{2r_{ов}} + \arcsin\frac{c}{2r_{ов}}\right),$$

где $b_{ов}$ — ширина выходящей полосы;
$c$ — ширина (сторона) задаваемого квадрата.

Пусть овальный калибр имеет следующие размеры: $b_к = 65$ *мм*; $h_{ов} = 29$ *мм*; $r_{ов} = \dfrac{b_к^2 + (h_{ов} - s)^2}{4\,(h_{ов} - s)} = 48{,}6$ *мм*; $s = 4$ *мм*; диаметр валков $D = 500$ *мм*.

Ширина овальной полосы $b_{ов} = 64$ *мм*.

Сторона задаваемой квадратной полосы $c = 48$ *мм*.

Средний катающий диаметр, рассчитанный по контактной поверхности, определится:

$$D_{к.\,ср} = D_д + 2r_{ов}\,(1 - \cos\varphi_{ср}) = (500 - 29) +$$
$$+ 2\cdot 48{,}6\,(1 - \cos 16{,}9°) = 475{,}2\ мм.$$

$$\varphi_{ср} = 0{,}25\left(\arcsin\frac{b_{ов}}{2r_{ов}} + \arcsin\frac{c}{2r_{ов}}\right) =$$

$$= 0{,}25\left(\arcsin\frac{64}{2\cdot 48{,}6} + \arcsin\frac{48}{2\cdot 48{,}6}\right) = 16{,}9°.$$

Средний катающий диаметр, рассчитанный по средней высоте, равен (рис. 38)

$$D_{к.\,ср} = D - \frac{Q_{ов}}{b_{ов}} = 500 - \frac{1375}{64} = 478{,}5\ мм,$$

где

$$Q_{ов} = b_{ов}(h_{ов} - m) + Q_{сегм} = 64\,(29 - 24{,}2) +$$

$$+ 0{,}69 \cdot 64 \cdot 24{,}2 = 1375 \text{ мм}^2;$$

$$Q_{сегм} = k_{ср} b_{ов} m;$$

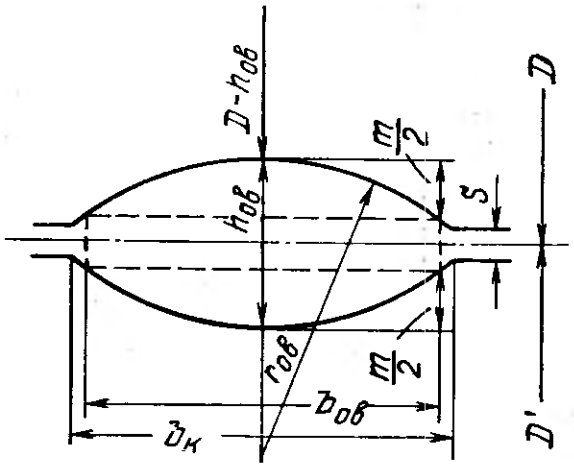



Рис. 38. К определению среднего катающего диаметра овального калибра

$$m = 2r_{ов} - 2\sqrt{r_{ов}^2 - 0{,}25c^2} = 2 \cdot 48{,}6 - 2\sqrt{48{,}6^2 - 0{,}25 \cdot 64^2} =$$

$$= 24{,}2 \text{ мм};$$

$k_{ср} = 0{,}69$ — коэффициент, определяемый по диаграмме для отношения $\frac{64}{24{,}2}$ (см. рис. 20).

Средний катающий диаметр, определенный по второму методу, несколько больше.

### *Круглый калибр*

Средний катающий диаметр, рассчитанный по контактной поверхности, равен

$$D_{к.\,ср} = D - d + 0{,}17d, \qquad (27)$$

где $D$ — начальный диаметр;

$d$ — диаметр круга.

Если взять $D = 400$ *мм* и $d = 30$ *мм*, получим

$$D_к = 400 - 30 + 0{,}17 \cdot 30 = 375{,}1 \text{ мм}.$$

Средний катающий диаметр, рассчитанный по средней высоте, равен

$$D_{к.\,ср} = D - h_{ср} = D - \frac{\pi d^2}{4d} = D - 0{,}785d = 376{,}5 \text{ мм}.$$

Разница средних катающих диаметров, полученных указанными методами, небольшая.

*Квадратный калибр*

Средний катающий диаметр, рассчитанный по контактной поверхности, равен (рис. 39)

$$D_{к.\,ср} = D - h_{кв} + 0{,}35h_{кв} = D - 0{,}65h_{кв}. \qquad (28)$$

Если принять $D = 400$ *мм* и $h_{кв} = 25$ *мм* при $c = 20$ *мм*, то

$$D_{к.\,ср} = 400 - 0{,}65 \cdot 25 = 383{,}8 \text{ мм}.$$

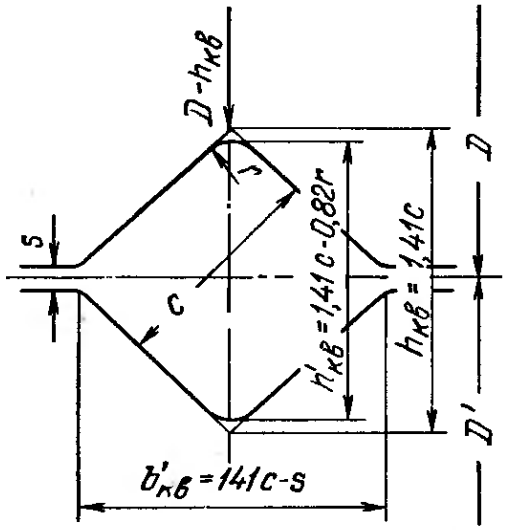



Рис. 39. К определению среднего катающего диаметра квадратного калибра

Средний катающий диаметр по средней высоте равен

$$D_{к.\,ср} = 400\frac{Q}{b_{ср}} = 400 - \frac{0{,}97 \cdot 20^2}{25} = 384{,}5 \text{ мм}.$$

*Ромбический калибр*

Средний катающий радиус, рассчитанный по контактной поверхности, для ромбического калибра при $\frac{b_р}{h_р} = 1{,}75$ и угле $\beta = 120°$ составляет

$$D_{к.\,ср} = D - h_р + 0{,}2b_р = D - h_р + 0{,}35h_р = D - 0{,}65h_р. \qquad (29)$$

Средний катающий радиус, рассчитанный по средней высоте, равен

$$D_{к.\,ср} = D_д - \frac{0{,}5b_р h_р}{b_р} = D - 0{,}5h.$$

*Прямоугольный калибр*

Средний катающий диаметр, рассчитанный по контактной поверхности, равен (рис. 40)

$$D_{к.\,ср} = D_д + \frac{a^2\delta\cos\psi}{b_д\alpha + 1{,}4\delta a}, \qquad (30)$$

где $b \approx \alpha$ — угол захвата металла валками при $b \approx b_д$;
$\psi$ — угол наклона боковых стенок;
$b_д$ — ширина по дну калибра;
$a$ — длина боковых поверхностей калибра;
$b$ — ширина полосы у зазора;
$D_д$ — диаметр по дну калибра.

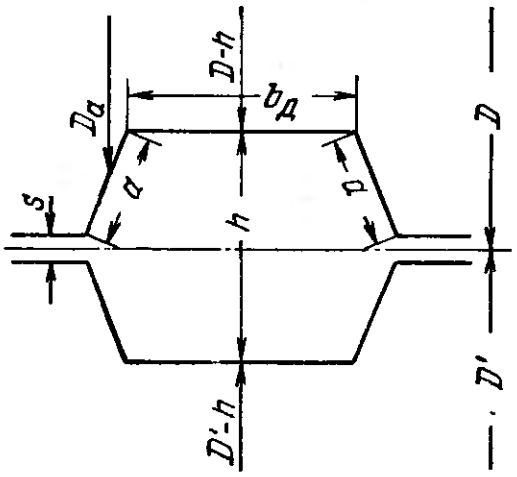



Рис. 40. К определению среднего катающего диаметра прямоугольного калибра

Средний катающий диаметр по средней высоте

$$D_{к.\,ср} = D - \frac{q}{b},$$

где $q$ — площадь прямоугольного калибра;
$b$ — ширина прямоугольной полосы.

Если рассчитать $D_{к.\,ср}$ по периметру калибра, получим

$$D_{к.\,ср} = \frac{(D-h)\,b_д + 2D_a a}{b_д + 2a},$$

где $D_a = D - s - \frac{h}{2}$ — средний диаметр по боковым стенкам калибра;
$a$ — длина боковых поверхностей калибра.

Для прямоугольных калибров лучше определять средний катающий диаметр по первому или третьему методу с учетом влияния боковых стенок калибра.

### *Фасонный калибр*

Как указывалось выше, при расчете среднего катающего диаметра для фасонных калибров приходится вводить ряд упрощений ввиду сложности определения результирующих моментов сил трения в калибре. Поэтому для фасонных калибров (балочных, швеллерных, рельсовых и др.) можно ограничиться определением среднего катающего диаметра по контуру калибра на выходе.

В этом случае имеем (рис. 41)

$$D_{\text{к. ср}} = \frac{\sum D_{\text{к}} l}{\sum l} = \frac{D_1 l_1 + D_2 l_2 + D_3 l_3 + \cdots + D_n l_n}{l_1 + l_2 + l_3 + \cdots + l_n}, \qquad (31)$$

где $l_1, l_2, l_3, \ldots, l_n$ — отрезки контура калибра;
$D_1, D_2, D_3, \ldots, D_n$ — средние катающие диаметры для каждого отрезка контура калибра.

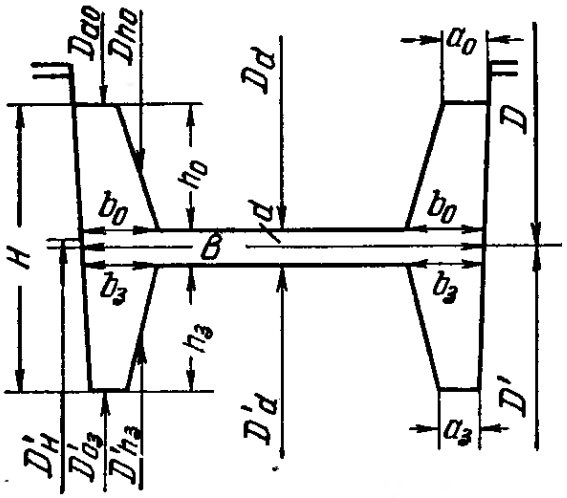



Рис. 41. К определению среднего катающего диаметра балочного калибра

Следовательно, для балочного калибра, согласно рис. 41, средний катающий диаметр со стороны открытого фланца (для верхнего валка) равен

$$D_{\text{к. о}} = \frac{2D_{h\text{о}} h_{\text{о}} + D_d (B - 2b_{\text{о}})}{2h_{\text{о}} + B - 2b_{\text{о}}},$$

где $D_{h\text{о}}$ — средний диаметр для внутренней грани открытого фланца;
$D_d$ — диаметр по стенке (шейке) калибра;
$2h_{\text{о}} + B - 2b_{\text{о}}$ — контур (периметр) калибра.

Средний катающий диаметр со стороны закрытого фланца (для нижнего валка) составит

$$D_{\text{к. з}} = \frac{2D_{\text{н}} H + 2D_{h\text{з}} h_{\text{з}} + D_d (B - 2b_{\text{з}}) + 2D_a a_{\text{з}}}{2H + 2h_{\text{з}} + B - 2b_{\text{з}} + 2a_{\text{з}}},$$

где $D_{\text{н}}, D_{h\text{з}}, D_d$ и $D_a$ — средние катающие диаметры для соответствующих отрезков контура калибра;
$2H + 2h_{\text{з}} + B - 2b_{\text{з}} + 2a_{\text{з}}$ — длина контура калибра по нижнему валку.

На рис. 42 показано графическое определение среднего катающего диаметра в балочном калибре по методу П. И. Полухина [3].

Средний катающий диаметр получим, если разделить общую площадь диаграммы на длину развернутого контура калибра.

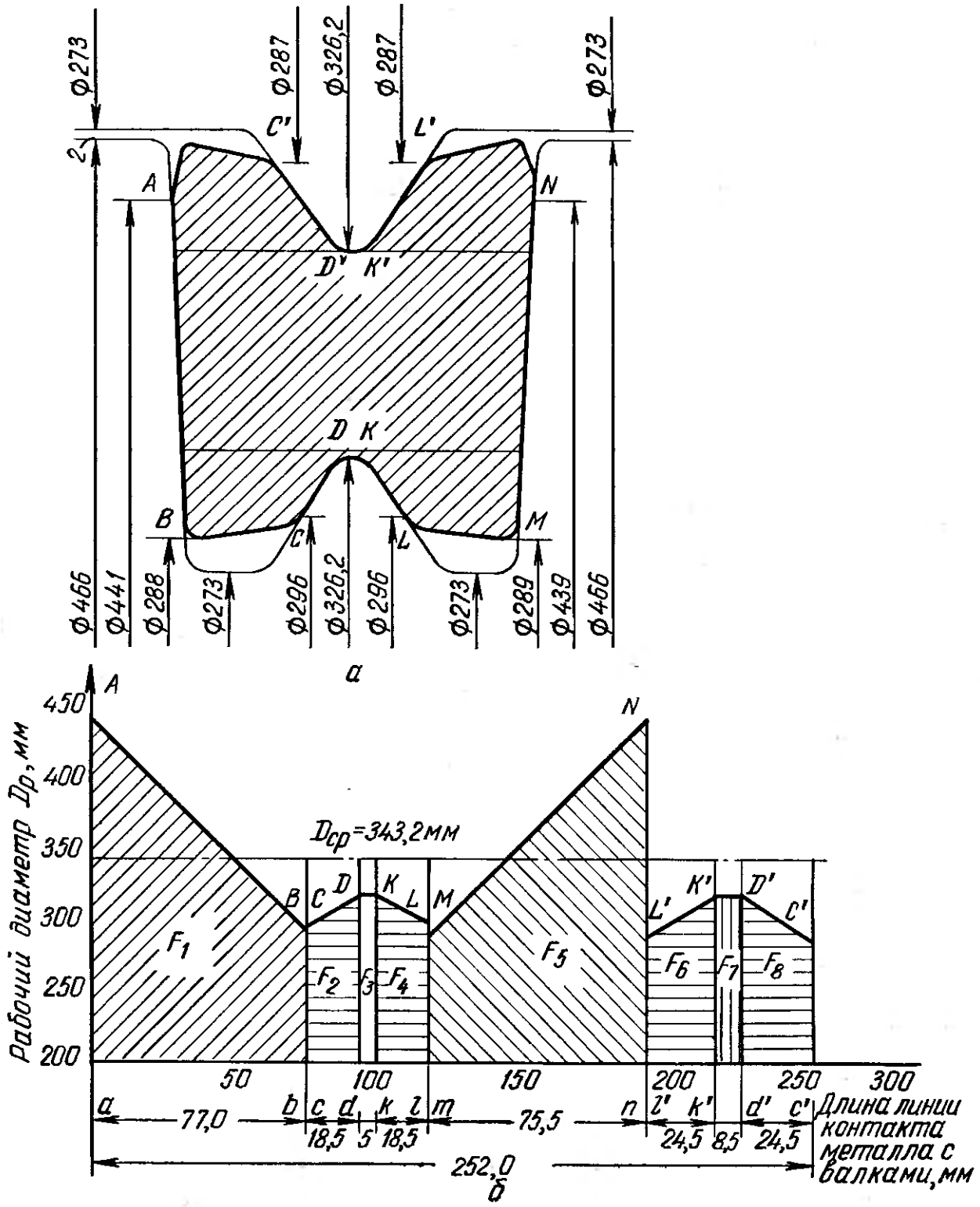



Рис. 42. К определению катающего диаметра в разрезном калибре [3]:

*а* — совмещение калибра с темплетами прокатаиной полосы; *б* — днаграмма катающих диаметров

Такое графическое построение отвечает приведенной выше формуле (31), считая давление постоянным по периметру ($k = 1$), что вполне допустимо, если иметь в виду защемление фланцев при прокатке.

## 8. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ КАЛИБРОВКИ ВАЛКОВ

Расчет калибровки валков зависит от прокатываемого профиля, типа стана и его характеристики, мощности двигателя, качества металла и ряда других факторов. Имеются общие принципы расчета калибровки, не зависящие от прокатываемого профиля, сущность которых заключается в следующем.

1. При определении числа проходов или режима обжатий следует исходить прежде всего из захватывающей способности валков, т. е. из допускаемых углов захвата.

Максимальное использование захватывающей способности валков в пределах допускаемых углов захвата является исходным критерием при выборе обжатий или вытяжек в калибрах. Допускаемые углы захвата зависят от скорости валков, качества металла, условий деформации в калибрах, состояния валков, коэффициента трения и т. д.

На основании допускаемых углов захвата устанавливают то число проходов, которое можно применить при прокатке того или другого профиля. Это число проходов приходится увеличивать, если условия прокатки лимитируются прочностью валков, мощностью двигателей или необходимостью изменить число проходов по технологическим условиям (расположение стана, четное или нечетное число проходов и т. д.).

2. При прокатке полос или фасонных профилей в первых проходах обжатия определяют в соответствии с допускаемыми углами захвата. В последующих проходах эти углы могут быть ниже допускаемых, исходя из прочности валков, мощности стана, что вынуждает снижать обжатия или коэффициенты вытяжки.

3. В чистовых и предчистовых калибрах при выборе коэффициентов вытяжек исходят не из допускаемых углов захвата или мощности стана, а из условий деформации в калибре, необходимых для получения точного профиля, а также из условий износа калибров во избежание частых перевалок или смены калибров. Обычно в чистовых калибрах ограничиваются коэффициентами вытяжки в пределах 1,1—1,2, что обеспечивает получение хорошего профиля. В предчистовых калибрах коэффициент вытяжки можно повысить до 1,25—1,35.

4. При расчете калибровки того или иного профиля следует исходить из холодного размера с учетом установленных по ГОСТу допусков. Если для профилей принят минусовый допуск $\Delta$, то следует принимать холодный размер, уменьшенный примерно на половину отрицательного допуска:

$$a_x = a - \frac{\Delta}{2} \text{ мм}.$$

Прокатка с минусовыми отклонениями обеспечивает большую экономию металла, поэтому прокатка «на минус» имеет большое народнохозяйственное значение.

Зная холодные размеры, можно определить и горячие размеры, для чего холодные размеры умножают на коэффициент линейного расширения, равный 1,012—1,015:

$$a_г = \left(a - \frac{\Delta}{2}\right)(1{,}012 \div 1{,}015).$$

5. При расчете калибровок во многих случаях удобно вести расчет от чистового калибра против хода прокатки. Расчет против хода прокатки удобен тем, что корректировку легче делать в первых по ходу прокатки калибрах (проходах), чем в последних.

6. Важное значение при расчете калибров имеет правильное определение уширения по калибрам. При этом следует различать два понятия — простор на уширение в калибрах $\Delta b_{пр}$ и фактическое уширение металла $\Delta b_ф$, определенное по формулам или графикам. Необходимо, чтобы простор на уширение был несколько больше, чем фактическое уширение, во избежание образования заусенцев и закатов.

Однако большой простор на уширение, т. е. незаполнение калибра, может приводить к искажению профиля, несоблюдению требуемых размеров и т. д. В каждом конкретном случае нужно решать, насколько допустимо незаполнение профиля. Можно считать, что металл в овальных и квадратных черновых калибрах может заполнять ширину калибра на 95—100%, т. е.

$$b_м = (0{,}95 \div 1{,}0)\ b_к,$$

где $b_м$ — ширина полосы (металла);
$b_к$ — ширина калибра.

7. При калибровке фасонных профилей (балок, швеллеров, рельсов и др.) большое значение имеет правильное деление профиля на элементы с тем, чтобы по элементам получить одинаковые вытяжки (равномерная вытяжка). При этом следует иметь в виду, что фасонный профиль получается из прямоугольного или квадратного сечения. Следовательно, неравномерная вытяжка по отдельным сечениям неизбежна. Эту неравномерность вытяжек по элементам принимают в первых проходах (по ходу прокатки), когда сечение большое, температура высокая, а не в последних.

Следует также иметь в виду, что более выгодно иметь минимальное число фасонных калибров, так как прокатка в простых черновых калибрах упрощает схему калибровки на стане, сокращает число перевалок и уменьшает парк валков. Поэтому при прокатке балок, швеллеров, угловых и других фасонных профилей следует выбирать минимально возможное число фасонных калибров, сообразуясь с диаметром валков стана, мощностью двигателей и скоростью прокатки.

8. При расчете калибровок линейных станов следует учитывать также распределение проходов по клетям с целью обеспече-

ния высокой производительности стана и равномерной загрузки клетей.

На непрерывных станах и станах с последовательным расположением клетей (зигзагообразных и шахматных) в целях использования максимальных скоростей прокатки необходимо стремиться к такой калибровке, у которой чистовой калибр приходился бы на последнюю клеть.

9. Рассчитанную калибровку необходимо проверять с точки зрения загрузки двигателей по проходам, чтобы обеспечить максимально возможные деформации по проходам при равномерной загрузке главного двигателя.

10. Важное значение имеет установление деформаций по калибрам, особенно при прокатке фасонных профилей, обеспечивающих равномерный износ калибров и максимальный срок службы валков при минимальных простоях стана, необходимых для перевалки.

Глава II

# КАЛИБРОВКА ВАЛКОВ БЛЮМИНГА И РАСЧЕТ РЕЖИМА ОБЖАТИЙ

## 1. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА БЛЮМИНГОВ

Блюминги представляют собой мощные прокатные станы, предназначенные для обжатия крупных слитков в заготовки квадратного и прямоугольного сечения — блюмы или плоского сечения — слябы.

Блюмы имеют размеры от 140×140 до 450×450 *мм* (ГОСТ 4692—57). Слябы имеют ширину 600—1500 *мм* и толщину 100—250 *мм* (ГОСТ 9137—59). Из блюмов прокатывают различные профили, из слябов — листы.

По конструкции блюминги могут быть реверсивное дуо, трио и непрерывные. Наибольшее распространение получили блюминги реверсивное дуо.

Различают реверсивные блюминги следующих типов: 1) большие блюминги с валками диаметром 1100—1300 *мм*, 2) средние блюминги с валками диаметром 1000 *мм*; 3) малые блюминги с валками диаметром 850—900 *мм*.

На современных металлургических заводах устанавливают большие блюминги. На ряде заводов — Коммунарском, Череповецком и Криворожском работают блюминги 1150 конструкции УЗТМ. Эти блюминги могут прокатывать слитки массой 7—13 *т* в блюмы сечением до 350×350 *мм* или слябы шириной до 1500 *мм* и толщиной до 250 *мм*.

Блюминг 1150 приводится в движение от двух двигателей мощностью 3310÷4560 *квт* каждый при $n = 0 \pm 50 \pm 120$ *об/мин*. На блюминге 1150 можно прокатать 3,5 млн. и более тонн слитков в год. Если на блюминге прокатывают блюмы и слябы, то его называют блюминг-слябинг.

Еще более мощным блюмингом является блюминг конструкции УЗТМ с валками диаметром 1300 *мм*. На таком блюминге можно прокатывать слитки массой 12,5 *т* и более в блюмы сечением до 400×400 *мм*. Блюминг приводится в движение от двух двигателей мощностью по 6800 *квт*. Производительность блюминга составляет 5—6 млн. *т* слитков в год. На рис. 43 приведена схема расположения оборудования блюминга 1300, из которой видно, что нагревательные колодцы расположены в поперечных пролетах, причем

подача слитков осуществляется по кольцевому пути при помощи нескольких слитковозов.

За блюмингом установлена машина огневой зачистки, на которой удаляют поверхностные дефекты в потоке снятием слоя металла толщиной 1,5—2,0 *мм*. Далее блюм поступает к ножницам усилием 1250 *Т* (12 250 *кн*), после чего направляется к непрерывному заготовочному стану 900/700/500.

На наших заводах имеются средние блюминги с диаметром валков 1000 *мм*. Блюминг 1000 современной конструкции работает на Руставском металлургическом заводе.

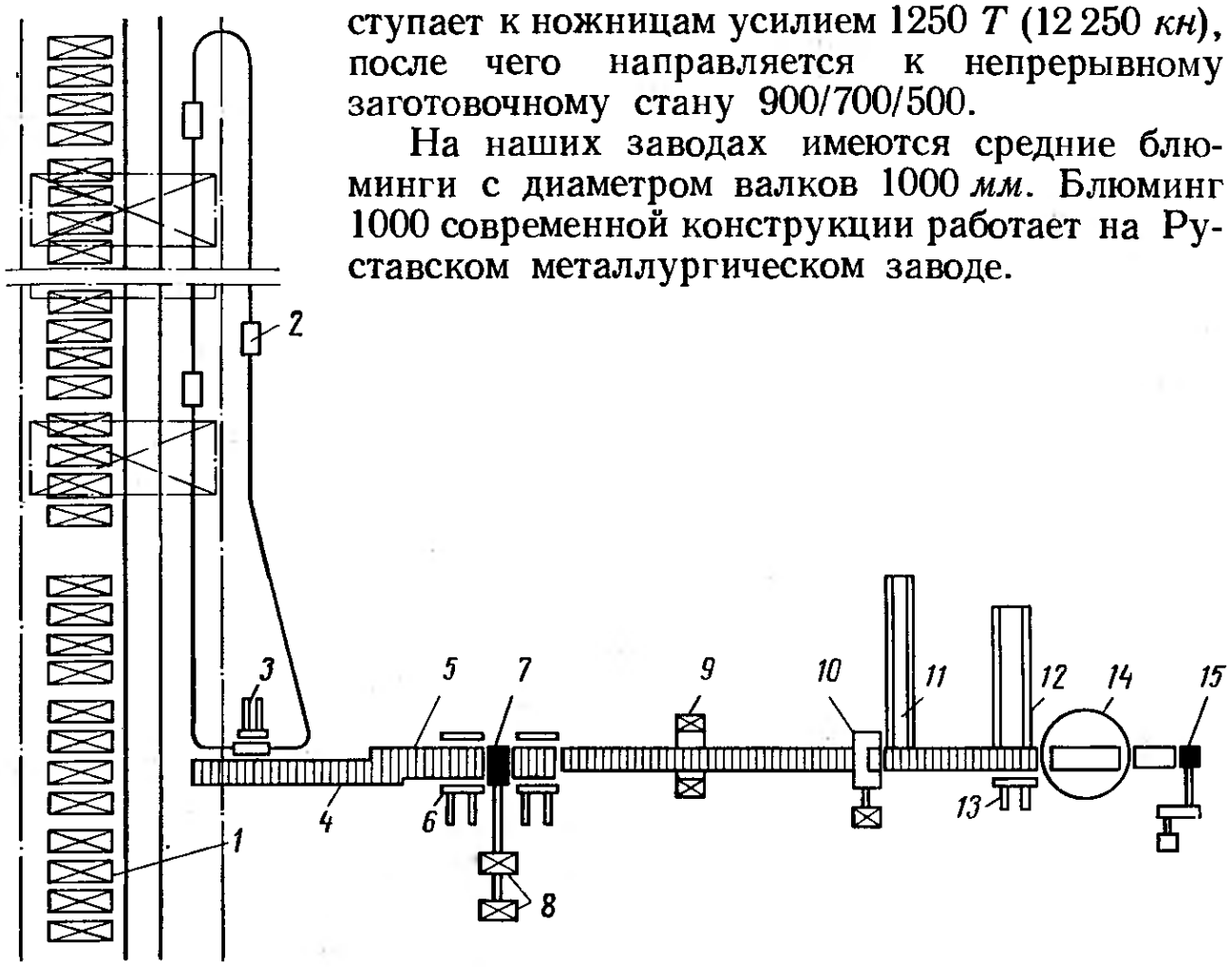



Рис. 43. Схема расположения оборудования блюминга 1300 Криворожского металлургического завода:

*1* — нагревательные колодцы; *2* — слитковоз; *3* — сталкиватель; *4* — приемный рольганг; *5* — рабочий рольганг; *6* — манипулятор с кантователем; *7* — рабочая клеть; *8* — двигатель; *9* — машина огневой зачистки; *10* — ножницы; *11* — конвейер уборки обрезков; *12* — конвейер уборки слябов; *13* — сталкиватель; *14* — поворотный стол; *15* — первая клеть непрерывного заготовочного стана

Малые блюминги часто применяют для прокатки качественных сталей. Они входят в состав рельсо-балочных, крупносортных и трубозаготовочных станов в качестве обжимных клетей, на которых производится дальнейшее обжатие блюмов, поступающих от большого блюминга. Иногда блюминг 900 устанавливают за большим блюмингом, в этом случае он работает как заготовочный стан.

В табл. 8 приведены заводские данные прокатки на отечественных блюмингах.

Таблица 8

## Заводские данные прокатки на блюмингах

| Завод | Диаметр валков, *мм* | Слиток: размеры утолщенной части, *мм* | Слиток: масса *m* | Размеры сечения блюма или сляба, *мм* | Число проходов | $\Delta h_{ср}$ | Новые валки: $D_{к.ср}$ *мм* | Новые валки: $\alpha_{ср}$ *мм* | Валки после переточки: $D_{к.ср}$ *мм* | Валки после переточки: $\alpha_{ср}$ *мм* | $k_{ср}=\frac{\sum \Delta b}{\sum \Delta h}$ | $k=\frac{\sum \Delta b}{h_0-h_n+b_0-b_n}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| «Азовсталь» . . . . | 1170 | 670×730 | 7,2 | 325×333 | 9 | 100 | 1005 | 26 | 830 | 27,5 | 0,176 | 0,213 |
| | | 770×855 | 9,76 | 330×330 | 15 | 81 | | 23,5 | | 24,5 | 0,206 | 0,25 |
| КМК . . . . . | 1100—1200 | 720×760 | 6,9 | 320×330 | 11 | 80 | 1030 | 23 | 900 | 25,5 | 0,114 | 0,120 |
| | | 675×765 | 7,2 | 320×330 | 13 | 71 | | 20 | | 21 | 0,158 | 0,232 |
| ММК . . . . . | 1150 (№ 2) | 640×810 | 7,05 | 315×345 | 13 | 72 | 965 | 23 | 845 | 24 | 0,155 | 0,184 |
| | | 680×760 | 6,8 | 290×300 | 15 | 69 | | 22 | | 23 | 0,179 | 0,218 |
| НТМК . . . . . | 1150 | 700×790 | 7,0 | 320×320 | 9 | 103 | 1015 | 26 | 895 | 27,5 | 0,081 | 0,088 |
| | | 680×810 | 7,14 | 320×320 | 11 | 86 | | 24 | | 25 | 0,105 | 0,118 |
| Макеевский . . . . | 1150 | 700×770 | 7,0 | 300×320 | 11 | 88 | 1005 | 24 | 885 | 26 | 0,103 | 0,115 |
| | | 670×750 | 7,0 | 300×320 | 11 | 83 | | 23,5 | | 25 | 0,121 | 0,138 |
| Им. Дзержинского | 1150 | 700×770 | 7,0 | 270×300 | 13 | 83 | 995 | 24 | 870 | 25 | 0,162 | 0,192 |
| | | 716×816 | 7,4 | 270×300 | 15 | 82 | | 23,5 | | 25 | 0,218 | 0,278 |
| Криворожский . . . | 1150 | 735×815 | 8,0 | 290×300 | 13 | 88 | 1010 | 24 | 885 | 26 | 0,161 | 0,193 |
| | | 720×825 | 8,5 | 290×300 | 13 | 87 | | 24 | | 26 | 0,159 | 0,189 |
| Криворожский . . . | 1300 | 735×815 | 8,0 | 300×300 | 13 | 91 | 1115 | 23,5 | 985 | 24,5 | 0,195 | 0,241 |
| | | 720×825 | 8,5 | 360×360 | 9 | 109 | | 25,5 | | 27 | 0,158 | 0,188 |
| Криворожский . . . | 1300 | 825×960 | 12,5 | 320×320 | 15 | 93 | 1115 | 23,5 | 985 | 25 | 0,179 | 0,218 |
| | | 820×920 | 12,5 | 360×360 | 13 | 95 | | 24 | | 25,5 | 0,161 | 0,191 |
| Коммунарский . . . | 1150 | 790×1410 | 12 | 120×1200 | 21 | 47 | 1015 | 17,5 | 895 | 19 | 0,102 | 0,114 |
| | | 860×780 | 8 | 300×300 | 9 | 60 | | 20,0 | | 21 | 0,172 | 0,188 |

Примечания: 1. В числителе приведены данные для кипящей стали, в знаменателе — для спокойной.
2. Средний катающий диаметр получен как сумма катающих диаметров, деленная на число калибров.
3. Средний угол захвата округлен до 0,5°.
4. $\alpha_{ср}$ — средний угол захвата при среднем обжатии $\Delta h_{ср}$ и среднем диаметре валков $D_{к.ср}$.

## 2. СХЕМА ПРОКАТКИ И ПОРЯДОК КАНТОВКИ НА БЛЮМИНГЕ

Валки блюминга имеют обычно 4—5 прямоугольных калибров. Поднимая или опуская верхний валок, можно получить разную высоту калибра, так что в одном калибре слиток (раскат) может обжиматься в несколько проходов. В тех случаях, когда блюминг обслуживает рельсо-балочный стан, последний калибр на валках может иметь фасонную двутавровую форму (разрезной калибр) для получения фигурной заготовки, из которой на рельсо-балочном стане прокатывают крупные балки или швеллеры.

Первый калибр валков блюминга называют часто бочкой, так как его делают широким с небольшим врезом, чтобы иметь возможность прокатывать на нем слябы. Если на блюминге не прокатывают слябы, то первый калибр делают высотой до 200—220 *мм*.

На рис. 44 приведены калибровки валков блюмингов отечественных заводов. Как видно из рис. 44, *а* и *в*, первый калибр (бочку) обычно располагают на краю валков; последующие калибры соответственно меньшей ширины располагают по ходу прокатки. Последовательное расположение калибров имеет то преимущество, что раскат по мере прокатки перемещается в одном направлении, и поэтому паузы получаются меньшими. Однако при последовательном расположении калибров подшипники валков нагружены неравномерно. Встречается также такое расположение, когда первый калибр (бочка) находится посередине валка (рис. 44, *б*). В конкретных случаях такое расположение калибров вполне себя оправдывает, особенно при прокатке слябов.

Прокатку слитка на блюминге ведут сначала в первом, а затем в следующих калибрах [1] и по мере уменьшения сечения слиток кантуют, чтобы обжимать поочередно одну и другую стороны. В зависимости от качества металла, т. е. от склонности стали давать трещины, от геометрических соотношений размеров раската, а также от ширины калибра кантовку производят через два, четыре и даже шесть проходов.

Следует иметь в виду, что операция кантовки требует времени, поэтому стремятся число кантовок сократить до минимума, хотя это нередко приводит к снижению качества проката. При выборе числа и порядка кантовок необходимо учитывать все факторы, чтобы наряду с высокой производительностью обеспечить высокое качество металла.

Выбирая число и порядок кантовок при прокатке на блюминге, необходимо учитывать следующие соображения [13—16]:

---

[1] В дальнейшем самый широкий калибр (бочку) будем называть первым калибром независимо от того, расположен он на краю или посередине валков. Остальные калибры будем нумеровать в соответствии с уменьшением ширины калибра.

1. В зависимости от качества и марки стали (ее пластичности) кантовки в калибрах *I* и *II* выбирают через четыре или два прохода.

2. После первых двух проходов в первом калибре рекомендуется делать кантовку, особенно при прокатке ответственных

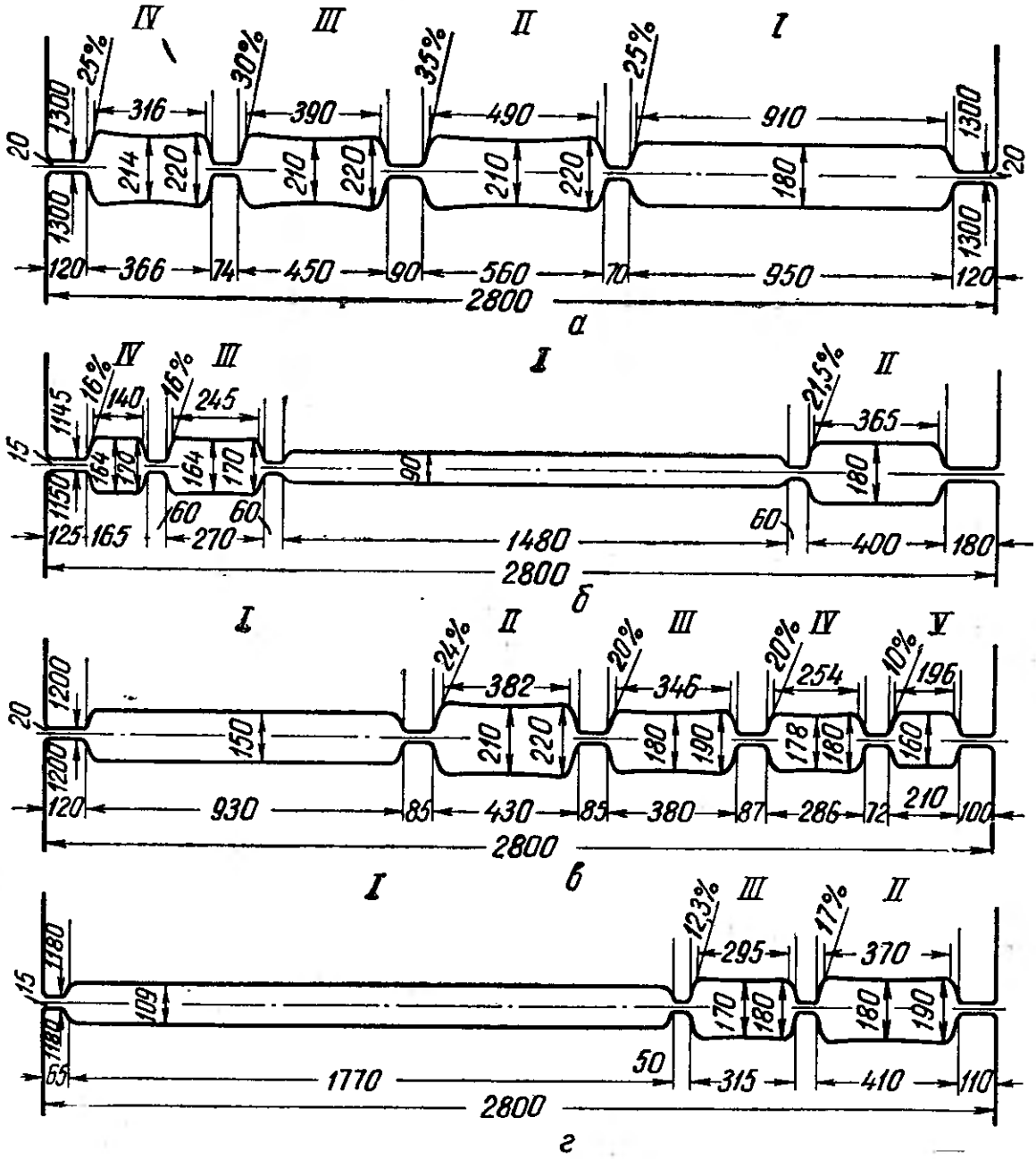



Рис. 44. Калибровки валков отечественных блюмингов:

*а* — 1300, завод «Криворожсталь»;
*б* — 1500, Коммунарский металлургический завод;
*в* — 1150, завод «Криворожсталь»; *г* — 1150, Череповецкий металлургический завод

сталей, например рельсовой или трубной заготовки. При прокатке мягкой стали первую кантовку делают после четырех и даже шести проходов, чтобы уменьшить общее число кантовок. В каждом конкретном случае, базируясь на надежные практические режимы прокатки, устанавливают число проходов до первой кантовки.

3. При прокатке в калибре *I* кантовку устанавливают также в зависимости от соотношения ширины и высоты раската во избе-

жание его перекоса, т. е. образования ромбовидной формы. Если после нескольких обжатий в калибре *I* отношение $b/h$ достигает значения примерно 1,3, то при дальнейшей прокатке в этом же калибре (на бочке) рекомендуется сделать кантовку. Если раскат будет задаваться в следующий калибр, то отношение $b/h$ может достигать значений 1,7—1,8, так как в этом случае стенки калибра надежно удерживают раскат.

4. В случае опасности переполнения калибра, например калибра *II* после четырех проходов без кантовки, приходится делать кантовку после двух проходов. Чтобы не иметь лишней кантовки, на практике 4-й проход делают в калибре *I*. Такой способ прокатки не вызывает осложнений, если калибр *I* расположен посередине длины валка, так как в этом случае приходится перемещать раскат из калибра *II* в калибр *III*, минуя калибр *I* (бочку). Поэтому несложно 4-й проход сделать на бочке, а затем передать раскат в калибр *III*.

5. Так как каждый последующий калибр у́же предыдущего, при задаче раската в следующий калибр обычно делают кантовку.

В табл. 9 приведены схемы прокатки и кантовки, которые применяют на отечественных блюмингах. Хотя приведенные схемы

Таблица 9

**Основные схемы прокатки на блюминге (номера проходов в калибрах)**

| Схема прокатки | Калибры | | | | | Всего проходов |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | *I* (бочка) | *II* | *III* | *IV* | *V* | |
| I | 1, 2, 3, 4 | ×5, 6, 7, 8 | ×9 | — | — | 9 |
| I | 1, 2×3, 4, 5, 6 | ×7, 8, 9, 10 | ×11 | — | — | 11 |
| II | 1, 2, 3, 4, 5, 6 | ×7, 8, 9, 10 | ×11 | — | — | 11 |
| IV | 1, 2×3, 4, 5, 6, 7, 8 | ×9, 10, 11, 12 | ×13 | — | — | 13 |
| V | 1, 2, 3, 4×5, 6, 7, 8 | ×9, 10, 11, 12 | ×13 | — | — | 13 |
| VI | 1, 2 | ×3, 4, 5, 6 | ×7, 8 | ×9 | — | 9 |
| VII | 1, 2, 3, 4 | ×5, 6, 7, 8 | ×9, 10 | ×11 | — | 11 |
| VIII | 1, 2×3, 4, 5, 6 | ×7, 8, 9, 10 | ×11, 12 | ×13 | — | 13 |
| IX | 1, 2, 3, 4, 5, 6 | ×7, 8, 9, 10 | ×11, 12 | ×13 | — | 13 |
| X | 1, 2×3, 4, 5, 6, 7, 8 | ×9, 10, 11, 12 | ×13, 14 | ×15 | — | 15 |
| XI | 1, 2, 3, 4×5, 6, 7, 8 | ×9, 10, 11, 12 | ×13, 14 | ×15 | — | 15 |
| XII | 1, 2×3, 4, 5, 6 | ×7, 8, 9, 10 | ×11, 12 | ×13, 14 | ×15 | 15 |
| XIII | 1, 2, 3, 4, 5, 6 | ×7, 8, 9, 10 | ×11, 12 | ×13, 14 | ×15 | 15 |
| XIV | 1, 2×3, 4, 5, 6, 7, 8 | ×9, 10, 11, 12 | ×13, 14 | ×15, 16 | ×17 | 17 |
| XV | 1, 2, 3, 4×5, 6, 7, 8 | ×9, 10, 11, 12 | ×13, 14 | ×15, 16 | ×17 | 17 |

Примечание. Кантовки показаны знаком ×.

не исчерпывают всех возможных случаев прокатки на блюмингах, данные, приведенные в табл. 9, могут служить руководством при расчете режима обжатий.

Из табл. 9 видно, что в калибре *I* обычно дают 6 или 8 проходов, причем после первых двух проходов делают кантовку. Как указывалось выше, для мягкой стали на практике ведут прокатку в калибре *I* с кантовкой после шести проходов.

В калибре *II* обычно дают четыре прохода; в случае переполнения калибра возможна кантовка после двух проходов.

Выпускными являются калибры *III*, *IV* и *V* в зависимости от конечного сечения блюма. Чем меньше сечение блюма, тем больше число проходов требуется при прокатке. Если в калибрах *III* и *IV* получают конечное сечение, то в этих калибрах обычно дают два прохода и перед задачей в следующий калибр делают кантовку.

Общее число проходов колеблется от 9 до 17.

### 3. УГЛЫ ЗАХВАТА ПРИ ПРОКАТКЕ НА БЛЮМИНГЕ

При расчете режима обжатий необходимо учитывать следующие лимитирующие факторы: а) допускаемые углы захвата, б) мощность двигателя, в) прочность валков.

При расчете режима обжатий за основу обычно принимают первый фактор — допускаемые углы захвата, чтобы обеспечить максимальные обжатия по проходам, меньшее их число и высокую производительность блюминга.

На блюмингах устанавливают двигатели большой мощности. На блюмингах, где мощности двигателей были невысокие, например 5140 *квт* (7000 *л. с.*), за последнее время установлены двигатели мощностью 7350—9000 *квт* (10 000—12 000 *л. с.*), так что в большинстве случаев мощности двигателей на блюмингах обеспечивают прокатку с максимально допускаемыми обжатиями.

Что касается прочности валков, то, имея определенный режим обжатий, всегда можно сделать поверочный расчет прочности валков во избежание поломок последних при больших обжатиях. Это может иметь место при прокатке на блюминге широких слябов, когда приходится выбирать обжатия меньше допускаемых по углу захвата, исходя из прочности валков.

Таким образом, в основу расчета положен принцип выбора обжатий по допускаемым углам захвата.

На основе проведенных исследований для рядовых марок стали угол захвата составляет 25—27°, в среднем 26°, если исходить из среднего обжатия за всю прокатку слитка в готовое сечение блюма. При прокатке специальных сталей средний угол захвата следует снизить до 24—25°. Эти углы захвата будем относить к диаметру валков после переточки, когда начальный диаметр будет на 10% меньше диаметра новых валков, отвечающего диаметру стана.

При уточнении обжатий по отдельным проходам и калибрам необходимо руководствоваться углами захвата в зависимости от размеров калибра, состояния их поверхности и скорости прокатки.

Для этой цели можно пользоваться данными В. А. Тягунова [17], приведенными в табл. 10.

Таблица 10

**Углы захвата при прокатке на блюминге [17]**

| Вид калибра | Углы захвата (град.) при окружной скорости, *м/сек* | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0 | 0,5 | 1,0 | 1,5 | 2,0 | 2,5 | 3,0 | 3,5 |
| Гладкая бочка . . . | 25,5 | 24,5 | 23,5 | 22,5 | 19,5 | 16 | — | — |
| Стесненные калибры | 29,0 | 27,5 | 26,0 | 24,5 | 21 | 17 | 12 | — |
| Калибры с насечкой | 33 | 32 | 31 | 30 | 28 | 26 | 24 | 21 |

Как видно из табл. 10, в стесненных калибрах (*II*, *III*, *IV* и *V*) углы захвата могут достигать значительных величин, обеспечивая этим большие обжатия.

На гладкой бочке, т. е. в калибре *I*, углы захвата получаются меньше средних значений, которые были указаны выше. Чтобы снизить обжатие при прокатке на гладкой бочке, будем поступать следующим образом.

После выбора обжатий по среднему углу захвата увеличиваем обжатие в тех проходах, где снимается конусность слитка, т. е. в первом проходе и после первой кантовки, при этом соответственно снизятся обжатия для остальных проходов в калибре *I*.

Как будет показано ниже, при корректировке обжатий по проходам после составления предварительного режима обжатий следует учитывать углы захвата, допускаемые в отдельных калибрах при разных скоростях прокатки. При проверке допускаемых углов захвата можно руководствоваться также эмпирической зависимостью коэффициента трения при захвате от скорости и температуры прокатки [3]:

$$f_з = k_1 k_2 k_3 (1{,}05 - 0{,}0005t),$$

где $k_1 = 1$ — для стальных валков и $k_1 = 0{,}8$ для чугунных;
$k_3 = 1$ — для углеродистых сталей и $k_3 = 0{,}8 \div 0{,}9$ для высокоуглеродистых;

$k_2$ учитывает влияние скоростей прокатки на коэффициент трения при захвате, значения которого следующие:

| $k_2$ | Скорость, *м/сек* | $k_2$ | Скорость, *м/сек* |
|---|---|---|---|
| 1 | 0—2 | 0,57 | 7 |
| 0,93 | 3 | 0,50 | 10 |
| 0,76 | 4 | 0,41 | 20 |
| 0,67 | 5 | 0,39 | 30 |

На рис. 45 приведены кривые зависимости угла захвата от температуры и скорости прокатки, построенные по указанной формуле для $k_1 = 1$ (стальные валки), $k_1 = 0{,}8$ (чугунные валки) и $k_2 = 1$

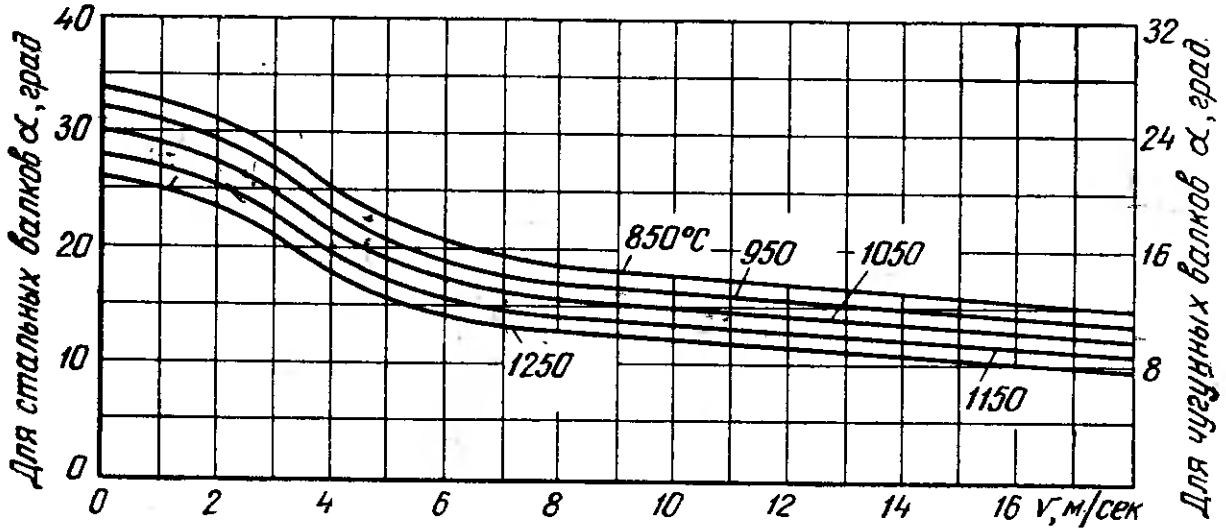



Рис. 45. Зависимость угла захвата от температуры и скорости прокатки

(углеродистая сталь). При построении кривых принято, что $f_з = \operatorname{tg}\alpha$ и что для углов до $\alpha \approx 25°$ существует пропорциональная зависимость между $f_з$ и углом захвата $\alpha$.

## 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УШИРЕНИЯ ПРИ ПРОКАТКЕ НА БЛЮМИНГЕ

При прокатке на блюминге происходит неравномерная деформация по высоте, в результате чего и уширение по высоте раската распределяется неравномерно. На основе исследований получены количественные зависимости уширения при прокатке на блюминге от различных факторов [13, 14].

При $\frac{H}{D_к} > 0{,}45$ наблюдается двойное бочкообразование боковых поверхностей раската [1], причем максимальное уширение приходится примерно на $0{,}9\Delta h$ от контактной поверхности (рис. 46). Чем больше высота слитка, тем сильнее проявляется двойное бочкообразование раската.

Показатель уширения $\Delta b/\Delta h$ зависит от отношения высоты раската $H$ к длине очага деформации $l_д$. Чем больше $H/l_д$, тем сильнее происходит двойное бочкообразование раската. При $\frac{H}{l_д} \approx 5$ показатель уширения у контактной поверхности составляет $\frac{\Delta b}{\Delta h} \approx 0{,}5$, при $\frac{H}{l_д} \approx 1{,}8$ получается равномерное уширение с показателем уширения $\frac{\Delta b}{\Delta h} \approx 0{,}3$.

[1] В. М. Клименко. Прокатное производство. Труды ИЧМ, т. 11. Изд-во АН УССР, 1957, с. 98.

На рис. 47 приведены области зависимости показателей уширения $k_{max}$ и $k_ц$ от $\frac{H}{l_д}$, полученные по результатам исследования при прокатке слитков из сталей МСт.3сп, МСт.3кп, МСт.5 и других на бочке в валках блюминга завода им. Дзержинского.

Как показали исследования, двойное бочкообразование получается при $\frac{H}{l_д} > 2$; при $\frac{H}{l_д} = 1{,}8 \div 1{,}3$ уширение по высоте примерно равномерное, наконец, при $\frac{H}{l_д} < 1$ получается заметное одинарное бочкообразование.

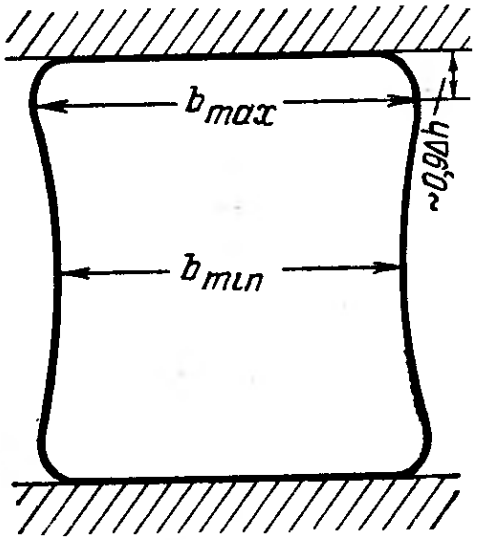



Рис. 46. Уширение металла при прокатке на блюминге

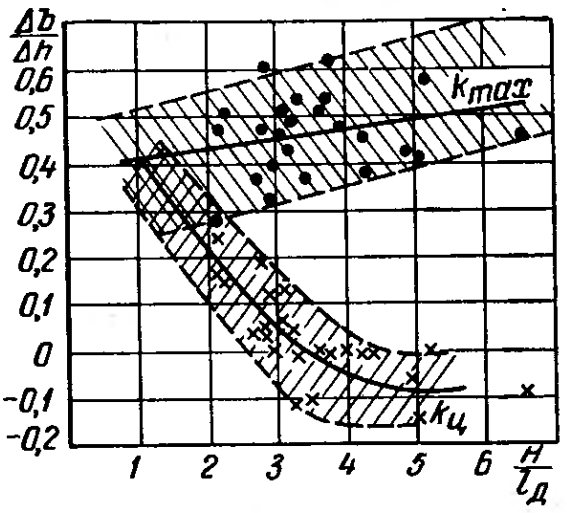



Рис. 47. Зависимость показателей уширеиия $k_{max}$ и $k_ц$ от $H/l_д$ для блюмингов (по данным В. М. Клименко)

Среднее уширение при прокатке на блюминге можно определить по формуле А. П. Чекмарева.

Расчет уширения при прокатке на блюминге связан с известными трудностями, поскольку условия деформации на гладкой бочке отличаются от условий прокатки в следующих калибрах.

При прокатке на гладкой бочке (калибр I) со свободным уширением в зависимости от отношения $\frac{H}{l_д}$ может быть двойное бочкообразование, равномерное уширение и, наконец, одинарное бочкообразование при $\frac{H}{l_д} < 1$.

С другой стороны, в калибрах обычно прокатку ведут со стесненным уширением (защемлением), в этом случае уширение составляет 70—80% от свободного уширения.

Учитывая, что на блюминге размеры округляются до 5 *мм*, а также для обеспечения надежного захвата после кантовки, будем определять свободное уширение по приведенным выше формулам (см. гл. I).

Следует иметь в виду, что при прокатке в калибре I (на бочке), когда $\frac{H}{D_к} = 0{,}5 \div 0{,}9$, получается двойное бочкообразование боковых граней раската, что приводит к увеличению углов захвата после кантовки. Поэтому при прокатке на бочке следует применять меньшие углы захвата, чем в остальных калибрах, в которых прокатку ведут с защемлением, и уширение по высоте раската развивается примерно равномерно.

## 5. МЕТОДИКА РАСЧЕТА РЕЖИМА ОБЖАТИЙ НА БЛЮМИНГЕ

За основу при выборе режима обжатий принят главный лимитирующий фактор — допускаемые углы захвата. Что касается других лимитирующих факторов — мощности двигателя и прочности валков, то после разработки режима обжатий можно делать соответствующие проверочные расчеты.

Общий ход расчета режима обжатий при прокатке на блюминге следующий:

1. Устанавливаем исходные данные: начальный диаметр валков $D$; размеры слитка, т. е. сечение по верху и по низу, длину слитка; марку стали; конечное сечение блюма; размеры блюмов и слябов, прокатываемых на блюминге.

2. Задаемся средним допускаемым углом захвата. Исходя из данных передовых заводов (см. табл. 8), принимаем для рядовых сталей угол захвата $\alpha = 25 \div 27°$, в среднем 26°. При прокатке специальных сталей средний угол захвата равен 24—25°.

3. Находим средний катающий диаметр валков с учетом уменьшения его после переточек. На основе практических данных калибровок валков (см. рис. 44) устанавливаем, в каких калибрах будет производиться прокатка, и выбираем предварительно высоты калибров, исходя из того, будут ли прокатываться только блюмы или намечается также прокатка слябов.

Если, например, прокатка будет производиться в четырех калибрах с высотами $h_{к1}$, $h_{к2}$, $h_{к3}$ и $h_{к4}$ (о размерах калибров см. ниже), то средняя высота калибров будет равна

$$h_{к.ср} = \frac{h_{к1} + h_{к2} + h_{к3} + h_{к4}}{4}.$$

Принимая общую величину переточек равной 10%, получим средний катающий диаметр для всех калибров

$$D_{к.ср} = 0{,}9D - h_{к.ср},$$

где $D$ — начальный диаметр валков блюминга.

4. Находим среднее обжатие, исходя из среднего катающего диаметра валков и среднего угла захвата. Если принять $\alpha \approx 26°$,

то среднее обжатие составляет

$$\Delta h_{ср} = D_{к.ср}\,(1 - \cos 26°) \approx 0{,}1 D_{к.ср}.$$

При $\alpha = 24 \div 25°$, или в среднем при $\alpha = 24{,}5°$, среднее обжатие равно

$$\Delta h_{ср} = D_{к.ср}\,(1 - \cos 24{,}5°) = 0{,}09 D_{к.ср}.$$

5. Находим суммарное обжатие по одной и другой сторонам раската:

$$\sum \Delta h_H = h_0 - h_n + k\,(b_0 - b_n);$$

$$\sum \Delta h_B = b_0 - b_n + k\,(h_0 - h_n).$$

Слагаемые $k\,(b_0 - b_n)$ или $k\,(h_0 - h_n)$ учитывают суммарное уширение раската по одной и другой сторонам, которое необходимо дополнительно обжимать при прокатке на блюминге.

Коэффициент $k$ представляет собой условный показатель уширения (рис. 48):

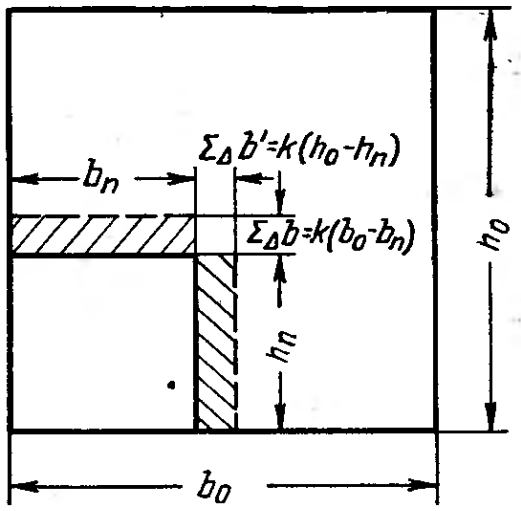



Рис. 48. К определению дополнительного обжатия за счет уширения слитка

$$k = \frac{\sum \Delta b}{b_0 - b_n}$$ — при обжатии по стороне $B$;

$$k = \frac{\sum \Delta b'}{h_0 - h_n}$$ — при обжатии по стороне $H$.

Обычно $k = 0{,}1 \div 0{,}25$. В наших расчетах будем принимать $k = 0{,}15$, что обеспечивает вполне надежные результаты, необходимые для установления предварительного режима обжатий.

6. Определив суммарное обжатие по каждой стороне и среднее обжатие за проход, находим число проходов для каждой стороны, уточняем число проходов, чтобы получились целые числа, а в сумме нечетное число проходов. Зная число проходов, окончательно устанавливаем обжатия по проходам, округляя значения обжатий до 5 *мм*.

7. Устанавливаем порядок кантовок и схему прокатки, руководствуясь данными, приведенными в табл. 9.

8. Рассчитываем режим обжатий, причем для каждого прохода определяем по формуле уширение. Составляем предварительную таблицу режима обжатий по форме, которая приведена в примерном расчете.

9. Корректируем полученный режим обжатий. Необходимо в последнем проходе получить заданные размеры блюмов, что потребует некоторого изменения обжатий в предыдущих проходах. Используя возможности увеличения обжатий при снятии конусности (значение начальных размеров $h_0$ и $b_0$ берут по утол-

щенной части слитка), можно снизить обжатия в остальных проходах, которые ведут на гладкой бочке.

Как указывалось выше, в калибрах *II* и *III*, где прокатку ведут с защемлением, в случае необходимости обжатия могут быть больше принятого среднего обжатия $\Delta h_{ср}$, но с учетом допускаемого угла захвата.

Наконец, приходится изменять обжатия для того, чтобы не было переполнения калибров. Необходимо уточнять размеры калибров по ширине, чтобы увязать принятую калибровку валков с выбранным режимом обжатий и имеющимся простором на уширение в калибрах.

10. Составляем окончательный режим обжатий, данные заносим в таблицу. Разрабатываем калибровку валков, т. е. построение калибров и размещение их на валках.

На примерных расчетах режима обжатий ниже рассмотрены отдельные вопросы, связанные с определением обжатий и их корректировкой.

## Примерный расчет режима обжатий на блюминге

*Пример 1.* Прокатка на блюминге с валками диаметром 1150 *мм*.

Исходные данные: размеры слитка $\frac{815\times735}{755\times675}\times 2100$ *мм*, масса $G = 8$ *т*, сталь кипящая, углеродистая Ст.3 (ГОСТ 380—60); конечное сечение блюма $285\times285$ *мм*.

Кроме того, необходимо предусмотреть прокатку блюмов $250\times250$ *мм* и слябов $150\times800$ *мм*.

Начальный диаметр валков $D = 1150$ *мм*, длина бочки $L_б = 2800$ *мм*.

1. Для предварительного определения режима обжатий выбираем на основе заводских данных ориентировочно число калибров и их размеры. Очевидно, на валках будет всего пять калибров с учетом прокатки блюма минимального сечения $250\times250$ *мм*. Высота калибра *I* должна быть равной примерно 140 *мм*, тогда для остальных калибров соответственно $h_{к2} \approx 200$ *мм* и $h_{к3} \approx \approx h_{к4} = h_{к5} = 180$ *мм*. Получить блюм $285\times285$ *мм* можно в четырех калибрах. Средняя высота калибров равна

$$h_{к.\,ср} = \frac{140 + 200 + 2\cdot180}{4} = 175 \text{ мм}.$$

Средний катающий диаметр валков после переточки на 10% равен

$$D_{к.\,ср} = 0{,}9D - h_{к.\,ср} = 0{,}9 \times 1150 - 175 = 860 \text{ мм}.$$

2. Среднее обжатие можно определить, задавшись для мягкой кипящей стали углом захвата $\alpha_{ср} = 26°$. Тогда

$$\Delta h_{ср} = D_{к.\,ср}\,(1 - \cos\alpha_{ср}) = 860\,(1 - \cos 26°) \approx$$
$$\approx 0{,}1 \times 860 = 86\ мм.$$

3. Находим суммарное обжатие по одной и другой стороне, пользуясь приведенными выше формулами:

$$\sum \Delta h_H = h_0 - h_n + 0{,}15\,(b_0 - b_n) =$$
$$= 815 - 285 + 0{,}15\,(735 - 285) = 530 + 67 = 597\ мм;$$

$$\sum \Delta h_B = b_0 - b_n + 0{,}15\,(h_0 - h_n) = 735 - 285 +$$
$$+ 0{,}15\,(815 - 285) = 450 + 80 = 530\ мм.$$

Принимаем средний показатель уширения $k = 0{,}15$.

4. Находим число проходов для каждой стороны:

$$n_H = \frac{597}{86} = 6{,}9; \quad n_B = \frac{530}{86} = 6{,}1$$

Принимаем 13 проходов, причем сторона $H$ будет обжата за 7, а сторона $B$ — за 6 проходов. В этом случае средние обжатия по сторонам $H$ и $B$ будут равны:

$$\Delta h_{срH} = \frac{597}{7} = 85\ мм;$$

$$\Delta h_{срB} = \frac{530}{6} = 88\ мм.$$

Обжатие округляем до 5 *мм*, т. е. принимаем среднее обжатие равным 85 *мм* по стороне $H$ и 90 *мм* — по стороне $B$.

На основании данных, приведенных в табл. 9, выбираем распределение проходов по калибрам и порядок кантовок. Для нашего случая выбираем схему IV (табл. 11).

Таблица 11

**Схема прокатки**

| Калибры | I (бочка) | II | III | IV |
|---|---|---|---|---|
| Номер прохода | 1, 2×3, 4, 5, 6 | ×7, 8, 9, 10 | ×11, 12 | ×13 |
| Направление прокатки . . | ↑ ↓ ↑ ↓ ↑ ↓ | ↑ ↓ ↑ ↓ | ↑ ↓ | ↑ |
| Обжимаемая сторона . . . | *H H B B B B* | *H H H H* | *B B* | *H* |

Примечание. Знаком × обозначена кантовка.

5. На основе полученных данных рассчитываем режим обжатий.

*1-й проход* — обжатие по стороне $H$.

Исходные размеры: $h_0 = 815$ *мм*, $b_0 = 735$ *мм*.

Округляя обжатие до 5 *мм*, принимаем $\Delta h_1 = 85$ *мм*, тогда

$$h_1 = 815 - 85 = 730 \text{ мм}.$$

Среднее уширение определяем по формуле А. П. Чекмарева. Определим угол захвата для минимального диаметра при высоте первого калибра $h_{к1} = 140$ *мм*:

$$D_{к1} = 0{,}9 \times 1150 - 140 = 895 \text{ мм};$$

$$\alpha_1 = \arccos\left(1 - \frac{85}{895}\right) \approx 25°; \quad \alpha_{рад} = 0{,}436.$$

Уширение равно

$$\Delta b_1 = \frac{2 \cdot 735 \cdot 85}{(815 + 730)\left[1 + (1 + 0{,}436)\left(\frac{735}{447{,}5 \cdot 0{,}436}\right)^2\right]} = 3{,}8 \text{ мм}.$$

Принимаем $\Delta b_1 = 5$ *мм*.

Ширина раската

$$b_1 = b_0 + \Delta b_1 = 735 + 5 = 740 \text{ мм}.$$

*2-й проход* — обжатие по высоте $H$.

Принимаем обжатие $\Delta h_2 = 85$ *мм*, тогда

$$h_2 = h_1 - \Delta h_1 = 730 - 85 = 645 \text{ мм}.$$

Уширение

$$\Delta b_2 = \frac{2 \cdot 740 \cdot 85}{(730 + 645)\left[1 + (1 + 0{,}436)\left(\frac{740}{447{,}5 \cdot 0{,}436}\right)^2\right]} = 4{,}4 \text{ мм}.$$

Принимаем $\Delta b_2 = 5$ *мм*.

Ширина раската

$$b_2 = b_1 + \Delta b_2 = 740 + 5 = 745 \text{ мм}.$$

После 2-го прохода предусматриваем кантовку.

Аналогично рассчитываем и остальные проходы: в зависимости от обжатия определяем уширение и устанавливаем кантовки в соответствии с выбранной схемой прокатки.

Результаты расчета приведены в табл. 12. По расчетным данным устанавливаем предварительный режим обжатий (табл. 13).

Из табл. 13 видно, что толщина готового блюма получилась равной 280 *мм*, т. е. несколько меньше заданной.

Чтобы на гладкой бочке снизить обжатие по проходам, в 1-м проходе при снятии конусности слитка можно обжатие увеличить примерно до 115 *мм*. При снятии конусности можно исходить из средней высоты слитка, равной $0{,}5\,(815 + 755) = 785$ *мм*. Если задаться обжатием $\Delta h_1 = 85$ *мм*, то после прохода получим $h_1 = 700$ *мм*, что соответствует обжатию, считая по большему сечению, $\Delta h_1 = 115$ *мм*.

Таблица 12

**Результаты расчета режима обжатий на блюминге 1150**

| Номер прохода | Обжатие $\Delta h$, *мм* | $h=h'-\Delta h$; $h=b'-\Delta h$* | $b=b'+\Delta b$; $b=h'+\Delta b$* | $h_к$ | $D_к=0{,}9D-h_к$, *мм* | $\alpha$ | $\alpha$, рад. | Уширение $\Delta b$, *мм*, рассчитанное по формуле (1) | Принимаемое $\Delta b$, *мм* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | Слиток | 815/755 | 735/675 | | | | | | |
| 1 | 85/25 | 730 | 740 | 140 | 895 | 25° | 0,436 | 3,8 | 5 |
| 2 | 85 | 645 | 745 | 140 | 895 | 25° | 0,436 | 4,4 | 5 |
| | | | Кантовка | | | | | | |
| 3 | 90/30 | 655 | 650 | 140 | 895 | 26° | 0,454 | 5,2 | 5 |
| 4 | 90 | 565 | 655 | 140 | 895 | 26° | 0,454 | 6,0 | 5 |
| 5 | 90 | 475 | 660 | 140 | 895 | 26° | 0,454 | 7,0 | 5 |
| 6 | 90 | 385 | 670 | 140 | 895 | 26° | 0,454 | 8,4 | 10 |
| | | | Кантовка | | | | | | |
| 7 | 85 | 585 | 395 | 200 | 835 | 26° | 0,454 | 7,5 | 10 |
| 8 | 85 | 500 | 405 | 200 | 835 | 26° | 0,454 | 8,5 | 10 |
| 9 | 85 | 415 | 415 | 200 | 835 | 26° | 0,454 | 9,8 | 10 |
| 10 | 85 | 330 | 430 | 200 | 835 | 26° | 0,454 | 12,1 | 15 |
| | | | Кантовка | | | | | | |
| 11 | 90 | 340 | 345 | 180 | 855 | 26° 30′ | 0,463 | 15,3 | 15 |
| 12 | 90 | 250 | 365 | 180 | 855 | 26°30′ | 0,463 | 19,2 | 20 |
| | | | Кантовка | | | | | | |
| 13 | 85 | 280 | 270 | 180 | 855 | 26° 30′ | 0,463 | 19,2 | 20 |

* После кантовки стороны меняются; $h'$ и $b'$ — размеры до прохода.

Перед 3-м проходом, в котором снимается конусность, средняя высота задаваемого раската после кантовки равна

$$h_2 = 0{,}5\ (745 + 685) = 715\ мм.$$

Если задаться обжатием $\Delta h_3 = 90$ *мм*, то высота раската после 3-го прохода будет равна $h_3 = 715 - 90 = 625$ *мм*, что соответствует обжатию по большему сечению $\Delta h_3 = 120$ *мм*. Соответственно уменьшаются обжатия во 2, 4, 5 и 6-м проходах.

Поскольку уширение округлили до 5 *мм*, оставляем его по проходам без изменений.

Таблица 13

**Предварительный режим**

| Калибр | Номер прохода | Обжимаемая сторона | $h$, мм | $b$, мм | $\Delta h$, мм | $\Delta b$, мм |
|---|---|---|---|---|---|---|
| *I* | Слиток | | 815/755 | 735/675 | — | — |
| | 1 | *H* | 730 | 740 | 85/25 | 5 |
| | 2 | *H* | 645 | 745 | 85 | 5 |
| | | | Кантовка | | | |
| | 3 | *B* | 655 | 650 | 90/30 | 5 |
| | 4 | *B* | 565 | 655 | 90 | 5 |
| | 5 | *B* | 475 | 660 | 90 | 5 |
| | 6 | *B* | 385 | 670 | 90 | 10 |
| | | | Кантовка | | | |
| *II* | 7 | *H* | 585 | 395 | 85 | 10 |
| | 8 | *H* | 500 | 405 | 85 | 10 |
| | 9 | *H* | 415 | 415 | 85 | 10 |
| | 10 | *H* | 330 | 430 | 85 | 15 |
| | | | Кантовка | | | |
| *III* | 11 | *B* | 340 | 345 | 90 | 15 |
| | 12 | *B* | 250 | 365 | 90 | 20 |
| | | | Кантовка | | | |
| *IV* | 13 | *H* | 280 | 270 | 85 | 20 |

Полученные после корректировки данные приведены в табл. 14.

При корректировке режима обжатий необходимо учитывать также ширину калибров, особенно второго, в котором обычно бывает четыре прохода без кантовок, в нашем случае 7—10-й проходы. Общее уширение в этом калибре достигает 50—60 *мм*, поэтому ширину калибра необходимо выбрать такой, чтобы не было переполнения его металлом.

Как будет рассмотрено в следующем параграфе, разница значений ширины калибра *II* по дну и у разъема составляет около 50 *мм*, следовательно, возможны случаи переполнения калибра.

В данном случае выбираем ширину по дну калибра *II* на 10 *мм* больше ширины задаваемого раската, а именно $b_к = 415$ *мм*. Поэтому ширина выходящего из 7-го прохода раската равна ширине по дну калибра, благодаря чему раскат удерживается стенками калибра. Так как ширина раската после 8-го прохода равна 450 *мм*, то необходимо, чтобы ширина калибра у разъема была примерно на 5—10 *мм* больше ширины выходящего раската (рис. 49). В данном случае принимаем $B_к = 460$ *мм*.

Таблица 14

**Режим обжатий на блюминге 1150 при прокатке блюмов 285×285 *мм***

| Номер калибра и его размеры $h_к \times b_к / B_к$, *мм* | Номер прохода | Обжимаемая сторона | $h$, *мм* | $b$, *мм* | $\Delta h$, *мм* | $\Delta b$ *мм* | Показание циферблата $h - h_к$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| I, 150×1000/1050 | 0 | — | 815/755 | 735/675 | — | — | |
| | 1 | *H* | 700 | 740 | 115/55 | 5 | 550 |
| | 2 | *H* | 635 | 745 | 65 | 5 | 485 |
| | | | Кантовка | | | | |
| | 3 | *B* | 625 | 640 | 120/60 | 5 | 475 |
| | 4 | *B* | 545 | 645 | 80 | 5 | 395 |
| | 5 | *B* | 475 | 650 | 70 | 5 | 325 |
| | 6 | *B* | 405 | 660 | 70 | 10 | 255 |
| | | | Кантовка | | | | |
| II, 200×415/460 | 7 | *H* | 580 | 415 | 80 | 10 | 380 |
| | 8 | *H* | 500 | 425 | 80 | 10 | 300 |
| | 9 | *H* | 420 | 435 | 80 | 10 | 220 |
| | 10 | *H* | 340 | 450 | 80 | 15 | 140 |
| | | | Кантовка | | | | |
| III, 180×340/380 | 11 | *B* | 355 | 355 | 95 | 15 | 175 |
| | 12 | *B* | 265 | 375 | 90 | 20 | 85 |
| | | | Кантовка | | | | |
| IV, 180×260/290 | 13 | *H* | 285 | 285 | 90 | 20 | 105 |

В калибре *III* дают два прохода с общим уширением 35 *мм*. Ширину калибра *III* по дну приняли равной ширине задаваемого раската, т. е. $b_к = 340$ *мм*, ширину у разъема $B_к = 380$ *мм*. Размеры калибра *IV* приняли соответственно равными $b_к = 260$ *мм* и $B_к = 290$ *мм*.

Что касается калибра *I* — бочки, то ширину его выбирают в зависимости от ширины слитка и прокатываемого сляба. Поскольку предусмотрена прокатка слябов, ширину калибра *I* принимаем $b_к / B_к = 1000/1050$ *мм*.

На основании полученных данных режима обжатий и выбранных размеров калибров можно разработать ка-

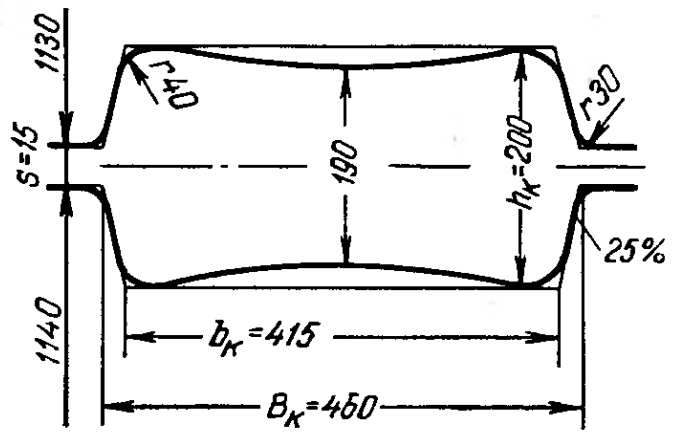



Рис. 49. Построение калибра *II* блюминга и расположение его в валках

либровку валков, а именно: построение калибров и их размещение на валках.

На ряде заводов (НТМК, «Азовсталь» и др.) при прокатке на блюмингах кипящих сталей применяют большие обжатия, когда средний угол захвата достигает 27—27,5°. Такие обжатия возможны при наличии главного привода мощностью 7350—8800 *квт* в сочетании с режимом скоростей прокатки, обеспечивающим надежный захват [19—23].

Рассчитаем режим обжатий при прокатке блюма 285×285 *мм* из мягкой кипящей стали при среднем угле захвата 27,5°. Исходные данные для расчета принимаем такие же, как и в предыдущем примере. При угле захвата 27,5° среднее обжатие равно

$$\Delta h_{ср} = D_{к.\,ср}\,(1 - \cos 27{,}5°) = 860 \times 0{,}113 = 97\ мм.$$

Число проходов для каждой стороны

$$n_H = \frac{597}{97} = 6{,}2 \quad \text{и} \quad n_B = \frac{530}{97} = 5{,}5.$$

Принимаем 11 проходов: 6 проходов по стороне *H* и 5 проходов по стороне *B*. Тогда среднее обжатие по стороне *H*

$$\Delta h_{ср} = \frac{597}{6} \approx 100\ мм;$$

по стороне *B*

$$\Delta h_{ср} = \frac{530}{5} \approx 105\ мм.$$

Принимаем кантовку после первых четырех проходов, вторую кантовку также после четырех проходов и третью кантовку после двух проходов (табл. 15). Обжатие в 1-м проходе при снятии конусности принимаем равным 125 *мм*, в следующих трех проходах при прокатке на бочке принимаем обжатие по 90 *мм*. После четырех проходов раскат передаем в калибр *II*, в котором обжатия составляют 95—100 *мм*, а при снятии конусности — до 120 *мм*. В калибрах *III* и *IV* обжатие равно 100 и 95 *мм*.

Таким образом, прокатка блюма 285×285 *мм* вполне возможна из мягких кипящих сталей за 11 проходов.

Несколько завышенные обжатия (по 90 *мм*) получились на бочке, однако в практических режимах прокатки блюмингов НТМК, «Азовстали» и др. встречаются такие обжатия. Обжатия 95—100 *мм* в калибрах *II*, *III* и *IV* затруднения не вызывают, поскольку прокатка ведется с ограниченным уширением и углы захвата могут достигать 29°; следовательно, допустимое обжатие составляет

$$\Delta h = 0{,}9 \cdot (1150 - 200) \cdot (1 - \cos 29°) = 855 \times 0{,}125 = 107\ мм.$$

*Пример 2.* Расчет режима обжатий при прокатке сляба на блюминге 1150.

Таблица 15

**Режим обжатий при прокатке блюма 285×285 *мм* из мягких кипящих сталей**

| Номер калибра и его размеры. *мм* | Номер прохода | Обжимаемая сторона | *h*, *мм* | *b*, *мм* | Δ*h*, *мм* | Δ*b*, *мм* |
|---|---|---|---|---|---|---|
| *I*, 150 × 1000/1050 | | *H* | 815/755 | 735/675 | — | — |
| | 1 | *H* | 690 | 740 | 125/65 | 5 |
| | 2 | *H* | 600 | 745 | 90 | 5 |
| | 3 | *H* | 510 | 750 | 90 | 5 |
| | 4 | *H* | 420 | 755 | 90 | 5 |
| *II*, 200 × 415/460 | 5 | *B* | 635 | 425 | 120 | 5 |
| | 6 | *B* | 535 | 435 | 100 | 10 |
| | 7 | *B* | 440 | 445 | 95 | 10 |
| | 8 | *B* | 345 | 455 | 95 | 10 |
| *III*, 180 × 340/380 | 9 | *H* | 355 | 360 | 100 | 15 |
| | 10 | *H* | 260 | 380 | 95 | 20 |
| *IV*, 180 × 260/290 | 11 | *B* | 285 | 285 | 95 | 25 |

Исходные данные: слиток размерами $\frac{700\times1060}{570\times960}$, массой 10 *т*, сталь кипящая углеродистая обыкновенного качества Ст.3; размеры сляба 150×850 *мм*.

Необходимо использовать размеры калибров, принятых в предыдущем примере. Для ребровой прокатки слябов можно добавить пятый калибр.

При определении режима обжатий для слябов будем руководствоваться следующими данными.

Устанавливаем сначала среднее обжатие при прокатке сляба плашмя в калибре *I* — на бочке. В зависимости от ширины сляба для мягкой кипящей стали принимаем указанные ниже обжатия в калибре *I* на блюминге 1150. Чем шире сляб, тем больше давление на валки и момент прокатки, поэтому с увеличением ширины сляба соответственно уменьшаем обжатие Δ*h* до следующих значений, *мм*: 65—55 при $\alpha = 22 \div 20°$ для слябов шириной 600—850 *мм*, 55—50 при $\alpha = 20 \div 19°$ для слябов шириной 850—1050 *мм* и 50—40 при $\alpha = 19 \div 17°$ для слябов шириной 1050—1300 *мм*.

Здесь углы захвата определены для катающего диаметра после переточки, равного 900 *мм*. При прокатке спокойной крепкой стали обжатия необходимо несколько уменьшить (на 5—10 *мм*).

Через 6, 8 или более проходов применяют кантовку и прокатку сляба на ребро для получения необходимой ширины. Ребровые проходы дают в калибрах *II*, *III* и *IV*, после того как сляб будет иметь толщину, позволяющую прокатывать его в этих калибрах.

В ребровых калибрах применяют обжатия в пределах 80—100 *мм* и более. Обычно дают 2—4 ребровых прохода.

Начальная высота сечения слитка $h_0 = 700$ *мм*, конечная толщина сляба $h_n = 150$ *мм*, следовательно, суммарное обжатие

$$\sum \Delta h = 700 - 150 = 550 \text{ мм}.$$

Примем среднее обжатие $\Delta h_{ср} = 55$ *мм*, тогда число проходов на бочке

$$n = 550 : 55 = 10.$$

Суммарное обжатие при ребровых проходах равно (без учета уширения)

$$1060 - 850 = 210 \text{ мм}.$$

Принимаем до первой кантовки 8 пластовых проходов. Расчеты показывают, что уширение в таком случае составляет примерно 5 *мм* за проход. Следовательно, в ребровых проходах следует снять дополнительно $8 \times 5 = 40$ *мм*. Поэтому в ребровых проходах необходимо обжать

$$\sum \Delta h_р = 210 + 40 = 250 \text{ мм}.$$

Двух ребровых проходов для обжатия 250 *мм* недостаточно, поэтому принимаем три ребровых прохода, причем кантовку раската с ребрового в пластовое положение производим на задней стороне блюминга при раздвижении линеек.

Итак, принимаем 13 проходов, а именно: 8 пластовых, 3 ребровых и 2 пластовых.

В табл. 16 приведен режим обжатий при прокатке слитка мягкой кипящей стали в сляб $150 \times 850$ *мм*. В 1-м проходе при снятии конусности можно принять $\Delta h_1 = 85$ *мм*. В ребровых калибрах предусмотрены большие обжатия, особенно в 9-м проходе, так как в нем снимается конусность.

Из табл. 16 видно, что уширение составляет 5 *мм* в первых восьми проходах и 10 *мм* — в остальных. Так как при прокатке за 13 проходов слябов указанных размеров из более твердой стали возможны перегрузки валков и привода блюминга, целесообразно предусматривать 15 проходов.

Следует указать, что на практике часто применяют больше кантовок, поэтому ребровые проходы чередуются с пластовыми. Например, встречается следующая схема прокатки: 8 пластовых, 2 ребровых, 2 пластовых, 2 ребровых и 1 пластовый. В этом случае приходится делать 4 кантовки, что увеличивает такт прокатки. Часто последний проход делают холостым, чтобы несколько сократить такт прокатки.

Таблица 16

**Режим обжатий при прокатке сляба 150×850 *мм* из мягкой кипящей стали (слиток массой 10 *т*)**

| Номер калибра и его размеры, *мм* | Номер прохода | Обжимаемая сторона | *h*, *мм* | *b*, *мм* | $\Delta h$ *мм* | $\Delta b$ *мм* |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Слиток | 700 | 1060 | — | — |
| *I* (бочка), 150 × 1000/1050 | 1 | *H* | 615 | 1060 | 85 | 0 |
| | 2 | *H* | 560 | 1065 | 55 | 5 |
| | 3 | *H* | 505 | 1070 | 55 | 5 |
| | 4 | *H* | 450 | 1075 | 55 | 5 |
| | 5 | *H* | 395 | 1080 | 55 | 5 |
| | 6 | *H* | 340 | 1085 | 55 | 5 |
| | 7 | *H* | 285 | 1090 | 55 | 5 |
| | 8 | *H* | 230 | 1095 | 55 | 5 |
| | | Кантовка | | | | |
| *IV*, 180 × 260/290 | 9 | *B* | 985 | 240 | 110 | 10 |
| | 10 | *B* | 900 | 250 | 85 | 10 |
| | 11 | *B* | 830 | 260 | 70 | 10 |
| | | Кантовка | | | | |
| *I* (бочка), 150 × 1000/1050 | 12 | *H* | 200 | 840 | 60 | 10 |
| | 13 | *H* | 150 | 850 | 50 | 10 |

## 6. ПОСТРОЕНИЕ КАЛИБРОВ И РАЗМЕЩЕНИЕ ИХ НА ВАЛКАХ

Устанавливаем нижнее давление, т. е. разность катающих или начальных диаметров нижнего и верхнего валков:

$$\Delta D = D_н - D_в.$$

Для валков блюминга можно принять $\Delta D = 10$ *мм*. Зная нижнее давление, можно определить начальные диаметры валков и линию прокатки как линию соприкосновения начальных диаметров. В нашем случае при диаметре валков блюминга $D = 1150$ *мм* начальные диаметры верхнего и нижнего валков будут следующие:

$$D_в = D - \frac{\Delta D}{2} = 1150 - \frac{10}{2} = 1145 \text{ мм};$$

$$D_н = D + \frac{\Delta D}{2} = 1150 + \frac{10}{2} = 1155 \text{ мм}.$$

Определив начальные диаметры валков, находим линию прокатки, на которой строятся прямоугольные калибры.

На рис. 49 показано построение калибра *II* согласно данным расчета режима обжатия для блюминга 1150 при прокатке блюма 285×285 *мм* (пример 1).

Сначала строят калибр без закруглений. Согласно табл. 14, высота калибра составляет $h_к = 200$ *мм*, ширина калибра по дну $b_к = 395$ *мм*, у зазора $B_к = 445$ *мм*.

Высоту калибра откладываем поровну от линии прокатки. Строим прямоугольник шириной $b_к = 395$ *мм*. Устанавливаем зазор $s = 10 \div 20$ *мм*, принимаем в нашем случае $s = 15$ *мм*. Наносим зазор у линии прокатки и откладываем ширину $B_к = 445$ *мм*.

Определяем выпуск калибра, т. е. уклон боковых стенок калибра, представляющий собой тангенс угла φ (см. рис. 49):

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{B_к - b_к}{h_к - s}.$$

Величина $\frac{h_к - s}{2}$ представляет собой глубину вреза калибра в валки.

В нашем случае уклон (выпуск) равен

$$\frac{455 - 395}{200 - 15} 100 = 27\%.$$

Уклон калибров блюминга обычно принимают в пределах 15—30%. Рекомендуется делать ступенчатый выпуск в калибрах: от дна калибра до половины глубины калибра выпуск принимают равным 15—25%, у зазора выпуск увеличивают до 30—40%. Этим обеспечивается больший простор на уширение.

Радиус закругления у дна калибра составляет

$$r = (0{,}08 \div 0{,}1)\, b_к = (0{,}08 \div 0{,}1)\, 395 \approx 40 \text{ мм}.$$

Радиус у зазора принимают:

$$r' = (0{,}1 \div 0{,}15)\, h_к.$$

В нашем случае

$$r' = 0{,}15 \times 200 = 30 \text{ мм}.$$

В калибре *II* делают выпуклость, которая составляет $f = 5 \div 10$ *мм*. Принимаем $f = 5$ *мм*, тогда высота посередине калибра будет равна

$$h'_к = h_к - 2f = 200 - 10 = 190 \text{ мм}.$$

Аналогично вычерчивают и остальные калибры, размеры которых выбирают в следующих пределах.

Калибр *I* (бочка) имеет высоту в пределах 100—150 *мм* в тех случаях, когда предусмотрена прокатка слябов. Если слябы на блюминге не катают, то высота калибра *I* может достигать 200 *мм*.

Однако, если даже слябы не прокатывают, не следует делать большого среза калибра *I*, чтобы обеспечить больший катающий диаметр валков. Радиус закругления у дна калибра делают равным примерно 50 *мм*, радиус закругления у буртов составляет 35—40 *мм*.

При прокатке слябов ширину калибра *I* принимают в пределах 800—1700 *мм* в зависимости от ширины прокатываемых слябов и высоты подъема верхнего валка. Например, на блюмингах 1150 Череповецкого и Коммунарского заводов предусмотрен подъем верхнего валка до 1500 *мм*.

При выборе размеров калибра *II* исходим из имеющихся режимов обжатий. Высота калибра *II* на практике изменяется в пределах 180—230 *мм*. Этот калибр обычно имеет наибольший врез в валках, чтобы обеспечить устойчивость раската при больших обжатиях. Ширину калибра *II* выбирают исходя из возможности дальнейшей прокатки в нем раската после прокатки в калибре *I* (на бочке). Если выбирать бо́льшую ширину калибра *II*, то имеется опасение, что не удастся разместить на бочке валка все калибры. При малой ширине калибра *II* придется давать много проходов на бочке.

Практически ширину калибра *II* по дну выбирают в пределах 370—420 *мм*, а на блюмингах 1300 — до 490 *мм*. Ширина калибра *II* у зазора на 40—60 *мм* больше, чем по дну калибра, так что уклон составляет примерно 20—30%.

Радиус закругления в калибре *II* выбирают в глубине ручья около 40 *мм*, или $r \approx 0{,}1b_к$. Радиус закругления у зазора берут несколько меньшим, а именно $r' \approx 30$ *мм*, или $r' = (0{,}1 \div 0{,}15)\ h_к$. Как указывалось выше, в калибре *II* делается выпуклость $f = 5 \div 10$ *мм*.

Высота калибра *III* на 10—20 *мм* меньше высоты калибра *II*, а именно $h_к = 170 \div 200$ *мм*. Ширина калибра *III* по дну составляет 270—350 *мм* на блюмингах 1150 и достигает 390 *мм* на блюмингах 1300. В калибре *III* также делают выпуклость $f = 5 \div 10$ *мм*.

Радиусы закругления примерно такие же, как и в калибре *II*.

Калибр *III* также имеет выпуклость $f = 5 \div 10$ *мм*.

Калибр *IV* имеет высоту 170—190 *мм*, ширина его бывает порядка 200—280 *мм* по дну калибра в зависимости от режима обжатий и сечения выпускаемого блюма, так как калибр *IV* обычно является выпускающим калибром.

В последнее время ограничиваются четырьмя калибрами на бочке валка. В тех случаях, когда прокатывают слябы, имеющие реберные проходы, применяют пятый калибр шириной 150—200 *мм*.

Выпуск калибров *III*, *IV* и *V* составляет 15—25%.

В табл. 17 обобщены данные размеров калибров для валков блюмингов 1100—1150.

Таблица 17

**Размеры калибров валков блюмингов 1100—1150**

| Номер калибра | Высота *мм* | Шнрина, *мм* | | Радиус закругления *мм* | | Уклои (выпуск) % | Выпуклость, *мм* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | по дну[1] | у зазора | у дна калнбра | у зазора | | |
| *I* | 100—150 (до 220) | 800—700 | На 40—50 больше | 30—50 | 35—40 | — | — |
| *II* | 180—230 | 370—420 | 420—470 | 35—40 | 30—35 | 20—30 | 5—10 |
| *III* | 170—200 | 270—350 | 300—390 | 30—35 | 30—35 | 15—25 | 5—10 |
| *IV* | 170—190 | 200—280 | 230—320 | 30—35 | 30—35 | 15—25 | — |
| *V* | 170—190 | 150—200 | 170—230 | 25—30 | 30—35 | 15—25 | — |

[1] При прокатке слябов шнрнна калнбра *I* достигает 1700 *мм*.

В заводских калибровках валков блюминга возможны отклонения от указанных в табл. 17 размеров, что объясняется конкретными условиями прокатки: размерами слитков и конечного сечения блюмов и слябов. Поэтому при выборе размеров калибров следует учитывать заводские калибровки (см. рис. 44).

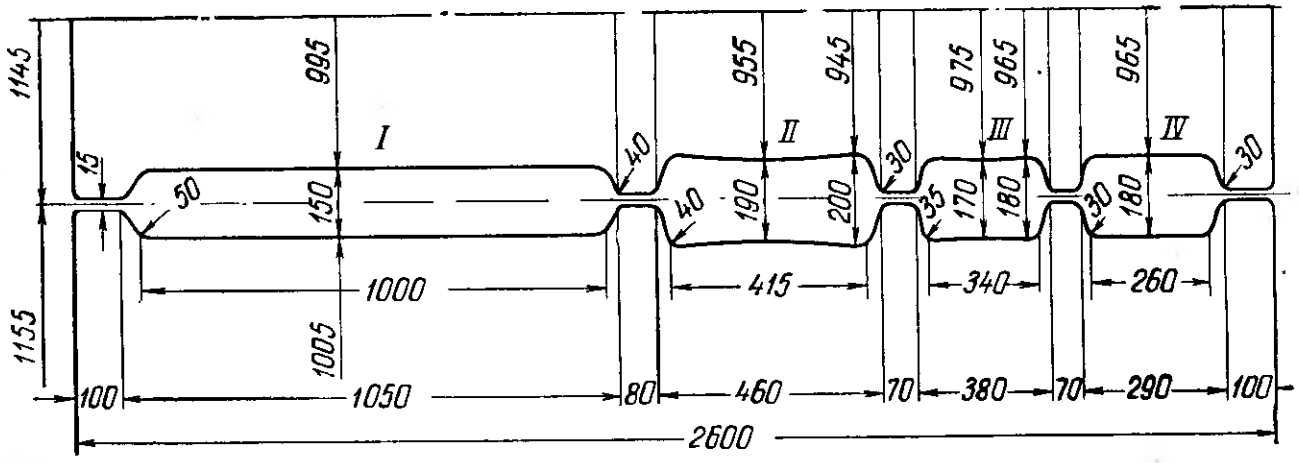



Рис. 50. Расчетная калибровка валков блюминга 1150

Длина бочки валка изменяется в пределах 2500—2800 *мм*. При размещении калибров на валках принимают крайние бурты шириной 100—180 *мм*. Ширину промежуточных буртов принимают равной $\sim 0{,}4h_к$. Обычно ширина этих буртов составляет 80—100 *мм*, хотя в заводских калибровках встречаются и меньшие значения при ограниченной длине бочки.

Как указывалось выше, зазор между валками принимают $s = 10 \div 15$ *мм*, а нижнее давление $\Delta D = 10 \div 15$ *мм*.

На рис. 50 приведена калибровка валков блюминга 1150, рассчитанная для прокатки блюмов 285×285 *мм* и слябов 180×850 *мм*.

## 7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТНОГО РЕЖИМА И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ БЛЮМИНГА

Высокая производительность блюминга обеспечивается не только применением интенсивных обжатий, но и скоростными условиями прокатки. В течение каждого прохода число оборотов изменяется: увеличивают скорость в начале прокатки и снижают ее при выходе раската из валков.

Оптимальным сочетанием обжатий и скоростей прокатки достигают высокой производительности блюминга.

Следует указать, что несоблюдение соотношения между обжатиями и скоростями прокатки, например применение больших скоростей при интенсивных обжатиях, может привести к буксованию и срыву раската при прокатке и даже к авариям на стане. Поэтому необходимо наряду с расчетом режима обжатий определить также скоростные условия прокатки, исходя из длин раскатов, наличия кантовок, состояния поверхности и условий захвата и других факторов в каждом калибре.

Определение скоростного режима необходимо для расчета производительности блюминга, крутящих моментов и мощности главного привода блюминга.

В каждом проходе при прокатке на блюминге выбирают такие скорости, чтобы обеспечить прокатку слитка за минимальное время. Поэтому необходимо устанавливать соответствующие числа оборотов валков при захвате раската, установившемся процессе прокатки и выбросе раската. После каждого прохода двигатель останавливают, меняют направление вращения, и цикл повторяется в следующем проходе с ускорением и замедлением вращения валков.

Зная закономерность изменения числа оборотов для каждого прохода, можно определить время прокатки раската $t$ и соответственно производительность блюминга.

В зависимости от длины раската, наличия или отсутствия кантовок применяют следующие диаграммы скоростей прокатки на блюминге (рис. 51).

*Диаграмма скоростей первого типа* (рис. 51, *а*) характеризуется тем, что при определенной скорости $n_з$ осуществляется захват слитка, после чего идет ускорение вращения валков до максимального числа оборотов $n_{max}$ и затем замедление скорости до момента выброса раската при $n_в$. Такая диаграмма применяется в первых проходах при коротком раскате. Снижение числа оборотов необходимо для того, чтобы раскат по выходе из валков не удалялся от последних и его можно было снова задать в калибр за минимальное время.

В тех случаях, когда короткий раскат по выходе из калибра необходимо кантовать, применяют *диаграмму скоростей второго типа* (рис. 51, *б*). По этой диаграмме за время прокатки слитка $t_м$

число оборотов увеличивают от $n_з$ до $n_{max}$, при котором происходит выброс раската, т. е. $n_{max} = n_в$. Большое число оборотов для выброса раската необходимо для того, чтобы раскат подать к кантовальным крюкам манипулятора перед кантовкой, поскольку последние находятся на значительном расстоянии от валков.

По мере увеличения длины раската приходится какую-то часть раската прокатывать при постоянной максимальной скорости $n_{max}$. В этом случае применяют *диаграмму скоростей*

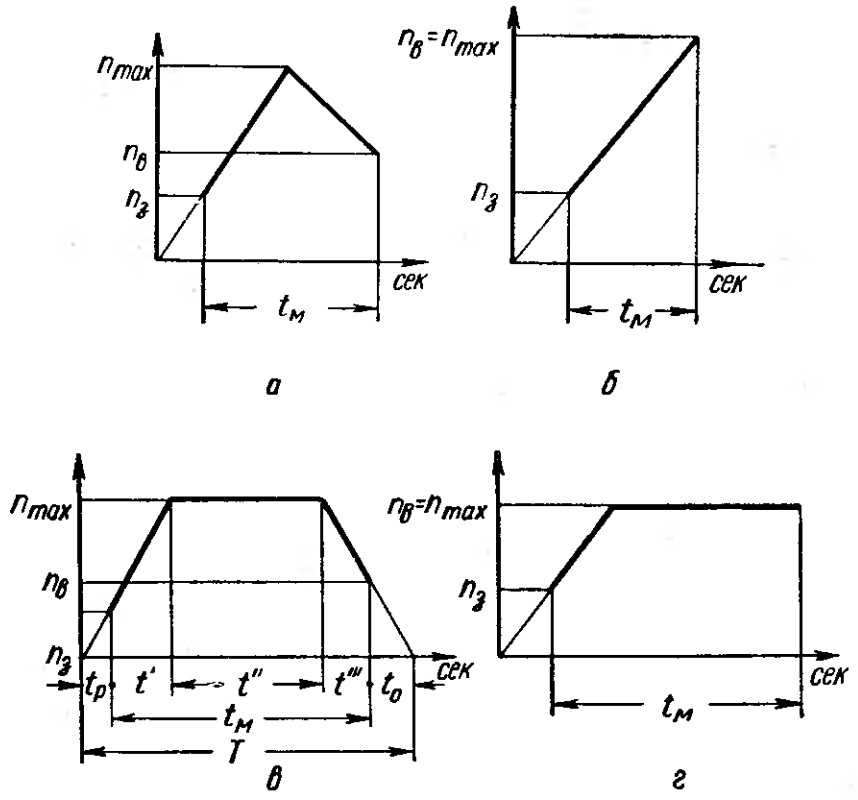



Рис. 51. Диаграмма скоростей прокатки на блюминге

*третьего типа* (рис. 51, *в*), в которой имеется горизонтальный отрезок при числе оборотов $n_{max}$, соответствующий прокатке среднего участка раската при постоянной максимальной скорости. Таким образом, третья диаграмма соответствует прокатке длинного раската без кантовки, поэтому число оборотов при выбросе $n_в$ должно быть меньше максимального числа оборотов $n_{max}$.

Наконец, когда удлиненный раскат при наличии ограниченного числа оборотов $n_{max}$ подвергают кантовке, то можно принимать $n_в = n_{max}$, чему соответствует *четвертая диаграмма* (рис. 51, *г*). В последнем проходе, когда раскат поступает к ножницам, также применяют четвертую диаграмму.

Для того чтобы определить производительность блюминга, необходимо в первую очередь определить машинное время $t_м$ для каждого прохода в соответствии со скоростным режимом по указанным четырем диаграммам.

Рассмотрим наиболее общую третью диаграмму (рис. 51, *в*).

Первый период соответствует времени, когда валки разгоняются вхолостую от 0 до $n_з$, т. е. до момента захвата раската валками. Это время называется временем разгона валков и обозначено на диаграмме $t_р$.

Далее за время $t'$ происходит ускорение валков вместе с раскатом от $n_з$ до $n_{max}$, после чего наступает прокатка с постоянным максимальным числом оборотов $n_{max}$ в течение времени $t''$.

Наконец, за время замедления $t'''$ обороты снижаются от $n_{max}$ до $n_в$, когда раскат выходит из валков.

Таким образом, машинное время, т. е. время пребывания раската в валках за проход, составляет

$$t_м = t' + t'' + t'''.$$

По выходе раската из валков последние останавливаются за время $t_0$.

Время одного цикла прокатки составляет

$$T_ц = t_р + t' + t'' + t''' + t_о,$$

куда входит время вращения валков с раскатом $t_м = t' + t'' + t'''$ и время вращения валков вхолостую $t_р + t_о$.

Чтобы определить $t_м$, нужно знать также характеристику двигателя, а именно его ускорение и замедление.

Для новых двигателей ускорение со слитком, по практическим данным, составляет $a \approx 30$ *об/(мин·сек)*, замедление со слитком равно $b = 50 \div 60$ *об/(мин·сек)* [16, 18].

Определим составляющие машинного времени $t'$, $t''$ и $t'''$.

Время ускорения со слитком равно

$$t' = \frac{n_{max} - n_з}{a}.$$

Время замедления равно

$$t''' = \frac{a_{max} - n_в}{b}.$$

Для определения среднего участка $t''$ необходимо сначала определить, какие отрезки длины раската прокатаны за время $t'$ и $t''$.

Длина всего раската равна

$$l = l' + l'' + l'''.$$

Отрезок $l'$ прокатывается за время $t'$ со средней скоростью

$$v'_{ср} = \frac{\pi D_к}{60} \frac{n_з + n_{max}}{2}.$$

Следовательно, отрезок $l'$ равен

$$l' = t' v'_{ср} = \frac{n_{max} - n_з}{a} \frac{\pi D_к}{60} \frac{n_з + n_{max}}{2} = \frac{\pi D_к}{2 \cdot 60 a} (n^2_{max} - n^2_з).$$

Отрезок $l'''$, прокатываемый за время замедления, равен

$$l''' = t''' v'''_{ср} = \frac{n_{max} - n_в}{b} \frac{\pi D_к}{60} \frac{n_{max} + n_в}{2} = \frac{\pi D_к}{2 \cdot 60 b} (n^2_{max} - n^2_в).$$

Средний отрезок длины раската прокатывается с максимальной скоростью

$$v'' = \frac{\pi D_к n_{max}}{60}.$$

Следовательно, время прокатки среднего отрезка равно

$$t'' = \frac{l''}{v''} = \frac{(l - l' - l''') 60}{\pi D_к n_{max}} = \frac{60l}{\pi D_к n_{max}} -$$

$$- \frac{n^2_{max} - n^2_в}{2an_{max}} - \frac{n^2_{max} - n^2_в}{2bn_{max}}.$$

Машинное время прокатки за проход равно

$$t_м = t' + t'' + t''' = \frac{n_{max} - n_з}{a} + \frac{60l}{\pi D_к n_{max}} -$$

$$\frac{n^2_{max} - n^2_в}{2an_{max}} - \frac{n^2_{max} - n^2_в}{2bn_{max}} + \frac{n_{max} - n_в}{b}.$$

После небольших преобразований окончательно получаем

$$t_м = \frac{60l}{\pi D_к n_{max}} + \frac{n_{max} - n_з}{a} \left(1 - \frac{n_{max} + n_з}{2n_{max}}\right) +$$

$$+ \frac{n_{max} - n_в}{b} \left(1 - \frac{n_{max} + n_в}{2n_{max}}\right). \qquad (32)$$

Для диаграммы скоростей первого типа, когда средний участок отсутствует и $t'' = 0$, машинное время состоит из времени ускорения и замедления

$$t_м = t' + t''' = \frac{n_{max} - n_з}{a} + \frac{n_{max} - n_в}{b}. \qquad (33)$$

Для диаграммы скоростей второго типа машинное время равно

$$t_м = t' = \frac{n_{max} - n_з}{a}. \qquad (34)$$

Для диаграммы скоростей четвертого типа, в которой отсутствует третий участок ($t''' = 0$), имеем

$$t_м = \frac{60l}{\pi D_к n_{max}} + \frac{n_{max} - n_з}{a} \left(1 - \frac{n_{max} + n_з}{2n_{max}}\right). \qquad (35)$$

Наиболее выгодными являются диаграммы первого и второго типа, в которых максимальное число оборотов не ограничивается характеристикой двигателя и отсутствует средний участок с ограниченным максимально допустимым числом оборотов $n_{max}$.

Для диаграммы первого типа

$$l = l' + l'' = \frac{\pi D_к}{2 \cdot 60a}(n^2_{max} - n^2_з) + \frac{\pi D_к}{2 \cdot 60b}(n^2_{max} - n^2_в),$$

откуда

$$n_{max} = \sqrt{\frac{ab}{a+b}\left(\frac{120l}{\pi D_к} + \frac{n^2_з}{a} + \frac{n^2_в}{b}\right)}. \quad (36)$$

При $a = 30$ *об/(мин·сек)* и $b = 60$ *об/(мин·сек)* имеем

$$n_{max} = 49\sqrt{\frac{l}{\pi D_к} + \frac{n^2_з}{3600} + \frac{n^2_в}{7200}}. \quad (37)$$

В соответствии с диаграммой второго типа, состоящей из одного участка, раскат прокатывается за период ускорения, поэтому $l = l'$.

Длина раската в данном случае равна

$$l = \frac{\pi D_к}{2 \cdot 60a}(n^2_{max} - n^2_з),$$

откуда

$$n_{max} = \sqrt{\frac{120al}{\pi D_к} + n^2_з}. \quad (38)$$

При $a = 30$ *об/(мин·сек)*

$$n_{max} = 60\sqrt{\frac{l}{\pi D_к} + \frac{n^2_з}{3600}}. \quad (39)$$

Таким образом, при определении машинного времени $t_м$ сначала определяем максимальное число оборотов по приведенным формулам, отвечающим диаграммам первого и второго типа.

Если полученные максимальные числа оборотов $n_{max}$ являются по ряду рассмотренных ниже соображений допустимыми, то машинное время рассчитывается по формулам, выведенным для диаграмм первого и второго типа.

Если максимальное число оборотов получилось больше допустимого, принимаем допустимое $n_{max}$, и тогда машинное время определяем по формулам, соответствующим диаграммам третьего и четвертого типов.

При определении значений $n_з$ и $n_в$ будем руководствоваться практическими данными.

Существуют также аналитические методы определения $n_з$, $n_в$ и $n_{max}$, основанные на соблюдении тройного условия, а именно: на равенстве между собой времени работы нажимного устройства, времени работы рольгангов и времени реверсирования, или из условия минимального нагрева главного привода [13].

На основании практических данных рекомендуется следующий режим скоростей прокатки на блюминге [16].

*Калибр I*. При прокатке без кантовки $n_з = 10 \div 15$ *об/мин* и $n_в = 15 \div 20$ *об/мин*.

Для снижения числа оборотов двигатель отключают за 0,2—0,3 *сек* до конца прохода.

Максимальное число оборотов $n_{max}$ определяем по формуле (37). Если по этой формуле получается $n_{max} > 50$ *об/мин*, то принимаем $n_{max} = 50$ *об/мин*. Машинное время определяем по диаграмме второго или третьего типа.

При прокатке с кантовкой задаемся $n_з = 10 \div 15$ *об/мин* и $n_в = n_{max}$. Максимальное число оборотов определяем по формуле (37) или (39). Если по расчету $n_{max} > 50$ *об/мин*, то принимаем $n_{max} = 50$ *об/мин*. Машинное время определяем по диаграмме первого или четвертого типа.

*Калибры II* и *III*. При прокатке без кантовки задаемся $n_з = 15 \div 30$ *об/мин* и $n_в = 20 \div 40$ *об/мин*. Двигатель отключают за 0,5—0,6 *сек* до конца прохода. Если по формуле (37) получится $n_{max} > 60 \div 70$ *об/мин*, то принимаем $n_{max} = 60 \div 70$ *об/мин*. Машинное время определяем по диаграмме первого или третьего типа.

При прокатке с кантовкой задаемся $n_з = 15 \div 30$ *об/мин* и $n_в = n_{max}$, но $n_в \leqslant 50$ *об/мин*. Максимальное число оборотов определяем по формуле (37) или (39). Если по формулам получится $n_{max} > 60 \div 70$ *об/мин*, то принимаем $n_{max} = 60 \div 70$ *об/мин*. Машинное время рассчитываем по диаграмме первого, второго или третьего типа.

*Калибры IV и V* являются обычно выпускными. Задаемся $n_з = 30 \div 40$ *об/мин* и $n_в = n_{max}$. Максимальное число оборотов $n_{max}$ определяем по формуле (39). Максимальное число оборотов ограничиваем в пределах $n_{max} = n_в = 80 \div 100$ *об/мин*. Машинное время определяем по диаграмме второго или четвертого типа.

Полученные данные сведены в табл. 18.

Для определения полного цикла прокатки одного слитка $T$ (такта или ритма прокатки) необходимо также рассчитать паузы между проходами $t_п$, так называемое вспомогательное время.

При определении паузы между проходами необходимо соблюдать тройное условие [13].

При расчете машинного и вспомогательного времени необходимо обеспечить минимальный цикл прокатки и минимальный нагрев электродвигателя. При наличии резерва мощности двига-

теля основным условием оптимального режима прокатки является минимальный цикл прокатки [13, 17, 18].

Для определения времени пауз можно пользоваться практическими данными хорошо работающих блюмингов с мощностью главного привода 7350—9000 *квт*. Паузы между проходами без кантовки колеблются в пределах 1—2,5 *сек*, причем по мере прокатки, т. е. с увеличением длины раската и скорости прокатки, пауза $t_п$ увеличивается.

В результате обработки методом корреляции практических данных вспомогательного времени на различных блюмингах выведены формулы для подсчета пауз в зависимости от средней скорости прокатки в данном проходе при прокатке блюмов и слябов [18]. Например, при прокатке слитков массой 7—8 *т* на блюмингах 1150 с мощностью главного привода 7350 — 9000 *квт* время пауз между проходами без кантовки можно определить по следующей эмпирической формуле:

$$t_п = 0{,}345 + 0{,}781 v_{ср}, \qquad (40)$$

где $v_{ср} = \frac{l}{t_м}$ — средняя скорость прокатки в проходе перед паузой, *м/сек*.

Таким образом, зная длину раската $l$ в данном проходе и машинное время $t_м$, находим среднюю скорость и паузы между проходами $t_п$.

Если, например, в первых проходах средняя скорость прокатки составляет $\approx 1{,}5$ *м/сек*, то

$$t_п = 0{,}345 + 0{,}781 \cdot 1{,}5 \approx 1{,}5 \text{ сек}.$$

В наших расчетах время пауз будем определять с точностью до 0,1 *сек*.

Таблица 18

**Рекомендуемый режим скоростей прокатки на блюминге**

| Номер калибра | $n_з$ *об/мин* | $n_в$, *об/мин* | $n_{max}$, *об/мин*, по формулам | $t_м$, по формулам | Тип диаграммы |
|---|---|---|---|---|---|
| *I*, без кантовки | 10—15 | 15—20 | (37); $n_{max} \leqslant 50$ | (33) или (32) | 1-й, 3-й |
| *I*, с кантовкой | 10—15 | $n_в = n_{max}$ | (37) или (39); $n_{max} \leqslant 50$ | (34) или (35) | 2-й, 4-й |
| *II* и *III*, без кантовки | 15—30 | 20—40 | (37); $n_{max} \leqslant 60 \div 70$ | (33) или (32) | 1-й, 3-й |
| *II* и *III*, с кантовкой | 15—30 | $50 \geqslant n_в = n_{max}$ | (37) или (39); $n_{max} \leqslant 60 \div 70$ | (33), (34) или (32) | 1-й, 2-й. 3-й |
| *IV* и *V*, выпускные | 30—40 | $n_в = n_{max}$ | (39); $n_{max} \leqslant 80 \div 100$ | (34) или (35) | 2-й, 4-й |

В последнем проходе средняя скорость прокатки составляет около 3 *м/сек* (для блюма сечением примерно 300×300 *мм*). В этом случае время паузы без кантовки равно

$$t_{\text{п}} = 0{,}345 + 0{,}781 \cdot 3 = 2{,}7 \text{ сек.}$$

Пользуясь приведенной формулой, можно выбирать $t_{\text{п}}$ между проходами в пределах 1,5—2,5 *сек*.

Время паузы с кантовкой подсчитываем по следующей формуле [18]:

$$t_{\text{п}} = 4{,}24 - 0{,}611 v_{\text{ср}}. \tag{41}$$

При $v_{\text{ср}} \approx 1{,}5$ *м/сек* в первых проходах пауза составляет

$$t_{\text{п}} = 4{,}24 - 0{,}611 \cdot 1{,}5 \approx 3{,}3 \text{ м/сек.}$$

В последних проходах при $v_{\text{ср}} \approx 3$ *м/сек* пауза между проходами с кантовкой равна

$$t_{\text{п}} = 4{,}24 - 0{,}611 \cdot 3 = 2{,}4 \text{ сек.}$$

Таким образом, паузы между проходами с кантовкой в пределах 3,5—2,5 *сек* отвечают практическим данным.

Кроме пауз между проходами, имеется пауза, необходимая для подъема верхнего валка перед задачей следующего слитка. Эту паузу обозначим $t_{\text{сл}}$.

Время $t_{\text{сл}}$ зависит от величины подъема верхнего валка и скорости перемещения верхнего валка. Время подъема верхнего валка определяем по следующей формуле [18]:

$$t_{\text{сл}} = \frac{\Delta H}{v_{\max}} + \frac{v_{\max}}{k}, \tag{42}$$

где $\Delta H = l_1 - l_n$ — перемещение верхнего валка от положения по циферблату $l_n$ в последнем калибре до положения $l_1$ в первом калибре перед задачей следующего слитка, *сек*;

$v_{\max}$ — максимальная скорость перемещения верхнего валка, которая на новых советских блюмингах 1150 составляет 150÷180 *мм/сек*;

$k = 100 \div 150$ *мм/сек*$^2$ — ускорение двигателя нажимного устройства.

Таким образом, если перемещение валка $\Delta H = 500$ *мм*, скорость перемещения $v_{\max} = 180$ *мм/сек*, а ускорение $k = 150$ *мм/сек*$^2$, то время перемещения валка будет равно

$$t_{\text{сл}} = \frac{500}{180} + \frac{180}{150} = 4 \text{ сек.}$$

Зная машинное время и паузы между проходами, определяем цикл (такт) прокатки одного слитка

$$T = \sum t_м + \sum t_п + t_{сл},$$

где $\sum t_м$ — сумма машинного времени за все проходы;
$\sum t_п$ — время всех пауз между проходами;
$t_{сл}$ — время подъема валка перед задачей следующего слитка.

Часовая производительность блюминга равна

$$p = \frac{3600 \cdot Q}{T} \ т/ч, \tag{43}$$

где 3600 — число секунд в одном часе;
$Q$ — масса слитка, $т$;
$T$ — такт прокатки, *сек.*

Если на блюминге в течение года прокатывают блюмы различных сечений с разной производительностью $p_1$, $p_2$, $p_3$ и т. д., то средняя часовая производительность блюминга за год равна

$$p_{ср} = \frac{100}{\frac{a_1}{p_1} + \frac{a_2}{p_2} + \frac{a_3}{p_3} + \cdots + \frac{a_n}{p_n}} \ т/ч, \tag{44}$$

где $a_1$, $a_2$, $a_3$ и т. д. — удельный вес различных блюмов, прокатываемых за год, %.

Чтобы определить годовую производительность блюминга, необходимо определить время работы блюминга в году.

Если на планово-предупредительный ремонт принять 1 день в месяц и на капитальный ремонт 4 дня за год, то производственное время работы блюминга составит

$$(365 - 16)\ 24 = 8376 \ ч.$$

Принимая внутрисменные простои равными 8÷10%, получим фактическое горячее время работы блюминга в году

$$8376\ (0{,}90 \div 0{,}92) = 7500 \div 7700 \ ч,$$

т. е. в среднем 7600 *ч.*

Годовая производительность блюминга составит

$$P = 7600 K p_{ср} \ т, \tag{45}$$

где $p_{ср}$ — часовая производительность блюминга с учетом прокатки различных блюмов;
$K$ — коэффициент, учитывающий снижение годовой производительности за счет неучтенных простоев и колебания ритма прокатки (для блюминга можно принять $K$ = = 0,9÷0,95).

Рассчитаем производительность блюминга 1150 при прокатке слитка $\frac{815 \cdot 735}{755 \cdot 675} \cdot 2100$ *мм* в блюм 285 × 285 *мм* согласно примеру 1 *.

В табл. 19 приведена схема обжатий, длины раскатов и катающие диаметры, на основе которых определяем машинное время и время пауз между проходами.

При расчете длины раската плотность горячего раската принимаем равной $\gamma = 7{,}5$ *т/м*³. Плотность недеформированного металла принимаем равной 7 *т/м*³ для слитка спокойной стали и 6,3 *т/м*³ для кипящей.

За первые четыре прохода слиток уплотняется до удельной плотности стали в горячем состоянии, т. е. до 7,5 *т/м*³.

В первых четырех проходах уплотнение слитка можно считать равномерным, т. е. по проходам 1—4 плотность (*т/м*³) слитка соответственно составит 7,0; 7,2; 7,4 и 7,5 для спокойной стали и 6,3; 6,8; 7,2 и 7,5 для кипящей стали.

Определив объем металла $v = \frac{Q}{\gamma}$ *м*³, находим длину раската по проходам

$$l = \frac{v}{0{,}97bh},$$

где 0,97 — коэффициент, учитывающий закругления.

Для упрощения можно определить длину раската для 4-го прохода, приняв $\gamma = 7{,}5$ *т/м*³, а в предыдущих трех проходах приращение длины распределить равномерно.

В нашем примере (см. табл. 20) длина раската в четвертом проходе равна

$$l = \frac{Q}{\gamma \cdot 0{,}97 \cdot bh} = \frac{8}{7{,}5 \cdot 0{,}97 \cdot 545 \cdot 645} = 3{,}14 \text{ м}.$$

Высота слитка 2,1 *м*. Приращение длины распределяется на четыре прохода, примерно по 0,25 *м* в каждом проходе.

Для остальных проходов определяем значения длины по приведенному выражению, исходя из массы слитка 8 *т*, плотности $\gamma = 7{,}5$ *т/м*³ и размеров сечения раската в данном проходе (см. табл. 20).

Определяем машинное время для каждого прохода.

*1-й проход*. Принимаем числа оборотов $n_з = 10$ *об/мин* и $n_в = 15$ *об/мин*. Определяем максимальное число оборотов по формуле (37) при $a = 30$ *об/(мин·сек)* и $b = 60$ *об/(мин·сек)*:

$$n_{max} = 49 \sqrt{\frac{2{,}35}{3{,}14 \cdot 1} + \frac{10^2}{3600} + \frac{15^2}{7200}} = 44 \text{ об/мин},$$

* См. с. 74.

т. е. $n_{max} < 50$, поэтому для определения $t_м$ пользуемся формулой (33) для диаграммы первого типа

$$t_м = \frac{44-10}{30} + \frac{44-15}{60} = 1{,}62 \text{ сек.}$$

*2-й проход.* После прохода имеется кантовка, поэтому выброс происходит при больших скоростях, но $n_{max} \leqslant 50$ *об/мин.*

Принимаем $n_э = 10$. Определяем $n_{max}$ по формуле (39):

$$n_{max} = 60\sqrt{\frac{2{,}6}{3{,}14 \cdot 1} + \frac{10^2}{3600}} = 55{,}6 \text{ об/мин.}$$

Принимаем $n_{max} = 50$ *об/мин* и определяем $t_м$ по формуле (35) в соответствии с диаграммой четвертого типа:

$$t_м = \frac{60 \cdot 2{,}60}{3{,}14 \cdot 1 \cdot 50} + \frac{50-10}{30}\left(1 - \frac{10+50}{2 \cdot 50}\right) = 1{,}43 \text{ сек.}$$

Аналогично рассчитываем машинное время для остальных проходов и результаты расчета заносим в табл. 19.

Таблица 19

**Результаты расчета машинного времени и пауз при прокатке на блюминге**

| Номер прохода | Длина раската $l$, м | $D_к$, м | $n_э$, об/мин | $n_в$, об/мин | $n_{max}$, об/мин | | | $t_м$, сек по формулам | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | по формуле (37) | по формуле (39) | принимаемое[1] | (32) | (33) | (35) |
| 1 | 2,35 | 1,00 | 10 | 15 | 44 | — | 44 | — | 1,62 | — |
| 2 | 2,60 | 1,00 | 10 | 50 | — | 55,6 | 50 | — | — | 1,43 |
| Кантовка | | | | | | | | | | |
| 3 | 2,85 | 1,00 | 15 | 20 | 50 | — | 50 | — | 1,62 | — |
| 4 | 3,14 | 1,00 | 15 | 20 | 51 | — | 50 | 1,76 | — | — |
| 5 | 3,57 | 1,00 | 15 | 20 | 54 | — | 50 | 1,95 | — | — |
| 6 | 4,12 | 1,00 | 15 | 50 | — | 70,1 | 50 | — | — | 1,99 |
| Кантовка | | | | | | | | | | |
| 7 | 4,57 | 0,95 | 20 | 30 | 65,1 | — | 66,5 | — | 2,09 | — |
| 8 | 5,17 | 0,95 | 20 | 30 | 69 | — | 70 | — | 2,28 | — |
| 9 | 6,00 | 0,95 | 20 | 40 | 70 | — | 70 | 2,33 | — | — |
| 10 | 7,18 | 0,95 | 25 | 50 | — | 96,5 | 70 | 2,59 | — | — |
| Кантовка | | | | | | | | | | |
| 11 | 8,73 | 0,97 | 25 | 40 | 72 | — | 70 | 3,05 | — | — |
| 12 | 11,1 | 0,97 | 30 | 50 | 80 | — | 70 | 3,56 | — | — |
| Кантовка | | | | | | | | | | |
| 13 | 13,5 | 0,97 | 35 | 80 | — | 131 | 80 | — | — | 3,74 |

[1] Согласно данным, приведенным в табл. 18.

Значения чисел оборотов и машинное время по проходам приведены в табл. 20.

Таблица 20

**Продолжительность прокатки на блюминге**

| Номер прохода | $h$, мм | $b$, мм | Длина раската $l$, м | $D_к$, мм | $n_з$, об/мин | $n_{max}$, об/мин | $n_в$, об/мин | $t_м$, сек | $t_п$, сек | Средняя скорость $v_{ср} = \frac{l}{t_м}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 815/755 | 735/675 | 2,1 | 1000 | — | — | — | — | — | — |
| 1 | 700 | 740 | 2,35 | 1000 | 10 | 44,0 | 15 | 1,62 | 1,5 | 1,46 |
| 2 | 635 | 745 | 2,60 | 1000 | 10 | 50 | 50 | 1,43 | 3,1 | 1,82 |
| | | | | Кантовка | | | | | | |
| 3 | 625 | 640 | 2,85 | 1000 | 15 | 50 | 20 | 1,62 | 1,7 | 1,70 |
| 4 | 545 | 645 | 3,14 | 1000 | 15 | 50 | 20 | 1,76 | 1,7 | 1,78 |
| 5 | 475 | 650 | 3,57 | 1000 | 15 | 50 | 20 | 1,95 | 1,8 | 1,83 |
| 6 | 405 | 660 | 4,12 | 1000 | 15 | 50 | 50 | 1,99 | 3,0 | 2,07 |
| | | | | Кантовка | | | | | | |
| 7 | 580 | 415 | 4,57 | 950 | 20 | 66,5 | 30 | 2,09 | 2,1 | 2,19 |
| 8 | 500 | 425 | 5,17 | 950 | 20 | 70 | 30 | 2,28 | 2,1 | 2,27 |
| 9 | 420 | 435 | 6,00 | 950 | 20 | 70 | 40 | 2,33 | 2,4 | 2,57 |
| 10 | 340 | 450 | 7,18 | 950 | 25 | 70 | 50 | 2,59 | 2,5 | 2,77 |
| | | | | Кантовка | | | | | | |
| 11 | 355 | 355 | 8,73 | 970 | 25 | 70 | 40 | 3,05 | 2,6 | 2,86 |
| 12 | 265 | 375 | 11,1 | 970 | 30 | 70 | 50 | 3,56 | 2,8 | 3,12 |
| | | | | Кантовка | | | | | | |
| 13 | 285 | 285 | 13,5 | 970 | 35 | 80 | 80 | 3,74 | — | 3,61 |
| | | | | | $\sum t_м \approx 30,1$ | | | | $\sum t_п = 27,3$ | |

Затем определяем паузы между проходами. Воспользуемся формулами, полученными на основе обработки практических данных методом корреляции. Для паузы между проходами без кантовки

$$t_п = 0,345 + 0,781 v_{ср},$$

где $v_{ср} = \frac{l}{t_м}$ — средняя скорость прокатки перед паузой.

Для паузы с кантовкой

$$t_{\text{п}} = 4{,}24 - 0{,}611 v_{\text{ср}}.$$

В табл. 20 приведены данные средней скорости прокатки и время пауз между проходами, подсчитанное по этим формулам. Величины пауз округляем до 0,1 *сек*.

Время паузы для подъема валка перед задачей следующего слитка определяем по формуле (42).

Принимаем максимальную скорость перемещения валка $v_{\max} = 180$ *мм/сек*, ускорение $k = 150$ *мм/сек*$^2$, величина подъема валка, согласно табл. 14, составляет

$$\Delta H = l_1 - l_n = 550 - 105 = 445 \text{ мм}.$$

Тогда время подъема валка будет равно

$$t_{\text{сл}} = \frac{445}{180} + \frac{180}{150} = 3{,}7 \text{ сек}.$$

Таким образом, такт (темп) прокатки одного слитка составляет

$$\sum t_{\text{м}} + \sum t_{\text{п}} + t_{\text{сл}} = 30{,}1 + 27{,}3 + 3{,}7 = 61{,}1 \text{ сек}.$$

Полученное время прокатки хорошо согласуется с практическими данными прокатки слитка массой 8 *т* в блюм 285 × 285 *мм*.

Часовая производительность при прокатке этого слитка на блюминге 1150 составляет

$$p = \frac{3600 \cdot 8}{61{,}1} = 470 \text{ т/ч}.$$

Годовая производительность блюминга при прокатке только блюмов 285 × 285 *мм* составит

$$P = 0{,}95 \cdot 470 \cdot 7600 = 3\,400\,000 \text{ т}.$$

Если принять режим обжатий слитка за 11 проходов (табл. 21), то такт прокатки составит

$$T = 26{,}7 + 21{,}7 + 3{,}7 = 52{,}1 \text{ сек}.$$

В этом случае часовая производительность составит

$$p = \frac{3600 \cdot 8}{52{,}1} \approx 553 \text{ т/ч}.$$

Годовая производительность блюминга при прокатке блюмов 285×285 *мм* будет равна

$$P = 0{,}95 \cdot 553 \cdot 7600 \approx 4\,000\,000 \text{ т}.$$

Таким образом, сокращение числа проходов на два значительно повышает производительность блюминга.

За последнее время для увеличения производительности блюминга применяют двухслитковую (спаренную) прокатку, сущность

которой заключается в том, что два слитка прокатывают одновременно, т. е. в каждом проходе оба раската следуют один за другим. Между идущими друг за другом раскатами стремятся не допускать разрыва, чтобы избежать ударов в линии передачи стана. Первые кантовки, когда раскаты короткие, производят одновременно, с увеличением длины раскатов вначале кантуют и задают в валки передний раскат, после чего кантуют и прокатывают второй раскат.

Таблица 21

**Режим прокатки на блюминге за 11 проходов (в соответствии с табл. 15)**

| Номер прохода | $h$, мм | $b$, мм | Длина раската $l$, м | $D_к$, м | $n_з$, об/мин | $n_{max}$, об/мин | $n_в$, об/мин | $t_м$, сек | $t_п$, сек | $v_{ср} = \frac{l}{t_м}$, м/сек |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 815/755 | 735/675 | 2,1 | — | — | — | — | — | — | — |
| 1 | 690 | 740 | 2,5 | 1.0 | 10 | 45 | 15 | 1,67 | 1,5 | 1,50 |
| 2 | 600 | 745 | 2,7 | 1,0 | 10 | 50 | 15 | 1,76 | 1,5 | 1,53 |
| 3 | 510 | 750 | 3,14 | 1,0 | 15 | 50 | 20 | 1,76 | 1,7 | 1,78 |
| 4 | 420 | 755 | 3,60 | 1,0 | 15 | 50 | 20 | 1,94 | 3,1 | 1,86 |
| 5 | 635 | 425 | 4,05 | 0,95 | 20 | 62 | 30 | 1,92 | 2,0 | 2,11 |
| 6 | 535 | 435 | 4,72 | 0,95 | 20 | 66 | 30 | 2,30 | 2,0 | 2,05 |
| 7 | 440 | 445 | 5,70 | 0,95 | 20 | 70 | 40 | 2,35 | 2,3 | 2,43 |
| 8 | 345 | 455 | 7,0 | 0,95 | 25 | 70 | 50 | 2,55 | 2,6 | 2,75 |
| 9 | 355 | 360 | 8,58 | 0,97 | 25 | 70 | 40 | 3,05 | 2,6 | 2,82 |
| 10 | 260 | 380 | 11,10 | 0,97 | 30 | 70 | 50 | 3,64 | 2,4 | 3,05 |
| 11 | 285 | 285 | 13,5 | 0,97 | 35 | 80 | 80 | 3,74 | — | 3,61 |
| | | | | | | | | $\sum t_м \approx 26,7$ | $\sum t_п = 21,7$ | |

Впервые двухслитковую прокатку освоили на заводе им. Дзержинского в 1957 г.*

В результате применения двухслитковой прокатки время прокатки одной пары слитков уменьшилось на 25—30% по сравнению с одиночной прокаткой двух слитков. В настоящее время спаренную прокатку применяют на Криворожском, Череповецком, Магнитогорском и других заводах.

Такт прокатки сокращается за счет уменьшения почти вдвое вспомогательного времени на слиток. При двухслитковой прокатке удается не снижать средней скорости прокатки, а в отдельных случаях даже ее увеличить.

---

* А. П. Чекмарев, В. И. Мелешко, В. Л. Павлов, В. Д. Чехранов. Сталь, 1959, № 3, с. 243.

Если по нашим расчетам время прокатки двух одиночных слитков при 13 проходах составляет 2 × 61,1 *сек*, то при спаренной прокатке можно ожидать уменьшения такта на 25—30%, т. е. он будет составлять 92—86 *сек*. Следовательно, производительность блюминга при спаренной прокатке блюма 285 × 285 *мм* может достигнуть 4,5 млн. *т* слитков в год.

Таким образом, спаренная прокатка создает большой резерв для дальнейшего увеличения производительности блюминга.

За счет применения кантователя на задней стороне стана можно сократить число проходов при прокатке фасонной заготовки и слябов, что дает возможность повысить производительность блюмингов примерно на 13—15% *. Кроме того, кантовка раската на задней стороне блюминга после первого прохода и на передней после второго прохода обеспечит лучшее качество металла, особенно при прокатке слитков спокойной стали.

Кантовка раската на задней стороне малого блюминга 900, работающего в качестве обжимной клети рельсо-балочного стана, имеет большое значение при прокатке различных профилей и является необходимой операцией.

Как указывалось выше, режим обжатий на блюминге тесно связан со скоростным режимом прокатки. Хотя в большинстве случаев уменьшение числа проходов является основным фактором, обеспечивающим увеличение производительности блюминга, однако, в связи с автоматизацией работы блюмингов большое значение имеет надежный захват при прокатке. При больших обжатиях захват валками слитка ухудшается и двигатель разгоняется менее интенсивно.

Поэтому необходимо применять высокоскоростные двигатели с малым маховым моментом с целью увеличения скорости прокатки после захвата и быстрой остановки валков после выброса раската. Это дает возможность при неизменном числе проходов уменьшить машинное время на 12—15% даже при малой окружной скорости валков в момент захвата.

Уменьшение пауз между проходами также является важным фактором для уменьшения цикла прокатки на блюминге. Кроме того, увеличение чисел оборотов привода нажимного устройства, линеек манипулятора, рабочих рольгангов также обеспечивает сокращение времени прокатки слитка.

Таким образом, комплексная автоматизация блюминга с применением электронного счетно-решающего устройства в сочетании с надежными углами захвата и увеличенными скоростями обеспечит дальнейшее увеличение производительности блюмингов на 7—10% **.

---

* Б. М. Шум. Сталь, 1955, № 3, с. 243.

** Л. В. Андреюк. В сб. «Технический прогресс в прокатном производстве». Материалы международного 3-го симпозиума по металлургии. Изд-во «Металлургия», 1968, с. 135.

Глава III

# ПРОКАТКА И КАЛИБРОВКА ВАЛКОВ НЕПРЕРЫВНЫХ ЗАГОТОВОЧНЫХ СТАНОВ

## 1. ХАРАКТЕРИСТИКА НЕПРЕРЫВНЫХ ЗАГОТОВОЧНЫХ СТАНОВ

Сортопрокатные, проволочные и штрипсовые непрерывные станы работают на исходной катаной квадратной (или плоской) заготовке сечением от 60 × 60 до 150 × 150 *мм*. Прокатывать заготовку таких малых размеров на блюмингах нецелесообразно из-за резкого снижения их производительности. Экономически более выгодно на блюмингах прокатывать блюмы сечением от 240 × 240 до 400 × 400 *мм*, а более мелкую заготовку получать из них на заготовочных станах непрерывного или линейного типа [1].

Непрерывные заготовочные станы располагают в одном пролете с блюмингом. Они состоят из 4—14 рабочих клетей дуо, расположенных в одной или в двух непрерывных группах [15, 19—22, 24].

Станы эти бывают двух типов: с индивидуальными приводными двигателями в каждой клети и с жесткой кинематической связью.

В последнее время на нескольких отечественных и зарубежных металлургических заводах установлены новые современные высокопроизводительные непрерывные заготовочные станы конструкции ВНИИМетМаш и ЮУМЗ, которые отличаются от старых применением рабочих клетей с горизонтальными и вертикальными валками и индивидуальным приводом рабочих клетей. Применение чередующихся клетей с горизонтальными и вертикальными валками позволило отказаться от кантующей арматуры, благодаря чему уменьшилось количество поверхностных дефектов на полосе и появилась возможность прокатывать на таких станах слябы, трубную заготовку и другие профили, кантовка которых затруднена.

Одним из новых непрерывных заготовочных станов является стан 900/700/500, характеристика которого приведена в табл. 22.

Сортамент стана включает квадратные заготовки сечением 80 × 80÷170 × 170 *мм*, плоские заготовки 100 × 150÷400 *мм*, круглую сталь диаметром 105, 120, 140, 150, 170 и 220 *мм* из угле-

[1] Заготовочные станы трио линейного типа описаны в гл. IV.

Таблица 22

## Характеристика непрерывного заготовочного стана 900/700/500

| Группа клетей | Номер клети | Расстояние между клетями, *м* | Размеры валков, *мм* | | Максимальный рабочий раствор валков, *мм* | Максимальное давление металла на валки | | Максимальный момент прокатки | | Передаточное число редуктора, *i* | Число оборотов валков *n*, *об/мин* | Диаметр валков после последней переточки *мм* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | диаметр | длина бочки | | *Мн* | *Т* | *Мн·м* | *Т·м* | | | |
| I | 1г | — | 900 | 1300 | 1050 | 6,74 | 678 | 1,01 | 103 | 24,5 | 5,7—14,7 | 860 |
| | 2г | 5,5 | 900 | 1300 | 1050 | 6,74 | 678 | 1,01 | 103 | 19,17 | 7,3—18,8 | 860 |
| | 3г | 26,2 | 900 | 1300 | 1050 | 6,74 | 678 | 1,01 | 103 | 16,218 | 8,5—19,2 | 860 |
| | 4г | 5,5 | 900 | 1300 | 1050 | 6,74 | 678 | 1,01 | 103 | 13,32 | 10,5—27,0 | 860 |
| | 5в | 7,0 | 730 | 800 | 890 | 3,70 | 368 | 0,4 | 41 | 9,3 | 15,1—38,7 | 660 |
| | 6г | 5,5 | 730 | 1300 | 740 | 3,97 | 405 | 0,35 | 36 | 7,25 | 19,3—49,7 | 680 |
| | 7в | 5,5 | 730 | 800 | 890 | 3,10 | 316 | 0,40 | 41 | 6,23 | 22,5—57,8 | 660 |
| | 8г | 5,5 | 730 | 1300 | 740 | 3,97 | 405 | 0,35 | 36 | 4,83 | 29,0—74,5 | 680 |
| II | 9в | 84,9 | 580 | 800 | 660 | 1,87 | 192 | 0,175 | 17,9 | 3,2 | 43,8—112,5 | 530 |
| | 10г | 5,0 | 580 | 800 | 590 | 1,46 | 149 | 0,133 | 13,6 | 2,54 | 55,1—141,5 | 530 |
| | 11в | 5,0 | 580 | 800 | 660 | 1,87 | 192 | 0,175 | 17,9 | 2,1 | 69,0—178,0 | 530 |
| | 12г | 5,0 | 580 | 800 | 590 | 1,46 | 149 | 0,133 | 13,6 | 1,88 | 75,0—192,5 | 530 |
| | 13в | 5,0 | 580 | 800 | 660 | 1,87 | 192 | 0,175 | 17,9 | 1,82 | 159,5—236,5 | 530 |
| | 14г | 5,0 | 580 | 800 | 590 | 1,46 | 149 | 0,133 | 13,6 | 1,47 | 196,5—289,5 | 530 |

Примечание. Обозначение: г — клети с горизоитальиыми валками, в — клети с вертикальными валками.

родистых и легированных сталей. Исходным материалом служат блюмы сечением 300 × 300—370 × 370 *мм*.

Непрерывный заготовочный стан 900/700/500 состоит из 14 рабочих клетей, расположенных в двух группах (рис. 52). В состав первой группы входят две горизонтальные клети 900, за которыми на расстоянии 26,2 *м* расположены четыре клети с горизонтальными и две клети с вертикальными валками. Первые четыре клети первой группы имеют валки диаметром 900 *мм*, остальные — диаметром 730 *мм*. Перед третьей клетью установлен кантователь.

Расстояние между первой и второй группами стана 84,9 *м*. Крупные заготовки сечением 120 × 120 — 170 × 170 *мм* после

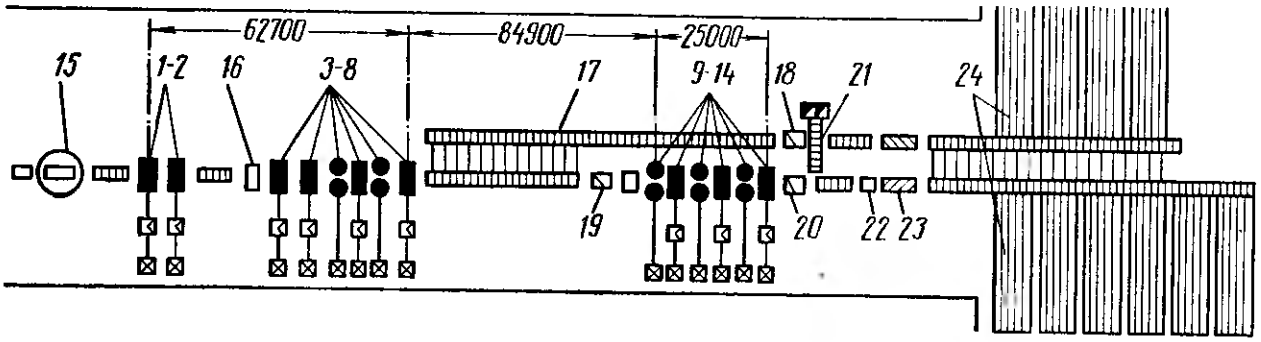



Рис. 52. Схема расположения оборудования непрерывного заготовочного стана 900/700/500:

*1—2* — отдельно стоящие клети 900; *3—8* — первая группа; *9—14* — вторая группа; *15* — поворотиый стол; *16* — кантователь; *17* — обводиой рольганг; *18* — ножницы для резки раскатов после первой группы; *19* — аварийные ножницы; *20* — летучие ножиицы; *21* — конвейер уборки обрезков; *22* — клеймитель; *13* — пакетирующий рольгаиг; *24* — холодильники

прокатки в первой группе по передаточным шлепперам поступают на обводной рольганг к стационарным ножницам с плавающим валом. Ножницы имеют максимальное усилие реза 10 *Мн* (1000 *Т*) и могут разрезать одновременно три раската сечением 170 × × 170 *мм* на заготовки длиной 4÷12 *м*. За стационарными ножницами расположены клеймовочная машина и пакетирующий рольганг.

Перед второй группой рабочих клетей расположены электрические маятниковые ножницы эксцентрикового типа с усилием реза 2 *Мн* (200 *Т*) и кантователь. Маятниковые ножницы служат для обрезки дефектных головных частей прокатываемой заготовки и могут применяться для аварийного реза в случае застревания заготовки в одной из клетей второй группы. В составе второй группы работают шесть чередующихся вертикальных и горизонтальных клетей с валками диаметром 580 *мм*. Скорость выхода металла из последней клети стана достигает 7,0 *м/сек*.

За второй группой установлены планетарные летучие ножницы с максимальным усилием реза 1,5 *Мн* (150 *Т*). Ножницы могут разрезать раскат сечением до 120 × 120 *мм* при 850—900° С на заготовки длиной 5—6 и 10—12 *м*. После ножниц заготовки попадают в клеймовочную машину и на пакетирующий рольганг.

Все рабочие клети имеют индивидуальные приводные двигатели мощностью по 1800 *квт* ($n = 170 \div 360$ *об/мин*), в последних двух клетях — двигатели мощностью по 2900 *квт* ($n = 290 \div 430$ *об/мин*). Регулируют скорость вращения изменением тока двигателя. Регулируемый индивидуальный привод клетей упрощает калибровку валков и позволяет распределить обжатия по отдельным клетям более рационально, чем в станах с жесткой кинематической связью.

В отличие от всех действующих на новых непрерывных заготовочных станах предусмотрена возможность прокатки квадратной заготовки сечением 120 × 120 *мм* во второй группе клетей в калибрах системы ромб—квадрат.

Кроме станов 900/700/500, в нашей стране изготовлено несколько станов 850/700/500, состоящих из первой группы — с четырьмя горизонтальными и двумя вертикальными клетями и второй группы — из чередующихся трех клетей с вертикальными и трех клетей с горизонтальными рабочими валками [24].

Непрерывные заготовочные станы с жесткой кинематической связью характеризуются наличием постоянной механической передачи между отдельными клетями и, следовательно, постоянным отношением чисел оборотов. Последнее обстоятельство затрудняет калибровку валков и вынуждает выбирать коэффициенты вытяжки в соответствии с соотношением скоростей прокатки.

## 2. ПРИНЦИП РАСЧЕТА КАЛИБРОВКИ НЕПРЕРЫВНЫХ ЗАГОТОВОЧНЫХ СТАНОВ

Основным условием непрерывной прокатки является равенство секундных объемов металла, проходящих через любую клеть:

$$q_1 v_{п1} = q_2 v_{п2} = q_3 v_{п3} = \cdots = q_i v_{пi} = \text{const}, \qquad (46)$$

где $q$ — сечение полосы после выхода из валков;
$v_п$ — скорость выхода полосы из валков;
$qv_п$ — секундный объем металла, проходящий через каждую клеть.

На непрерывных станах с индивидуальными приводными двигателями можно во время прокатки исправить возникающее неравенство секундных объемов регулировкой скоростей вращения или изменением настройки валков. На непрерывных станах с групповым приводом регулировка скорости вращения в каждой клети невозможна. Регулирование константы изменением настройки валков также ограничено, так как изменение размеров прокатываемой полосы в одной клети может повлечь за собой натяжение или подпор в соседних клетях.

При расчете калибровки непрерывных заготовочных станов и особенно станов с жесткой кинематической связью следует учитывать скорость прокатки по клетям.

Скорость полосы с учетом опережения равна

$$v_{п1} = v_1 k_1;$$
$$v_{п2} = v_2 k_2;$$
$$v_{п3} = v_3 k_3;$$
$$\ldots\ldots$$
$$v_{пi} = v_i k_i,$$

где $v_1, v_2, \ldots v_i$ — окружные скорости валков;
$k_1, k_2, \ldots k_i$ — коэффициенты опережения.

Следовательно, равенство секундных объемов можно записать следующим образом:

$$q_1 v_1 k_1 = q_2 v_2 k_2 = q_3 v_3 k_3 = \cdots = q_i v_i k_i,$$

откуда

$$\frac{q_1}{q_2} = \frac{v_2 k_2}{v_1 k_1} = \mu_2; \quad \frac{q_2}{q_3} = \frac{v_3 k_3}{v_2 k_2} = \mu_3; \quad \ldots \quad \frac{q_{i-1}}{q_i} = \frac{v_i k_i}{v_{i-1} k_{i-1}} = \mu_i;$$

где $\mu$ — коэффициент вытяжки.

Окружная скорость валков равна

$$v = \frac{\pi D_к n}{60}.$$

Равенство секундных объемов можно записать следующим образом:

$$q_1 D_{к1} n_1 k_1 = q_2 D_{к2} n_2 k_2 = \cdots = q_i D_{кi} n_i k_i = K, \qquad (47)$$

где $D_к$ — катающий диаметр валков;
$n$ — число оборотов валков;
$K$ — постоянная величина — константа калибровки.

Размерность константы *мм³·об/мин*, но обычно в расчетах и технической литературе ее не указывают. При точном соблюдении константы прокатка происходит без натяжения и без подпора (петлеобразования).

На практике прокатка без натяжения и без подпора невозможна, так как при незначительных изменениях условий деформации — температуры прокатываемого металла, коэффициента трения в результате износа калибров, зазора между валками из-за износа подшипников и т. п. — изменяются размеры выходящей полосы и величина опережения.

Прокатку с образованием петли между клетями (с подпором) на непрерывных заготовочных станах не применяют из-за опасности поломок. Обычно прокатку ведут с небольшим натяжением полосы между клетями. Для этого секундный объем металла, проходящего через каждую последующую клеть, принимают на 1—2% больше, чем в предыдущей клети. Этому же способствует и увели-

чение скорости выхода полосы по сравнению с расчетной вследствие роста опережения по мере уменьшения толщины раската. Из этих соображений в расчете можно не учитывать коэффициент опережения, принимая $K = qDn$.

Таким образом, если стан состоит из шести клетей, то константа клети 6 равна

$$K_6 = q_6 D_6 n_6;$$

клети 5

$$K_5 = \frac{K_6}{1{,}01 \div 1{,}02};$$

клети 4

$$K_4 = \frac{K_5}{1{,}01 \div 1{,}02} \text{ и т. д.}$$

При практических расчетах калибровок непрерывных станов важно соблюдать равенство произведений переменных величин. В зависимости от конструкции стана постоянства константы калибровки достигают различными способами. На станах с индивидуальными приводными двигателями равенство секундных объемов можно обеспечить за счет подбора чисел оборотов двигателей, а на станах с жесткой кинематической связью — за счет соответствующей калибровки валков и подбора их диаметров, а также регулировкой зазоров между валками.

В случае, если по результатам расчетов константа в каких-либо клетях меньше необходимой, корректировать можно: 1) увеличением высоты полосы $h$, уменьшая обжатие $\Delta h$; 2) увеличением ширины полосы $b$, изменяя степень ограничения уширения (при неизменных высоте и обжатии); 3) одновременным увеличением высоты и ширины полосы; 4) увеличением катающего диаметра валков за счет увеличения зазора между валками и их начальных диаметров.

Четвертый способ можно применять для расчета реберных проходов при прокатке слябов на непрерывных заготовочных станах, так как катающий диаметр сильно уменьшается при глубоком врезе.

В том случае, если по результатам расчетов получается константа больше необходимой, корректировку производят: 1) уменьшением высоты полосы $h$ за счет увеличения обжатия $\Delta h$; 2) уменьшением задаваемой высоты $H$, если достигнут максимально допускаемый угол захвата (20—30—32°); 3) уменьшением ширины полосы $b$ за счет ограничения уширения (если первоначально принято свободное уширение).

Корректировку константы уменьшением начального диаметра производить не рекомендуется, если это может привести к ослабле-

нию валков и увеличению угла захвата выше максимально допустимого.

Корректировать константу иногда можно изменением натяжения по отдельным клетям в допустимых пределах (0,5—3,0%). В наиболее трудных случаях приходится изменять начальное или конечное сечение заготовок.

Квадратные заготовки на непрерывных заготовочных станах прокатывают в ящичных (прямоугольных), ромбических и квадратных калибрах.

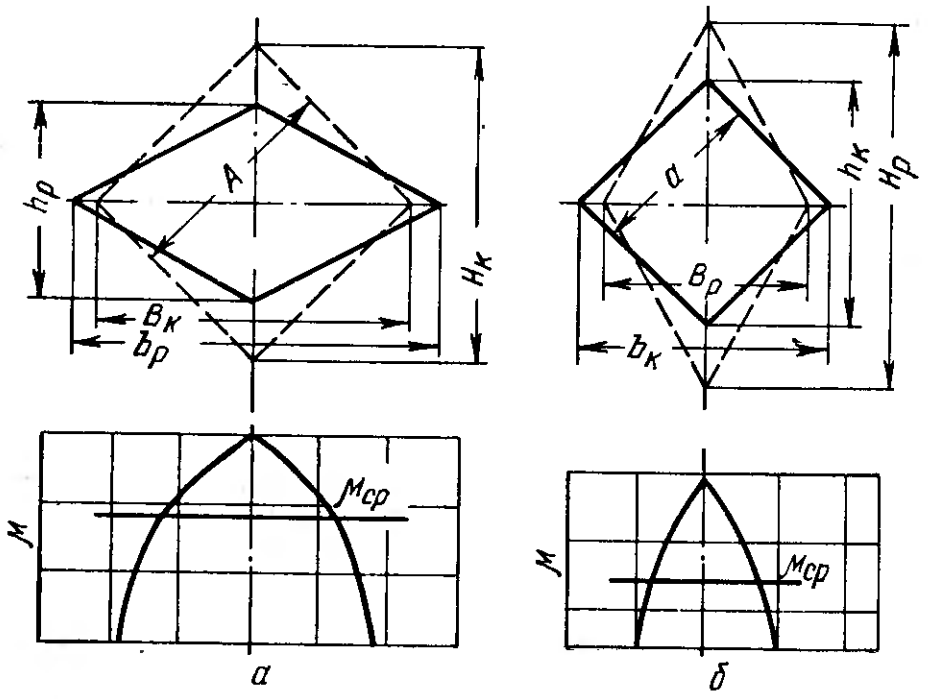



Рис. 53. Распределение абсолютного обжатия и коэффициентов высотной деформации по ширине калибров:

*а* — в ромбическом; *б* — в квадратном

Ромбические и квадратные калибры наибольшее распространение получили на сортопрокатных станах. При прокатке заготовок систему ромб—квадрат (см. рис. 22) обычно применяют для сечений не более 120 × 120 *мм*. Основное преимущество этой системы состоит в возможности получения правильных по конфигурации квадратных сечений с хорошо выполненными углами. Наличие промежуточных квадратных калибров дает возможность получать заготовку или готовый профиль квадратного сечения нескольких размеров, например из второго и четвертого калибров (см. рис. 22). Система ромб—квадрат обеспечивает устойчивость прокатываемой полосы в калибрах.

В отличие от ящичных калибров система ромб—квадрат характеризуется некоторой неравномерностью деформации по ширине полосы (рис. 53). При прокатке квадратной полосы в ромбическом калибре и ромбической полосы в квадратном калибре наибольшее абсолютное обжатие и высотная деформация наблюдается посередине ширины полосы и уменьшаются к краям. Закругления углов

в вершинах калибра и раската несколько снижают эту неравномерность.

Уширение при прокатке ромбической полосы в квадратном калибре можно определить по графикам зависимости уширения от коэффициента вытяжки и стороны квадрата (рис. 54—57), построенных А. П. Чекмаревым на основании анализа работы большого числа калибровок системы ромб—квадрат на станах с вал-

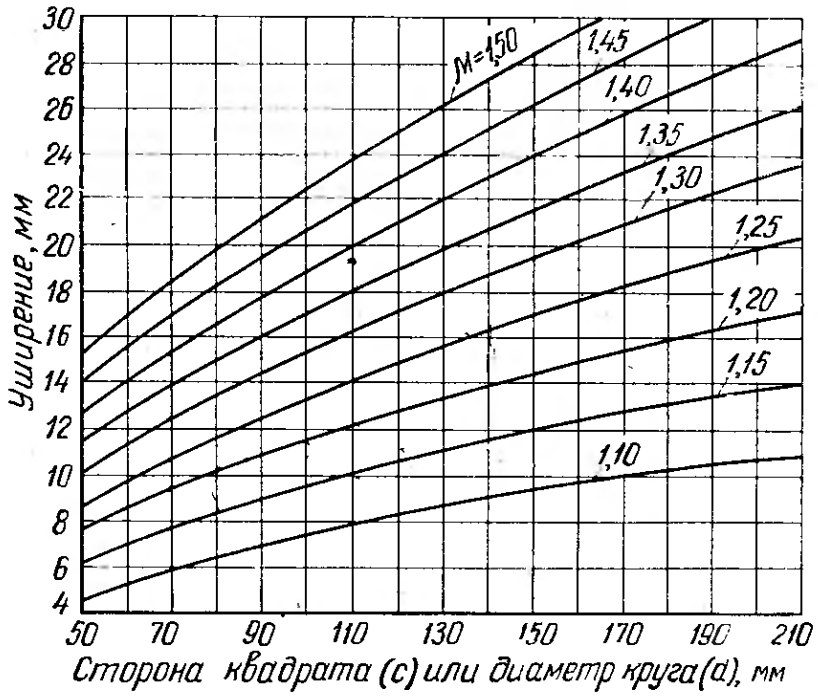



Рис. 54. Зависимость уширения при прокатке ромбической полосы в квадратном калибре или овальной полосы в круглом калибре ($D$ = 800) *мм*

ками диаметром 800, 500, 350 и 250 *мм*. При промежуточных значениях диаметров валков искомое уширение определяют интерполяцией.

Рассмотрим схему расчета пары вытяжных калибров системы ромб—квадрат. При заданных размерах квадратной полосы (сторона квадрата $c_{кв}$) размеры квадратного калибра следующие:

$$h_{кв} = 1{,}41c_{кв};$$

$$b_{кв} = h_{кв}.$$

Площадь поперечного сечения квадратного калибра с учетом закруглений равна

$$q_{кв} = 0{,}98c^2_{кв}.$$

Общий коэффициент вытяжки в паре калибров ромб—квадрат

$$\mu_{р.\,кв} = \frac{q_0}{q_{кв}},$$

где $q_0$ — площадь поперечного сечения квадратной заготовки, задаваемой в ромбический калибр.

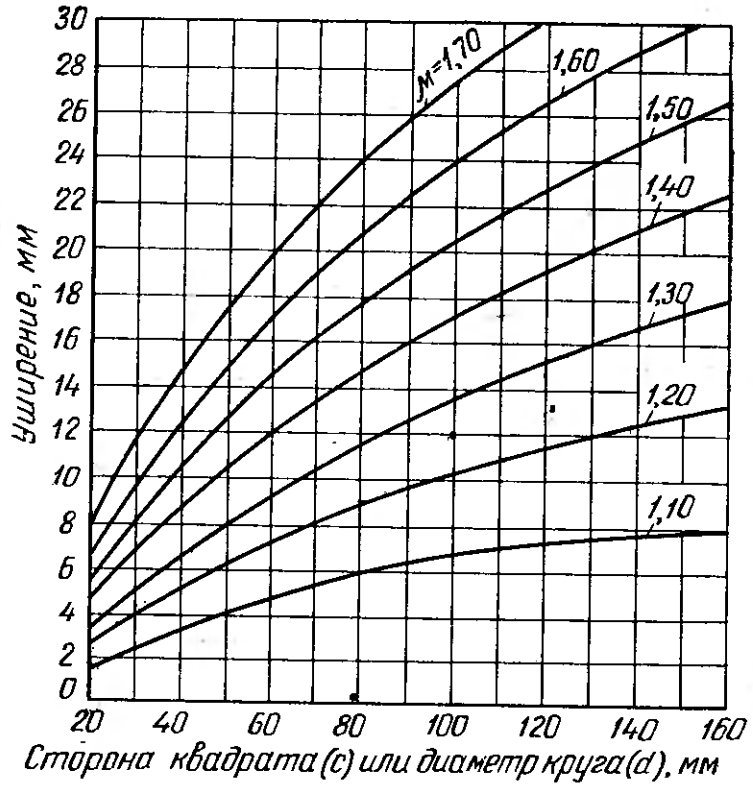



Рис. 55. Зависимость уширения при прокатке ромбической полосы в квадратном калибре или овальной полосы в круглом калибре ($D$ = = 500 *мм*)

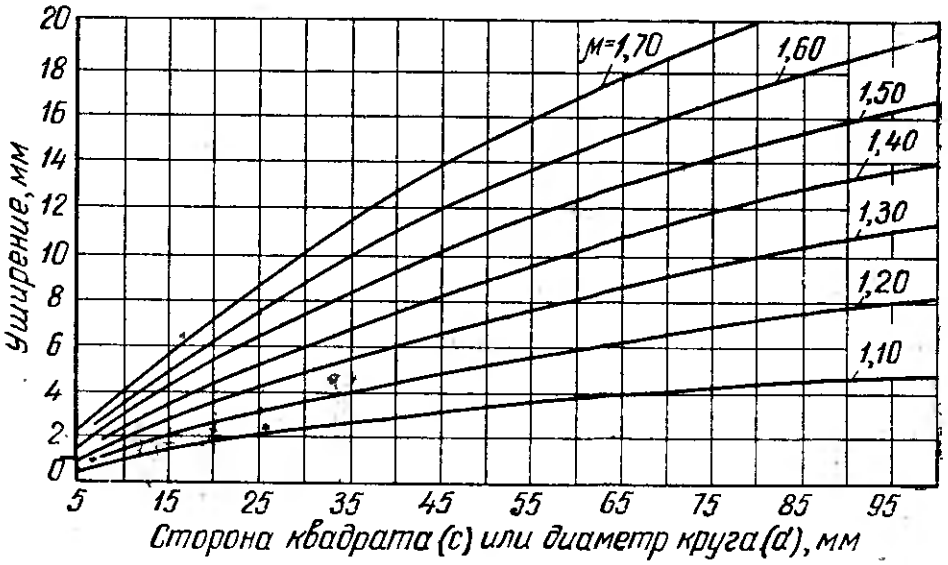



Рис. 56. Зависимость уширения при прокатке ромбической полосы в квадратном калибре или овальной полосы в круглом калибре ($D$ = 350 *мм*)

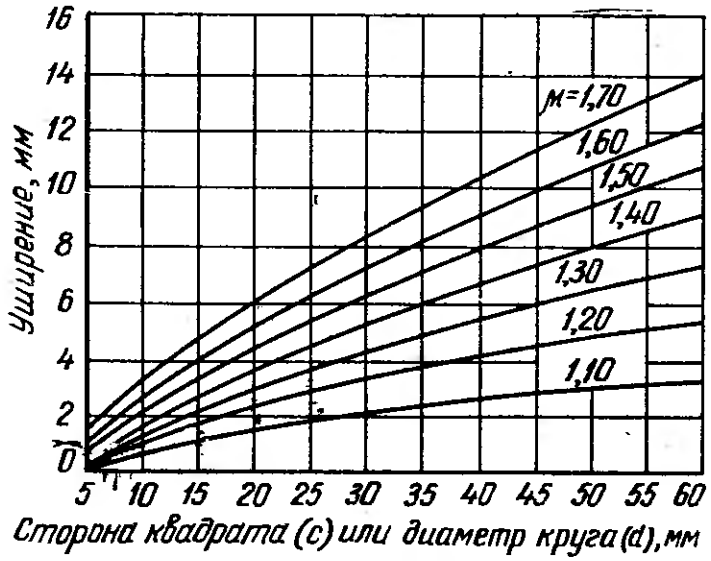



Рис. 57. Зависимость уширения при прокатке ромбической полосы в квадратном калибре или овальной полосы в круглом калибре ($D$ = 250 *мм*)

Площадь поперечного сечения полосы после ромбического калибра

$$q_р = q_{кв}\mu_{кв}.$$

Уширение ромбической полосы в квадратном калибре $\Delta b_{кв}$ определяем по графикам $\Delta b = f(c, \mu, D)$. Зная величину уширения, можно определить размеры ромбического калибра:

$$h_р = b_{кв} - \Delta b_{кв};$$

$$b_р = \frac{2q_р}{0{,}98h_р}.$$

Обжатие в квадратном калибре равно

$$\Delta h_{кв} = b_р - h_{кв},$$

в ромбическом калибре

$$\Delta h_р = 1{,}41c_0 - h_р,$$

где $c_0$ — сторона квадратной заготовки, задаваемой в ромбический калибр.

Уширение в ромбическом калибре

$$\Delta b_р = b_р - 1{,}41c_0.$$

Результаты расчета необходимо проверить по углам захвата: обычно в квадратном калибре угол захвата несколько больше, чем в ромбическом.

### 3. КОНСТРУИРОВАНИЕ И РАСПОЛОЖЕНИЕ КАЛИБРОВ НА ВАЛКАХ НЕПРЕРЫВНЫХ ЗАГОТОВОЧНЫХ СТАНОВ

На непрерывных заготовочных станах применяют прямоугольные калибры, систему ромб—квадрат и комбинации этих калибров (рис. 58).

В первых клетях первой группы применяют систему прямоугольных калибров (рис. 58, *а*), в последних двух клетях нередко врезают ромбический и квадратный калибры (рис. 58, *б*).

Во второй группе рабочих клетей применяют систему ромб—квадрат (рис. 58, *в*). Иногда в первых клетях второй группы применяют прямоугольные рабочие и холостые, а также кантующие холостые калибры. В рабочих калибрах производят обжатие раската. Холостые калибры служат для транспортировки полосы к следующей клети без обжатия. Кантующие калибры применяют для кантовки полосы, выходящей из калибра, перед подачей в следующую клеть.

Во всех рассмотренных выше системах калибровки полосу между горизонтальными клетями кантуют при помощи выводных геликоидальных проводок или кантующих валков системы

инж. С. В. Мерекина. Для того чтобы избавиться от кантовки раската геликоидальными проводками, вызывающими повышение количества поверхностных дефектов и увеличение расхода энергии, на одном из американских заводов применили косую калибровку (калибровку со смешанным расположением замков калибров). Однако эта калибровка (рис. 58, *г*) ненадежна, так как вследствие

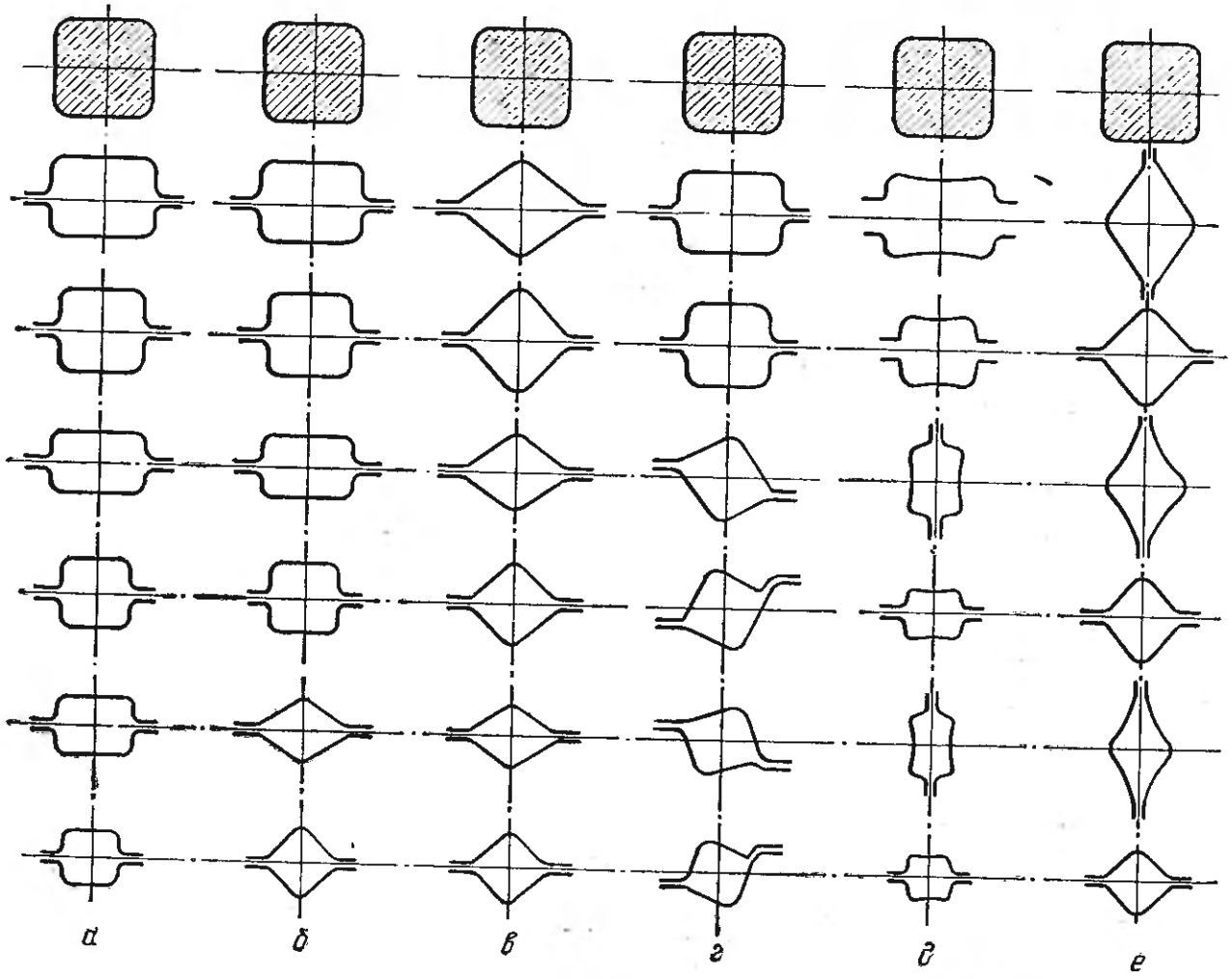



Рис. 58. Системы калибровок непрерывных заготовочных станов

неодинаковых диаметров валков в ручьях (несимметричности ручьев) в калибре возникает скручивание раската и увеличивается износ валков [12].

На современных непрерывных заготовочных станах с чередующимися клетями с горизонтальными и вертикальными валками применяют систему прямоугольных калибров, обеспечивающих прокатку полосы без кантовки между клетями (рис. 58, *д*). Если применяют систему ромб—квадрат, то ромбические калибры врезают в вертикальные валки (рис. 58, *е*).

На валках непрерывных заготовочных станов размещают от трех до пяти калибров, что позволяет без перевалки прокатывать заготовки различных размеров. По мере уменьшения площади поперечного сечения раската число калибров увеличивается, появляются запасные (резервные) калибры, что дает возможность

повысить продолжительность службы рабочих валков, сократить число перевалок и тем самым увеличить производительность стана и сократить расходы на передел.

Линию прокатки в непрерывных заготовочных станах нового типа выдерживают настройкой (перемещением) горизонтальных и вертикальных валков.

На станах старого типа все калибры каждого ряда располагают строго на одной оси, являющейся линией прокатки.

Преимущества и недостатки, а также методика расчета и построения прямоугольных калибров описаны выше. Однако, учитывая существенное влияние формы прямоугольных калибров на характер деформации металла на степень заполнения и износ калибров, рассмотрим принципы построения их применительно к непрерывным заготовочным станам.

Так как фактическое уширение полосы при прокатке в прямоугольном калибре изменяется под действием различных факторов и может значительно отличаться от расчетного, большое значение при конструировании калибра имеет правильный выбор выпуска калибра $\varphi$ (рис. 59):

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{B_к - b_к}{2h_{вр}} \cdot 100\%.$$

На основании анализа заводских калибровок и экспериментальных данных рекомендуется [15] на современных непрерывных заготовочных станах вести прокатку в калибрах с большими выпусками, что дает возможность:

1) использовать одни и те же калибры для прокатки с различными обжатиями (за счет изменения зазора между валками);

б) уменьшить опережение (при одной и той же величине обжатия) со снижением влияния его на скоростной режим прокатки;

3) снизить давление металла на валки и, следовательно, уменьшить напряжение в материале валков;

4) уменьшить износ боковых стенок калибра, вследствие чего увеличится стойкость валков между переточками и сократится число случаев прокатки металла с лампасом, закатом и другими пороками.

До перехода на прокатку с увеличенными до 25% выпусками со стана 630 ММК поступало на вырубку из-за лампаса проката 0,22—0,28% общего количества металла в заготовках 150 × 150 и 108 × 108 *мм*. После введения новой калибровки количество металла, поступавшего на вырубку по подрезу, снизилось до 0,02%.

Можно рекомендовать [15] следующую методику конструирования прямоугольных калибров для непрерывных заготовочных станов.

При прокатке в прямоугольных калибрах применяют обжатие в пределах 20—30%. Зазор между валками составляет от 10 до

20% высоты калибра соответственно в последних и первых калибрах; ширина задаваемой полосы в большинстве случаев равна ширине по дну калибра, т. е. $b_п \approx b_к$.

При расчетных значениях высоты и ширины задаваемой в калибр полосы и абсолютного обжатия для определения параметров, необходимых для построения прямоугольных калибров, можно пользоваться графиками (см. рис. 59 и 60).

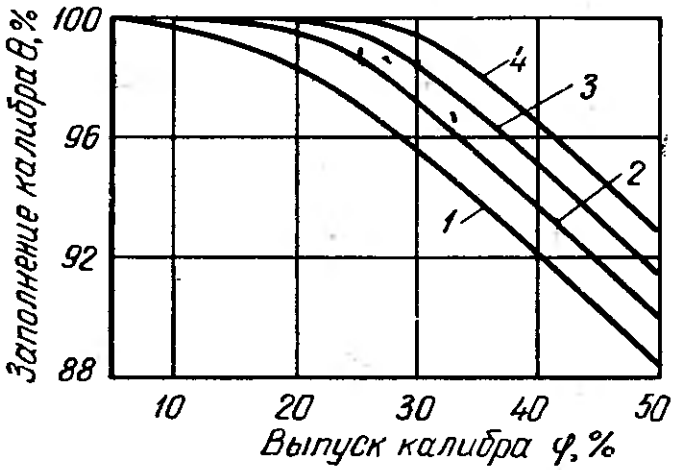



Рис. 59. Зависимость степени заполнения калибра от величины выпуска калибра и относительного обжатия $\Delta h/H$, %:

*1*—20; *2*—25; *3*—30; *4*—35

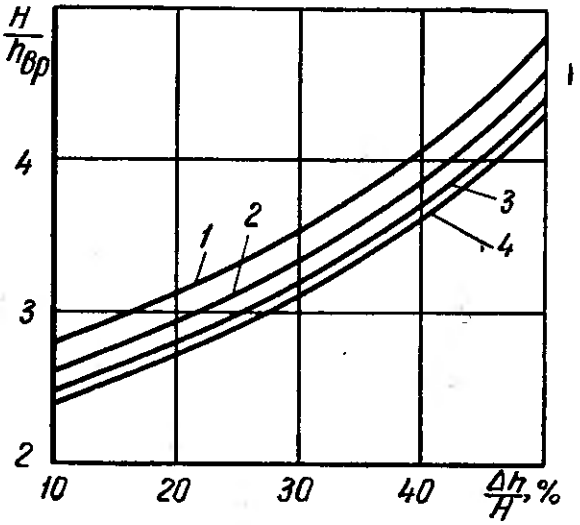



Рис. 60. Зависимость отношения $H/h_{вр}$ от отиосительного обжатия $\Delta h/H$, %, и величины зазора:

*1* — $s = 0{,}2\ h$; *2* — $s = 0{,}15h$; *3* — $s = 0{,}1h$; *4* — $s = 0{,}075h$

Под степенью заполнения калибра $i$ подразумевается отношение площади поперечного сечения прокатываемой полосы $q_п$ к площади калибра $q_к$:

$$i = \frac{q_п}{q_к} 100\%.$$

Во избежание переполнения калибра при прокатке средне- и высокоуглеродистых сталей степень заполнения калибра принимают в пределах $i = 96 \div 98\%$.

Для обеспечения в проектируемых калибрах некоторого запаса на уширение график зависимости степени заполнения калибра от величины его выпуска (см. рис. 59) построен с учетом минимального зазора между валками $s = 0{,}075 \cdot h$.

Последовательность определения параметров, необходимых для построения прямоугольных калибров, следующая:

1) принимают ширину дна калибра равной ширине задаваемой полосы;

2) задаются степенью заполнения калибра $i$ и находят по графику (см. рис. 59) выпуск калибра в зависимости от величины относительного обжатия;

3) задаются величиной зазора между валками и находят по графику (см. рис. 60) значение $H/h_р$, из которого определяют глубину среза калибра (ручья) $h_{вр}$;

4) определяют высоту и ширину калибра по разъему валков

$$h = 2h_{вр} + s;$$

$$B_к = b_к + 2h_{вр} \operatorname{tg} \varphi;$$

5) радиусы закруглений калибра $r$ и $r'$ принимают равными:

$$r = (0{,}12 \div 0{,}20)\ b_к;$$

$$r' = (0{,}08 \div 0{,}12)\ b_к.$$

Строят калибры системы ромб—квадрат двумя способами. По одному из них ширину следующего калибра принимают равной высоте предыдущего, т. е. уширение не учитывают. Во избежание образования заусенцев в калибрах значительно притупляют их углы.

По второму, наиболее распространенному способу, ширину последующего калибра принимают больше высоты предыдущего на величину уширения.

Скелеты (контуры без закруглений) калибров строят в виде геометрически правильных ромбов и квадратов. Для предупреждения охлаждения углов полосы и концентрации напряжений в теле валков углы калибров закругляют. Радиус закругления в чистовом калибре берут в соответствии со стандартом на данный размер заготовки. В предыдущих калибрах радиус увеличивают пропорционально увеличению стороны ромба или квадрата. В том случае, когда из промежуточных квадратных калибров получают конечную (товарную) заготовку, радиус закругления необходимо выбирать в соответствии с ГОСТ.

Выбор зазора между валками с ромбическими и квадратными калибрами зависит от упругой деформации («пружины») рабочей клети. Особенно в последних калибрах зазор принимают минимальный, по мере удаления от последнего калибра зазор увеличивают. Для системы ромб—квадрат рекомендуется брать зазор между валками в пределах

$$s = (0{,}01 \div 0{,}02)\ D.$$

## 4. РАСЧЕТ КАЛИБРОВКИ ВАЛКОВ НЕПРЕРЫВНЫХ ЗАГОТОВОЧНЫХ СТАНОВ

Калибровку непрерывных заготовочных станов удобнее рассчитывать против хода прокатки. Задавшись скоростью выхода полосы из валков последней клети и зная размеры конечной заготовки, определяют константу калибровки для последней клети. Константы калибровки предыдущих клетей второй группы должны быть или равны константе последней клети (при прокатке без на-

тяжения и подпора), или их определяют с учетом натяжения, как указывалось выше.

Зная начальное и конечное сечение прокатываемой полосы, можно определить общий коэффициент вытяжки $\mu_\Sigma$:

$$\mu_\Sigma = \frac{q_0}{q_n},$$

где $q_0$ — площадь поперечного сечения исходного блюма или заготовки;

$q_n$ — площадь поперечного сечения конечного профиля.

Общий коэффициент вытяжки распределяют по клетям:

$$\mu_\Sigma = \mu_1\mu_2\mu_3 \ldots \mu_n.$$

При заданных размерах промежуточных квадратных калибров распределение коэффициентов вытяжки упрощается.

Размеры диагонально расположенных квадратных калибров равны по высоте и ширине (без учета закруглений):

$$h_{кв} = b_{кв} = 1{,}41c_{кв},$$

где $c_{кв}$ — сторона квадратного профиля.

Коэффициенты вытяжки в паре калибров ромб—квадрат принимают равными

$$\mu_р = \mu_{кв} = \sqrt{\mu_{р.\,кв}}.$$

После этого легко определить площадь поперечного сечения ромбической полосы

$$q_р = q_{кв}\mu_{кв}.$$

Для определения высоты ромбического калибра необходимо знать величину уширения ромбической полосы в квадратном калибре $\Delta b_{кв}$. Уширение можно определить по графикам, приведенным на рис. 54—57.

Размеры ромбического калибра равны:

$$h_р = b_{кв} - \Delta b_{кв};$$

$$b_р = \frac{2q_р}{h_р}.$$

Абсолютные обжатия в квадратном и ромбическом калибрах равны:

$$\Delta h_{кв} = b_р - h_{кв};$$

$$\Delta h_р = 1{,}41c - h_р,$$

где $c$ — сторона квадрата, задаваемого в ромбический калибр.

Катающий диаметр $D_к$ в ромбических и квадратных калибрах можно определить следующим образом:

$$D_к = D - \frac{h}{2},$$

где $D$ — начальный диаметр валков;

$h$ — высота квадратного или ромбического калибра.

В ящичных калибрах катающий диаметр принимаем по дну калибра

$$D_к = D - h.$$

При известных значениях константы, площади поперечного сечения полосы и катающего диаметра легко определить числа оборотов валков предыдущих клетей. Например, в прямоугольном калибре число оборотов валков равно

$$n = \frac{K}{qD_к}.$$

Угол захвата можно определить по формуле

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

Допускаемый угол захвата определяем в зависимости от материала валков и скорости прокатки по графику, приведенному на рис. 45. В первых клетях для повышения захватывающей способности валки подвергают насечке или наварке, в этом случае максимальный угол захвата достигает 30—32°. В последующих клетях допускается угол захвата до 30—31° с учетом заталкивающего действия предыдущих клетей.

У станов с жесткой кинематической связью числа оборотов валков по клетям остаются неизменными. В остальном методы расчета калибровки валков непрерывных заготовочных станов с жесткой кинематической связью и с индивидуальным приводом сходны, что видно из приведенных ниже примерных расчетов.

### Примерный расчет калибровки валков непрерывного заготовочного стана 900/700/500 с индивидуальными приводными двигателями

*Исходные данные*

Размеры блюма 360 × 360 *мм*.

Конечное сечение заготовки 80 × 80 и 150 × 150 *мм*.

Предусмотреть прокатку заготовок 100 × 100, 125 × 125, 190 × 190 и 240 × 240 *мм*.

Скорость выхода полосы из последней клети стана 6 *м/сек*.

Коэффициент натяжения полосы между рабочими клетями принимаем $k_н = 1{,}01 \div 1{,}015$ для первой группы и $k_н = 1{,}02$ для второй.

Коэффициент ограничения уширения принимаем $k_{огр} = 1{,}0$ в первых трех клетях и $k_{огр} = 0{,}7$ во всех остальных.

Характеристика клетей стана приведена в табл. 22.

Непрерывные группы рабочих клетей стана располагают одну от другой на расстоянии, большем, чем длина раската. Поэтому схему калибровки выбираем, исходя из следующих соображений.

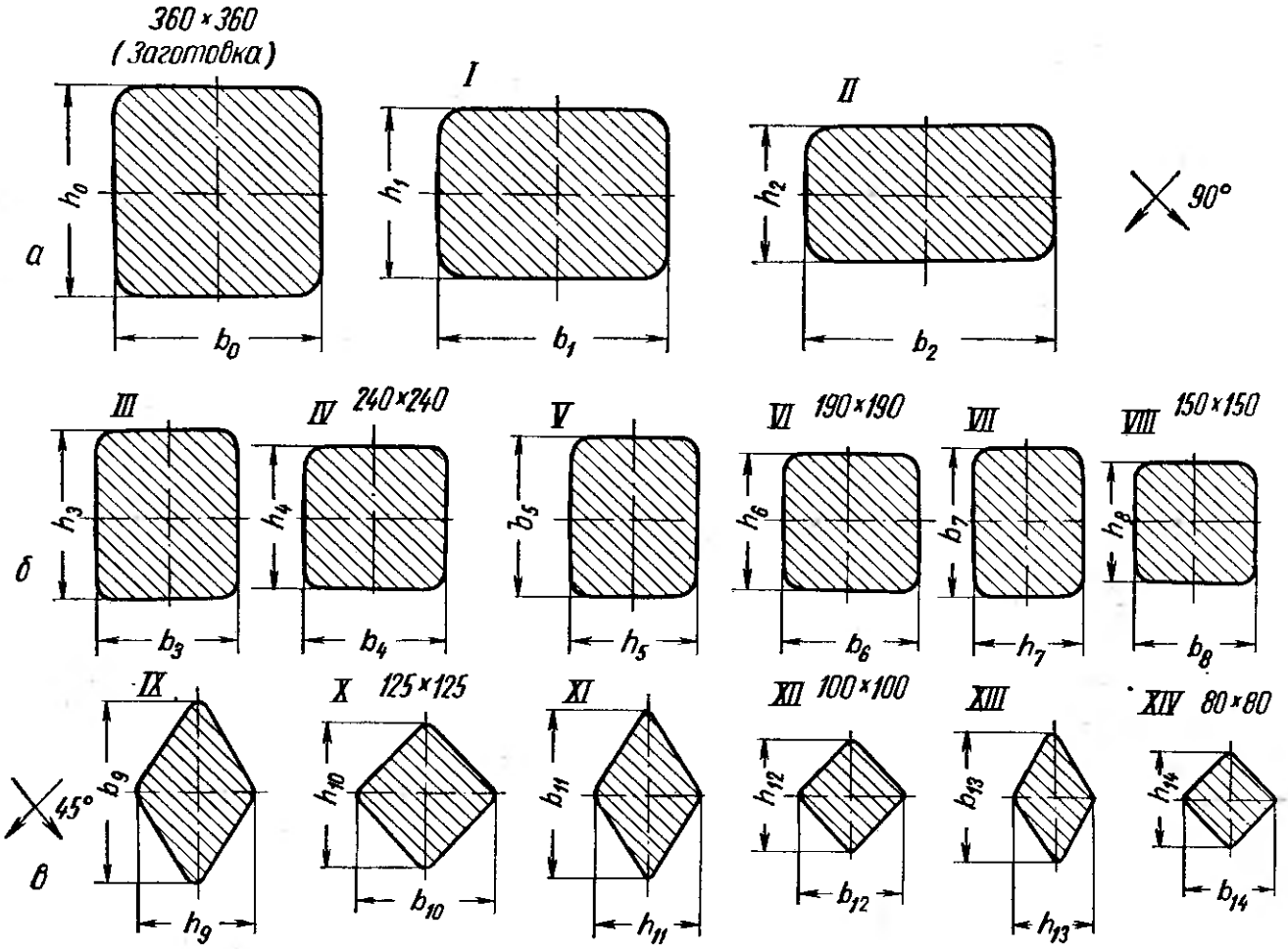



Рис. 61. Предварительная схема калибровки валков непрерывного заготовочного стана 900/700/500:

*а* — отдельно стоящие клети 900; *б* — первая группа; *в* — вторая группа

В первой группе принимаем прямоугольные калибры, так как они при малой глубине среза меньше ослабляют валки.

Во второй группе принимаем чередующиеся ромбические и квадратные калибры, врезанные на диагональ, что позволяет получить более правильное квадратное сечение прокатываемых заготовок.

При проектировании калибровки следует иметь в виду, что на бочке валков непрерывного заготовочного стана размещается от 2 до 5 калибров. Это позволяет различные размеры заготовок получать из разных рядов и из блюмов разных сечений, а также в случае выхода из строя калибра одного ряда перейти на прокатку в калибрах запасного ряда.

Предварительная схема калибровки валков непрерывного заготовочного стана 900/700/500 приведена на рис. 61.

По принятой схеме калибровки валков заготовки сечением 240 × 240, 190 × 190 и 150 × 150 *мм* получаем соответственно из прямоугольных калибров клетей 4, 6 и 8, а заготовки 125 × × 125, 100 × 100 и 80 × 80 *мм* из квадратных калибров клетей 10, 12 и 14.

*Расчет калибровки второй группы*

Для увеличения срока службы калибров расчет производим на получение профиля с минусовыми допусками, поэтому размеры горячего профиля принимаем равными размерам холодного, т. е. сторона квадрата равна

$$c_{14} = 80 \text{ мм}.$$

Для обеспечения нормальных условий захвата при расчете принимаем минимальные диаметры валков (после их последней переточки).

*Расчет констант прокатки для клетей 9в — 14г*

Определяем площадь поперечного сечения $q_{14}$ готового профиля, считая по геометрическим размерам (без учета закруглений):

$$q_{14} = c_{14}^2 = 80 \cdot 80 = 6400 \text{ мм}^2.$$

Принимая зазор между валками $s_{14} = 5$ *мм*, определяем катающий диаметр $D_к$ валков клети 14г:

$$D_{14} = D_{б14} + s_{14} = 530 + 5 = 535 \text{ мм};$$

$$D_{к14} = D_{14} - \frac{h_{14}}{2} = 535 - \frac{80 \cdot 1{,}41}{2} = 478{,}5 \text{ мм},$$

где $D_б$ — диаметр бочки валка (по буртам);
$D$ — начальный диаметр валка;
$h$ — высота квадратного калибра.

Исходя из заданной окружной скорости валков в последней клети стана, определяем число оборотов валков

$$n_{14} = \frac{60 v_{14}}{\pi D_{к14}} = \frac{60 \cdot 6}{3{,}14 \cdot 0{,}479} = 239 \text{ об/мин}.$$

Определяем константу калибровки для клети 14г, исходя из геометрических размеров калибра без учета закруглений, поскольку в остальных калибрах закругления также не учитывали:

$$K_{14} = q_{14} D_{к14} n_{14} = 6400 \cdot 478{,}5 \cdot 239 = 731 \cdot 10^6.$$

Для остальных клетей

$$K_{n-1} = \frac{K_n}{k_н},$$

где $k_н$ — коэффициент натяжения полосы между клетями;

$$K_{13} = \frac{731 \cdot 10^6}{1{,}02} = 717 \cdot 10^6;$$

$$K_{12} = \frac{717 \cdot 10^6}{1{,}02} = 703 \cdot 10^6;$$

$$K_{11} = \frac{703 \cdot 10^6}{1{,}02} = 689 \cdot 10^6;$$

$$K_{10} = \frac{689 \cdot 10^6}{1{,}02} = 675 \cdot 10^6;$$

$$K_9 = \frac{675 \cdot 10^6}{1{,}02} = 661 \cdot 10^6.$$

*Расчет калибров валков клетей 13в и 14г*

Размеры калибра XIV равны:

$$h_{14} = b_{14} = 1{,}41 c_{14} = 1{,}41 \cdot 80 \approx 113 \text{ мм}.$$

Общий коэффициент вытяжки в калибрах *XIII* и *XIV* равен

$$\mu_{13-14} = \frac{100 \cdot 100}{80 \cdot 80} = 1{,}56.$$

**Результаты расчета размеров ромбических и квадратных**

| Номер клети | Форма калибра | Константа калибровки $K \cdot 10^{-6}$ | Размеры квадратного калибра, *мм* | | | Коэффициент вытяжки $\mu = \frac{q'}{q}$ | Площадь поперечного сечения полосы $q' = q\mu$, *мм²* | Уширение, *мм*, ромба в квадрате (по графику, приведенному на рис. 55) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | сторона $c$ | высота $h_{кв} = 1{,}41c$ | ширина $b_{кв} = 1{,}41c$ | | | |
| 14г | Квадрат | 731 | 80 | 113 | 113 | 1,25 | 6 400 | 10 |
| 13в | Ромб | 717 | — | — | — | 1,25 | 8 000 | — |
| 12г | Квадрат | 703 | 100 | 141 | 141 | 1,25 | 10 000 | 11,5 |
| 11в | Ромб | 689 | — | — | — | 1,25 | 12 500 | — |
| 10г | Квадрат | 675 | 125 | 176 | 176 | 1,2 | 15 600 | 11,5 |
| 9в | Ромб | 661 | — | — | — | 1,2 | 18 700 | — |

Принимаем одинаковые коэффициенты вытяжки

$$\mu_{13} = \mu_{14} = \sqrt{\mu_{13-14}} = \sqrt{1{,}56} \approx 1{,}25.$$

Площадь поперечного сечения полосы после калибра *XIII*

$$q_{13} = q_{14}\mu_{14} = 6400 \cdot 1{,}25 \approx 8000 \text{ мм}^2.$$

Уширение ромбической полосы в квадратном калибре $\Delta b_{14}$ находим по графику, приведенному на рис. 55. При $D = 530$ *мм*, $c = 80$ *мм* и $\mu = 1{,}25$ уширение равно

$$\Delta b_{14} = 10 \text{ мм}.$$

Высота ромбического калибра *XIII*

$$h_{13} = b_{14} - \Delta b_{14} = 113 - 10 = 103 \text{ мм}.$$

Ширина ромбического калибра *XIII*

$$b_{13} = \frac{2q_{13}}{h_{13}} = \frac{2 \cdot 8000}{103} = 155 \text{ мм}.$$

Обжатие в квадратном калибре *XIV*

$$\Delta h_{14} = b_{13} - h_{14} = 155 - 113 = 42 \text{ мм}.$$

Обжатие в ромбическом калибре *XIII*

$$\Delta h_{13} = 1{,}41c_{12} - h_{13} = 1{,}41 \cdot 100 - 103 = 38 \text{ мм}.$$

Таблица 23

**калибров второй группы заготовочного стана 900/700/500**

| Размер ромбического калибра, *мм*: высота $h_р = b_{кв} - \Delta b$ | Размер ромбического калибра, *мм*: ширина $b_р = \frac{2q_р}{h_р}$ | Обжатие в квадратном и ромбическом калибрах $\Delta h_{кв} = b_р - h_{кв}$; $\Delta h_р = 1{,}41c - h_р$, *мм* | Простор на уширение в ромбическом калибре, *мм* $\Delta b_{пр} = b'_р - 1{,}41c$ | Уширение $\Delta b$, *мм*, рассчитанное по формуле (48) | Принятое уширение в ромбическом калибре, *мм* | Начальный диаметр $D = D_б + s$, *мм* | Средний катающий диаметр $D_к = D - \frac{h}{2}$, *мм* | Число оборотов $n = \frac{K}{qD_{к.ср}}$, *об/мин* | Угол захвата $\alpha$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| — | — | 42 | — | — | — | 535 | 478,5 | 239 | 24° 55′ |
| 103 | 155 | 38 | 14 | 9,7 | 14 | 535 | 483,5 | 186 | 24° 20′ |
| — | — | 52 | — | — | — | 538 | 468 | 150 | 30° |
| 129,5 | 193 | 67,5 | 17 | 16,5 | 17 | 538 | 478 | 115 | 30° 10′ |
| — | — | 48 | — | — | — | 540 | 452 | 96 | 30° 10′ |
| 164,5 | 224 | 46,5 | 13 | 9 | 13 | 540 | 458 | 77,5 | 29° 10′ |

Простор на уширение в ромбическом калибре *XIII*

$$\Delta b_{13} = b_{13} - 1{,}41 c_{12} = 155 - 1{,}41 \cdot 100 = 14 \text{ мм}.$$

Уширение квадратной полосы в ромбическом калибре *XIII* определяем по приближенной формуле

$$\Delta b = 0{,}4 \sqrt{(h_{кв} - h_р) \frac{D - h_р}{2} \cdot \frac{h_{кв} - h_р}{h_{кв}}}; \qquad (48)$$

$$\Delta b_{13} = 0{,}4 \sqrt{(141 - 103) \frac{530 - 103}{2} \cdot \frac{141 - 103}{141}} = 9{,}7 \text{ мм}.$$

Расчетное уширение меньше простора на уширение, поэтому размеры ромбического калибра *XIII* не изменяем.

Принимая зазор между валками $s = 5$ *мм*, определяем катающий диаметр валков клети 13:

$$D_{0_{13}} = D_{б13} + s = 530 + 5 = 535 \text{ мм};$$

$$D_{к13} = D_{0_{13}} - \frac{h_{13}}{2} = 535 - \frac{103}{2} = 483{,}5 \text{ мм}.$$

Число оборотов валков клети 13:

$$n_{13} = \frac{K_{13}}{q_{13} D_{к13}} = \frac{717 \cdot 10^6}{8000 \cdot 483{,}5} = 186 \text{ об/мин}.$$

Угол захвата в клети 14

$$\alpha_{14} = \arccos\left(1 - \frac{\Delta h_{14}}{D_{14\,min}}\right),$$

где $D_{14\,min}$ — диаметр валка по месту наибольшего среза калибра.

В нашем случае

$$\alpha_{14} = \arccos\left(1 - \frac{42}{530 - 113}\right) = 24° 55'.$$

Угол захвата в клети 13

$$\alpha_{13} = \arccos\left(1 - \frac{\Delta h_{13}}{D_{к\,min}}\right) = 1 - \frac{38}{535 - 103} = 24° 20'.$$

Для валков клетей 12—9 результаты расчета приведены в табл. 23, причем в клети 12г получен квадрат 100 × 100 *мм*, в клети 10г квадрат 125 × 125 *мм*. В клеть 9в задается квадрат 150 × 150 *мм*.

Диаметры валков по буртам приняли равными $D_б = 530$ *мм*. Принимаем зазоры в клетях 14г и 13в $s = 5$, в клетях 12 и 11 зазор $s = 8$ *мм*, в клетях 10г и 9в зазор $s = 10$ *мм*. Поэтому расчеты производим по начальным диаметрам $D = D_б + s$, которые приведены в табл. 23.

В табл. 23 приведены величины простора на уширение в ромбическом калибре $\Delta b_{пр}$ и расчетное уширение $\Delta b$. Необходимо, чтобы простор на уширение был больше расчетного, с другой стороны, не должно быть большого незаполнения калибра. Можно принимать

$$b = (0{,}97 \div 0{,}98)\ b_к.$$

Окружная скорость валков по катающему диаметру в клети 9

$$v_9 = \frac{\pi D_{к9} n_9}{60} = \frac{3{,}14 \cdot 0{,}458 \cdot 77{,}5}{60} = 1{,}86\ м/сек.$$

*Расчет калибровки валков первой группы клетей*

Для обеспечения нормальной работы стана и исключения задержек полосы перед задачей во вторую группу принимаем окружную скорость валков в клети 8 на 15% меньше окружной скорости валков в клети 9:

$$v_8 = 0{,}85 v_9 = 0{,}85 \cdot 1{,}86 = 1{,}58\ м/сек.$$

*Расчет констант калибровки для клетей 3—8*

Площадь поперечного сечения полосы после выхода из прямоугольного калибра *VIII* с учетом закруглений

$$q_8 = 0{,}98 c_8^2 = 0{,}98 \cdot 150^2 = 22\,050\ мм^2.$$

Принимая для клети 8 зазор $s = 16$ *мм*, определяем катающий диаметр валков в ящичном калибре

$$D_8 = D_{б8} + s = 680 + 16 = 696\ мм;$$

$$D_{к8} = D_8 - h_8 = 696 - 150 = 546\ мм.$$

Исходя из окружной скорости валков и катающего диаметра, определяем число оборотов валков клети 8:

$$n_8 = \frac{60 v_8}{\pi D_{к8}} = \frac{60 \cdot 1{,}58}{3{,}14 \cdot 0{,}546} = 54{,}3\ об/мин.$$

Определяем константу калибровки для клети 8:

$$K_8 = q_8 D_{к8} n_8 = 22\,050 \cdot 546 \cdot 54{,}3 = 658 \cdot 10^6.$$

Константы для остальных клетей черновой группы

$$K_7 = \frac{K_8}{k_и} = \frac{658 \cdot 10^6}{1{,}015} = 648 \cdot 10^6;$$

$$K_6 = \frac{648 \cdot 10^6}{1{,}015} = 638 \cdot 10^6;$$

$$K_5 = \frac{638 \cdot 10^6}{1{,}015} = 628 \cdot 10^6;$$

$$K_4 = \frac{628 \cdot 10^6}{1{,}015} = 618 \cdot 10^6;$$

$$K_3 = \frac{618 \cdot 10^6}{1{,}015} = 608 \cdot 10^6.$$

*Расчет калибра VIII*

Принимаем угол захвата

$$\alpha_8 = 26° = 0{,}46 \text{ } рад;$$

$$\cos \alpha_8 = \cos 26° = 0{,}899.$$

Абсолютное обжатие

$$\Delta h_8 = D_{к8}(1 - \cos \alpha) = 546(1 - 0{,}899) = 55 \text{ } мм.$$

Высота задаваемого раската

$$b_7 = h_8 + \Delta h_8 = 150 + 55 = 205 \text{ } мм.$$

Для расчета уширения принимаем ориентировочно $b_{ср} \approx$ $\approx 143$ *мм*. Тогда по формуле (1)

$$\Delta b_8 = \frac{2 \cdot 143 \cdot 55 \cdot 0{,}7}{(205 + 150)\left[1 + (1 + 0{,}46)\left(\frac{143}{273 \cdot 0{,}46}\right)^2\right]} \approx 12 \text{ } мм;$$

где $k_{огр} = 0{,}7$.

Ширина задаваемого раската

$$h_7 = b_8 - \Delta b_8 = 150 - 12 = 138 \text{ } мм.$$

*Расчет калибровки валков клети 7*

Площадь поперечного сечения полосы после выхода из ящичного калибра *VII*

$$q_7 = 0{,}98 h_7 b_7 = 0{,}98 \cdot 138 \cdot 205 = 27\,800 \text{ } мм^2.$$

Принимая зазор между валками $s_7 = 16$ *мм*, определяем катающий диаметр валков клети 7:

$$D_7 = D_{б7} + s_7 = 660 + 16 = 676 \text{ } мм;$$

$$D_{к7} = D_7 - h_7 = 676 - 138 = 538 \text{ } мм.$$

Принимаем угол захвата

$$\alpha_7 = 25° = 0{,}436 \text{ } рад;$$

$$\cos 25° = 0{,}906.$$

Абсолютное обжатие в калибре *VII*

$$\Delta h_7 = D_{к7}(1 - \cos\alpha) = 538(1 - 0{,}906) = 52 \text{ } мм.$$

Высота раската, задаваемого в калибр *VII*:

$$b_6 = h_7 + \Delta h_7 = 138 + 52 = 190 \text{ } мм.$$

Уширение в калибре *VII* при $b_{ср} \approx 198$ *мм*

$$\Delta b_7 = \frac{2 \cdot 198 \cdot 53 \cdot 0{,}7}{(191 + 138)\left[1 + (1 + 0{,}436)\left(\frac{198}{269 \cdot 0{,}436}\right)^2\right]} \approx 15 \text{ } мм.$$

Ширина задаваемого раската

$$h_6 = b_7 - \Delta b_7 = 205 - 15 = 190 \text{ } мм.$$

Коэффициент вытяжки в калибре *VIII*

$$\mu_8 = \frac{27\,800}{22\,050} = 1{,}25.$$

Аналогично рассчитываем калибры и для остальных клетей. Данные расчета прямоугольных калибров для клетей 3—8 приведены в табл. 24 *.

Число оборотов валков клети 3

$$n_3 = \frac{K_3}{q_3 D_{к3}} = \frac{608 \cdot 10^6}{68\,700 \cdot 690} = 12{,}8 \text{ } об/мин$$

и скорость прокатки

$$v_3 = \frac{\pi D_{к3} n_3}{60} = \frac{3{,}14 \cdot 0{,}69 \cdot 12{,}8}{60} = 0{,}46 \text{ } м/сек.$$

Принимаем окружную скорость валков клети 2 на 10% меньше окружной скорости валков клети 3 для обеспечения нормальной работы стана:

$$v_2 = 0{,}9 v_3 = 0{,}9 \cdot 0{,}46 = 0{,}42 \text{ } м/сек.$$

*Расчет констант прокатки для клетей 1 и 2*

Площадь поперечного сечения полосы после клети 2

$$q_2 = 0{,}98 h_2 b_2 = 0{,}98 \cdot 210 \cdot 390 = 80\,500 \text{ } мм^2.$$

---

* Следует иметь в виду, что в вертикальных валках горизонтальный размер калибра (высота) обозначен величиной $h$, а вертикальный размер — величиной $b$; поэтому в расчете следует учитывать это обстоятельство при определении размеров калибров в вертикальных валках.

**Результаты расчета размеров прямоугольных калибров**

| Номер клети | $K \cdot 10^{-6}$ | Размеры калибра, *мм* | | $q = 0{,}98hb$ | Диаметр по буртам $D_б$, *мм* | Зазор $s$, *мм* | Начальный диаметр $D = D_б + s$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | высота $h' = h + \Delta h$; $h'_B = b + \Delta b$ | ширина $b' = B - \Delta b$; $b'_B = h + \Delta h$ | | | | |
| 8г | 658 | 150 | 150 | 22 050 | 680 | 16 | 696 |
| 7в | 648 | 138 | 205 | 27 800 | 660 | 16 | 676 |
| 6г | 638 | 190 | 190 | 35 400 | 680 | 20 | 700 |
| 5в | 628 | 175 | 265 | 43 800 | 660 | 20 | 680 |
| 4г | 618 | 240 | 240 | 56 500 | 860 | 50 | 910 |
| 3г | 608 | 310 | 225 | 80 500 | 860 | 140 | 1000 |

Принимаем зазор между валками $s_2 = 60$ *мм* и определяем катающий диаметр валков клети 2:

$$D_2 = D_{б2} + s_2 = 860 + 60 = 920 \text{ мм};$$

$$D_{к2} = D_2 - h_2 = 920 - 210 = 710 \text{ мм}.$$

Определяем число оборотов валков клети 2, исходя из окружной скорости и катающего диаметра валков:

$$n_2 = \frac{60v_2}{\pi D_{к2}} = \frac{60 \cdot 0{,}42}{3{,}14 \cdot 0{,}710} = 11{,}3 \text{ об/мин}.$$

Константа калибровки для клетей 1 и 2

$$K_2 = q_2 D_{к2} n_2 = 80\,500 \cdot 710 \cdot 11{,}3 = 646 \cdot 10^6;$$

$$K_1 = \frac{K_2}{1{,}01} = \frac{646 \cdot 10^6}{1{,}01} = 640 \cdot 10^6.$$

*Расчет калибровки валков клети 2*

Принимаем угол захвата

$$\alpha_2 = 25° = 0{,}436 \text{ рад};$$

$$\cos 25° = 0{,}906.$$

Абсолютное обжатие в калибре *II*

$$\Delta h_2 = D_{к2}(1 - \cos \alpha_2) = 710\,(1 - 0{,}906) = 67 \text{ мм}.$$

Принимаем $\Delta h_2 = 70$ *мм*.

Высота полосы, задаваемой в калибр *II*:

$$h_1 = h_2 + \Delta h_2 = 210 + 70 = 280 \text{ мм}.$$

Таблица 24

**клетей первой группы заготовочного стана 900/700/500**

| $D_к = D - h$, *мм* | Принимаемый угол захвата $\alpha$ | Угол захвата $\alpha$, *рад* | Обжатие, *мм* $\Delta h = D_к(1 - \cos\alpha)$ | Ориентировочная ширина $b_{ср}$, *мм* | Уширение $\Delta b$, *мм*, рассчитанное по формуле (1) | Коэффициент вытяжки $q_{n-1}/q_n$ | $n = \frac{K}{qD_к}$, *об/мин* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 546 | 26° | 0,46 | 55 | 143 | ~12 | 1,25 | 54,3 |
| 538 | 25° | 0,436 | 52 | 198 | ~15 | 1,27 | 43,3 |
| 510 | 29° | 0,506 | 65 | 182 | 15 | 1,24 | 35,4 |
| 505 | 29°30′ | 0,515 | 65 | 248 | 15 | 1,29 | 27,4 |
| 670 | 27° | 0,471 | 70 | 230 | 15 | 1,22 | 16,4 |
| 690 | 28° | 0,488 | 80 | 215 | ~15 | — | 12,8 |

Уширение калибра *II* при $b_{ср} \approx 380$ *мм* равно

$$\Delta b_2 = \frac{2 \cdot 380 \cdot 70}{(280 + 210)\left[1 + (1 + 0{,}436)\left(\frac{380}{355 \cdot 0{,}436}\right)^2\right]} = 11{,}2 \text{ мм}.$$

Принимаем $\Delta b_2 = 10$ *мм*.

Ширина раската, задаваемого в клеть 2:

$$b_1 = b_2 - \Delta b_2 = 390 - 10 = 380 \text{ мм}.$$

*Расчет калибровки валков клети 1*

Площадь поперечного сечения полосы после калибра *I*

$$q_1 = 0{,}98 h_1 b_1 = 0{,}98 \cdot 280 \cdot 380 = 104\,000 \text{ мм}^2.$$

Принимаем зазор между валками $s_1 = 120$ *мм* и определяем катающий диаметр валков клети 1:

$$D_1 = D_{б1} + s_1 = 860 + 120 = 980 \text{ мм};$$

$$D_{к1} = D_1 - h_1 = 980 - 280 = 700 \text{ мм}.$$

Принимаем угол захвата

$$\alpha_1 = 29° = 0{,}485 \text{ рад};$$

$$\cos 29° = 0{,}875.$$

Абсолютное обжатие в калибре *I*

$$\Delta h_1 = D_{к1}(1 - \cos\alpha_1) = 700(1 - 0{,}875) = 87 \text{ мм}.$$

Принимаем $\Delta h_1 = 80$ *мм*.

Высота исходного блюма

$$h_0 = h_1 + \Delta h_1 = 280 + 80 = 360 \text{ мм}.$$

Уширение в калибре *I* при $b_{ср} \approx 370$ *мм* равно

$$\Delta b_1 = \frac{2 \cdot 370 \cdot 80}{(280 + 360)\left[1 + (1 + 0{,}485)\left(\frac{370}{350 \cdot 0{,}485}\right)^2\right]} = 11{,}3 \approx 10 \text{ мм}.$$

Ширина исходного блюма

$$b_0 = 380 - 10 = 370 \text{ мм}.$$

Итак, в результате расчета вместо заданных размеров исходного блюма 360 × 360 *мм* получили 360 × 370 *мм*. Незначительная разность размеров устраняется при последующей корректировке калибровки клетей 1—3.

### *Корректировка калибровки*

Ширина блюма получилась на 10 *мм* больше, поэтому уменьшаем обжатие в клети 3 на 10 *мм*:

$$\Delta h_3 = 70 \text{ мм}.$$

Пересчитаем калибровочные данные.
Угол захвата в клети 3

$$\alpha_3 = \arccos\left(1 - \frac{\Delta h_3}{D_{кз}}\right) = \arccos\left(1 - \frac{70}{690}\right) = 26°10';$$

$$\alpha_3 = 0{,}457 \text{ рад}; \quad \cos 26° 10' = 0{,}898.$$

Высота полосы, задаваемой в клеть 3:

$$b_2 = h_3 + \Delta h_3 = 310 + 70 = 380 \text{ мм}.$$

Уширение в калибре *III* при $b_{ср} \approx 215$ *мм* равно

$$\Delta b_3 = \frac{2 \cdot 215 \cdot 70}{(380 + 310)\left[1 + (1 + 0{,}457)\left(\frac{215}{345 \cdot 0{,}457}\right)^2\right]} = 15{,}3 \text{ мм}.$$

Принимаем $\Delta b_3 = 15$ *мм*.
Площадь поперечного сечения полосы, задаваемой в клеть 3:

$$q_2 = 0{,}98 h_2 b_2 = 0{,}98 \cdot 210 \cdot 380 = 78\,500 \text{ мм}^2.$$

Коэффициент вытяжки в калибре *III*

$$\mu_3 = \frac{78500}{68700} = 1{,}14.$$

Уширение в клетях 1 и 2 остается неизменным:

$$\Delta b_1 = \Delta b_2 = 10 \text{ мм}.$$

В результате корректировки получили исходный блюм 360 × × 360 *мм*, площадь поперечного сечения которого равна:

$$q_0 = 0{,}98 \cdot 360 \cdot 360 = 127\,000 \text{ мм}^2.$$

Коэффициент вытяжки в клети 2

$$\mu_2 = \frac{104000}{80500} = 1{,}29.$$

Коэффициент вытяжки в клети 1

$$\mu_1 = \frac{127000}{104000} = 1{,}22.$$

Число оборотов валков клети 2

$$n_2 = \frac{K_2}{q_2 D_{к2}} = \frac{646 \cdot 10^6}{80500 \cdot 710} = 11{,}4 \text{ об/мин}.$$

Число оборотов валков клети 1

$$n_1 = \frac{K_1}{q_1 D_{к1}} = \frac{640 \cdot 10^6}{104000 \cdot 700} = 8{,}8 \text{ об/мин}.$$

Окружная скорость валков клети 1

$$v_1 = \frac{\pi D_{к1} n_1}{60} = \frac{3{,}14 \cdot 0{,}7 \cdot 8{,}8}{60} = 0{,}32 \text{ м/сек}.$$

Расчет произвели для минимального рабочего диаметра валков, поэтому нет необходимости в проверке угла захвата при максимальном диаметре валков. Результаты расчета приведены в табл. 25 и 26.

### *Построение калибров*

Прокатка на непрерывных заготовочных станах ведется обычно без верхнего или нижнего давления, т. е.

$$D_{к.н} = D_{к.в}.$$

Ширину дна прямоугольного калибра $b_к$ принимаем равной ширине задаваемого в него раската. Ширину калибра по разъему валков $B_к$ определяем с учетом величины выпуска калибра $\varphi$ и глубины среза ручья $h_р$.

Выпуск определяем по графику (см. рис. 59).

Глубина среза ручья ящичного калибра равна

$$h_р = \frac{h - s}{2}.$$

Ширину ящичного калибра по разъему, радиусы закруглений углов калибра $R$ и буртов $r$ принимаем по данным, приведенным в начале этого раздела [1].

[1] См. с. 115.

Таблица 25

**Калибровка валков первой группы непрерывного заготовочного стана 900/700/500 (все калибры прямоугольной формы)**

| Номер клети | Размеры полосы, *мм* | | Зазор между валками $s$, *мм* | Абсолютное обжатие $\Delta h$, *мм* | Уширение $\Delta b$, *мм* | Коэффициент вытяжки $\mu$ | Угол захвата $\alpha$ | Катающий диаметр $D_к$, *мм* | Площадь поперечного сечения полосы $q$, *мм²* | Число оборотов валков $n$, *об/мин* | Константа калибровки $K \cdot 10^{-6}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | высота | ширина | | | | | | | | | |
| | 360 | 360 | — | — | — | — | — | — | 127 000 | — | — |
| 1г | 280 | 370 | 120 | 80 | 10 | 1,22 | 29° | 700 | 104 000 | 8,8 | 640 |
| 2г | 210 | 380 | 60 | 70 | 10 | 1,29 | 25° | 710 | 78 500 | 11,4 | 646 |
| 3г | 310 | 225 | 140 | 70 | 15 | 1,14 | 26° 10′ | 690 | 68 700 | 12,8 | 608 |
| 4г | 240 | 240 | 50 | 70 | 15 | 1,22 | 27° | 670 | 56 500 | 16,4 | 618 |
| 5в | 175 | 255 | 20 | 65 | 15 | 1,29 | 29° 30′ | 505 | 43 800 | 27,4 | 628 |
| 6г | 190 | 190 | 20 | 65 | 15 | 1,24 | 29° | 510 | 35 400 | 35,4 | 638 |
| 7г | 138 | 205 | 16 | 53 | 14 | 1,27 | 25° | 538 | 27 800 | 43,3 | 648 |
| 8г | 150 | 150 | 16 | 55 | 12 | 1,25 | 26° | 546 | 22 050 | 54,3 | 658 |

Таблица 26

**Калибровка валков второй группы 500 непрерывного заготовочного стана 900/700/500**

| Номер клети | Форма калибров | Размеры полосы, *мм* | | Зазор между валками $s$, *мм* | Абсолютное обжатие $\Delta h$, *мм* | Площадь поперечного сечения полосы $q$, *мм²* | Уширение $\Delta b$, *мм* | Коэффициент вытяжки $\mu$ | Угол захвата $\alpha$ | Катающий диаметр $D_к$, *мм* | Число оборотов валков $n$, *об/мин* | Константа калибровки $K \cdot 10^{-6}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | высота | ширина | | | | | | | | | |
| 9в | Ромб | 164,5 | 224 | 10 | 46,5 | 18 700 | 8,1 | 1,2 | 29° 10′ | 458 | 77,5 | 661 |
| 10г | Квадрат | 176 | 176 | 10 | 48,0 | 15 600 | 11,5 | 1,2 | 30° 10′ | 452 | 96,0 | 675 |
| 11в | Ромб | 129,5 | 193 | 8 | 67,5 | 12 500 | 16,5 | 1,25 | 30° 10′ | 478 | 115,0 | 689 |
| 12г | Квадрат | 141 | 141 | 8 | 52,0 | 10 000 | 11,5 | 1,25 | 30° | 468 | 150,0 | 703 |
| 13в | Ромб | 103 | 155 | 5 | 38,0 | 8 000 | 9,7 | 1,25 | 24° 20′ | 483,5 | 186,0 | 717 |
| 14г | Квадрат | 113 | 113 | 5 | 42,0 | 6 400 | 10,0 | 1,25 | 24° 55′ | 478,5 | 239,0 | 731 |

Таблица 27

**Расчетные размеры калибров непрерывного заготовочного стана 900/700/500 с индивидуальным приводом валков**

| Номер клети | Вид калибра | Размеры без учета закруглений, *мм* | | Диаметр валков, *мм* | | Размеры калибров с учетом закруглений, *мм* | | | | Радиусы закруглений, *мм* | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | высота $h$ | ширина $b$ | катающий $D_к$ | Номинальный $D$ | высота $h_к$ | ширина по разъему $B_к$ | ширина по дну ручья $b_к$ | Высота ручья $h_р$ | диа калибра $R$ | буртов $r$ |
| 1г | Прямоугольный | 280 | 370 | 700 | 980 | 280 | 402 | 360 | 80 | 50 | 25 |
| 2г | » | 210 | 380 | 710 | 920 | 210 | 415 | 370 | 75 | 40 | 20 |
| 3г | » | 310 | 225 | 690 | 1000 | 310 | 244 | 210 | 85 | 30 | 15 |
| 4г | » | 240 | 240 | 670 | 910 | 240 | 263 | 225 | 95 | 30 | 15 |
| 5в | » | 175 | 255 | 505 | 680 | 175 | 271 | 240 | 77,5 | 30 | 15 |
| 6г | » | 190 | 190 | 510 | 700 | 190 | 209 | 175 | 85 | 25 | 12 |
| 7в | » | 138 | 205 | 538 | 676 | 138 | 214 | 190 | 61 | 20 | 10 |
| 8г | » | 150 | 150 | 546 | 696 | 150 | 152 | 138 | 67 | 20 | 10 |
| 9в | Ромбический | 164,5 | 224 | 458 | 540 | 155 | 210 | — | 72,5 | 20 | 10 |
| 10г | Квадратный | 176 | 176 | 452 | 540 | 161 | 166 | — | 75,5 | 18 | 10 |
| 11в | Ромбический | 129,5 | 193 | 478 | 538 | 122 | 182 | — | 57 | 18 | 10 |
| 12г | Квадратный | 141 | 141 | 468 | 538 | 129 | 133 | — | 60,5 | 15 | 8 |
| 13в | Ромбический | 103 | 155 | 483,5 | 535 | 97 | 108 | — | 46 | 15 | 8 |
| 14г | Квадратный | 113 | 113 | 478,5 | 535 | 105 | 108 | — | 50,0 | 10 | 5 |

Стрелу выпуклости дна калибра принимаем равной 1—5 *мм*.

Уклон боковых стенок ящичных калибров, из которых получают товарную или передельную заготовку, делают небольшим ($\varphi \approx 10\%$). Этим предотвращается выпучивание заготовок при нагреве в печах сортопрокатных станов.

При построении ромбических и квадратных калибров можно пользоваться следующими формулами.

Размеры ромбических калибров с учетом закруглений

$$h'_{\text{р}} = h_{\text{р}} - 2r\left[\sqrt{1 + \left(\frac{h_{\text{р}}}{b_{\text{р}}}\right)^2} - 1\right]; \tag{49}$$

$$b'_{\text{р}} = b_{\text{р}}\left(1 - \frac{s}{h_{\text{р}}}\right). \tag{50}$$

Размеры квадратных калибров с учетом закруглений

$$h'_{\text{к}} = h_{\text{кв}} - 0{,}82r;$$

$$b'_{\text{к}} = b_{\text{кв}} - s.$$

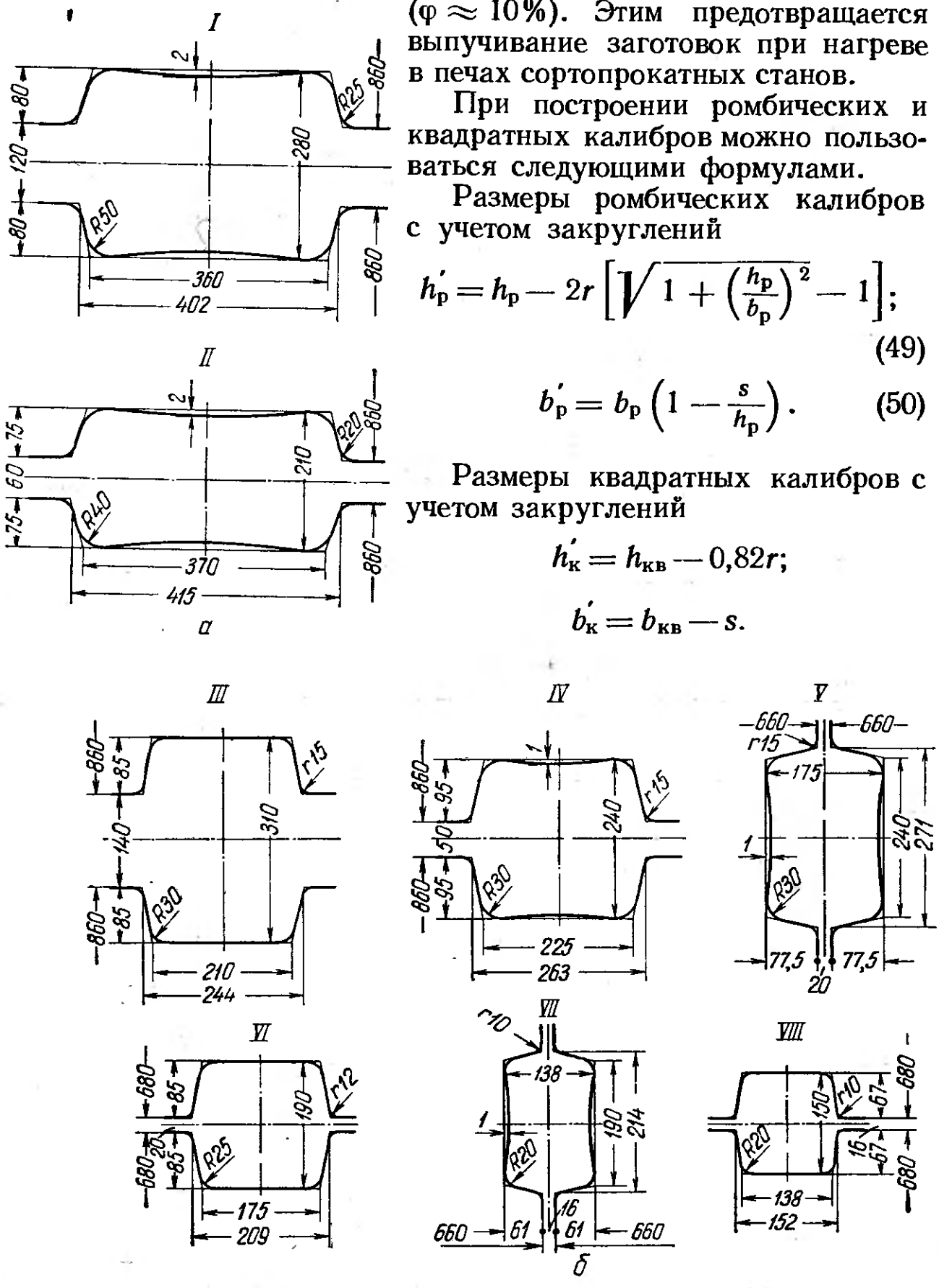



Рис. 62. Расчетная калибровка непрерыв

*а* — отдельно стоящне клети 900; *б* —

Радиус закругления при вершине ромбического калибра принимают равным радиусу закругления задаваемого в калибр квадратного раската. Радиус закругления при вершине квадратных калибров выбирают в соответствии с сортаментом выпускаемых заготовок:

$$R \approx (0{,}15 \div 0{,}20)\ h_{\text{р}}.$$

Радиусы закругления буртов принимают в пределах

$$r = (0{,}08 \div 0{,}2)\ b_{\text{к}}.$$

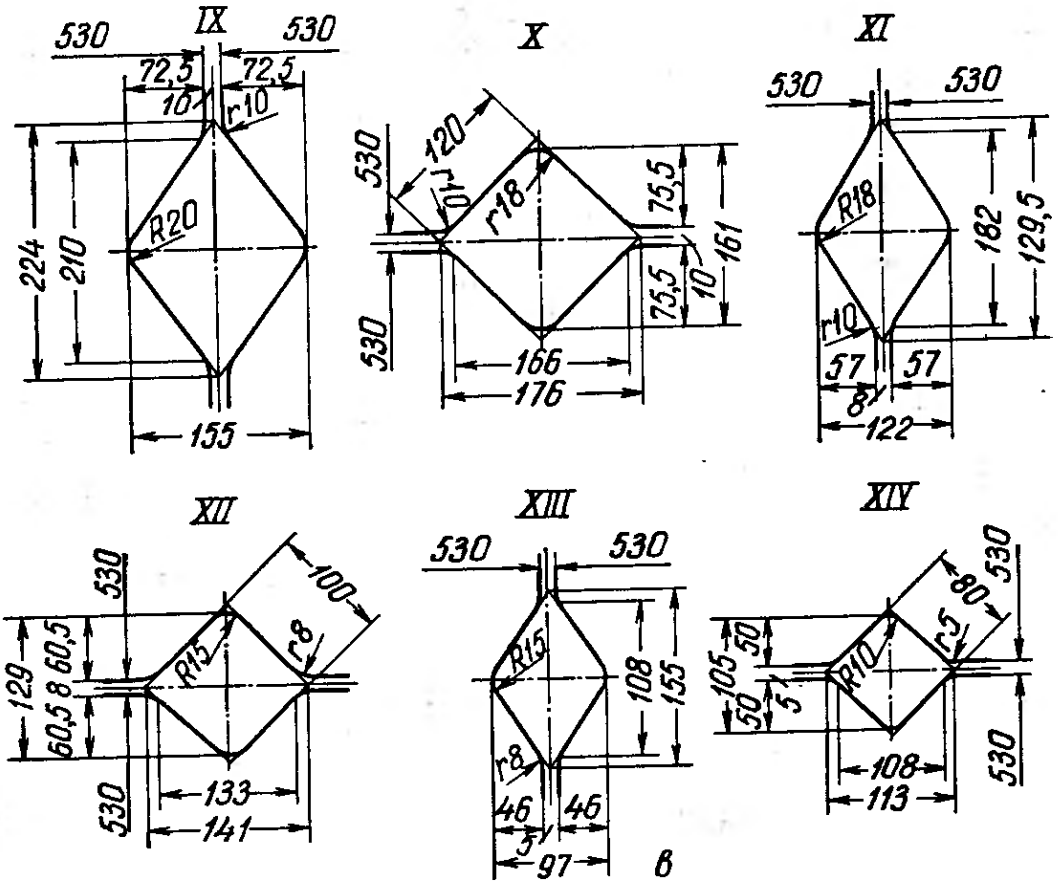
Размеры калибров для прокатки заготовок 80 × 80 *мм* из блюма 360 × 360 *мм* приведены в табл. 27.

Расчетная калибровка непрерывного заготовочного стана 900/700/500 приведена на рис. 62.

## Примерный расчет калибровки валков непрерывного заготовочного стана 630/450 с групповым приводом валков

*Исходные данные*

| | |
|---|---|
| Исходные размеры блюма, *мм* . . . . . | 285×285 |
| Конечное сечение заготовки, *мм* . . . . . | 60×60 |
| Промежуточное сечение полосы, *мм* . . . . . | 120×120 |




ного заготовочного стана 900/700/500:

первая группа; *в* — вторая группа

| | |
|---|---|
| Предусмотреть прокатку заготовок *мм* . . . | 80×80; 100×100 и 150×150 |
| Начальный диаметр валков *D*, *мм*: | |
| первой группы . . . . . | 630 |
| второй группы . . . . . | 450 |

Числа оборотов валков по клетям, *об/мин*:
первой группы

$$n_1 = 9{,}2; \quad n_5 = 26{,}46;$$
$$n_2 = 11{,}6; \quad n_6 = 31{,}86;$$
$$n_3 = 15{,}8; \quad n_7 = 38{,}76;$$
$$n_4 = 20{,}4; \quad n_8 = 48{,}42;$$

второй группы

$$n_9 = 61{,}64; \quad n_{12} = 115{,}75;$$
$$n_{10} = 75{,}69; \quad n_{13} = 155{,}6;$$
$$n_{11} = 93{,}88; \quad n_{14} = 201{,}6.$$

Коэффициент натяжения полосы между рабочими клетями принимаем для первой группы $k_н = 1{,}01$ и для второй 1,015.

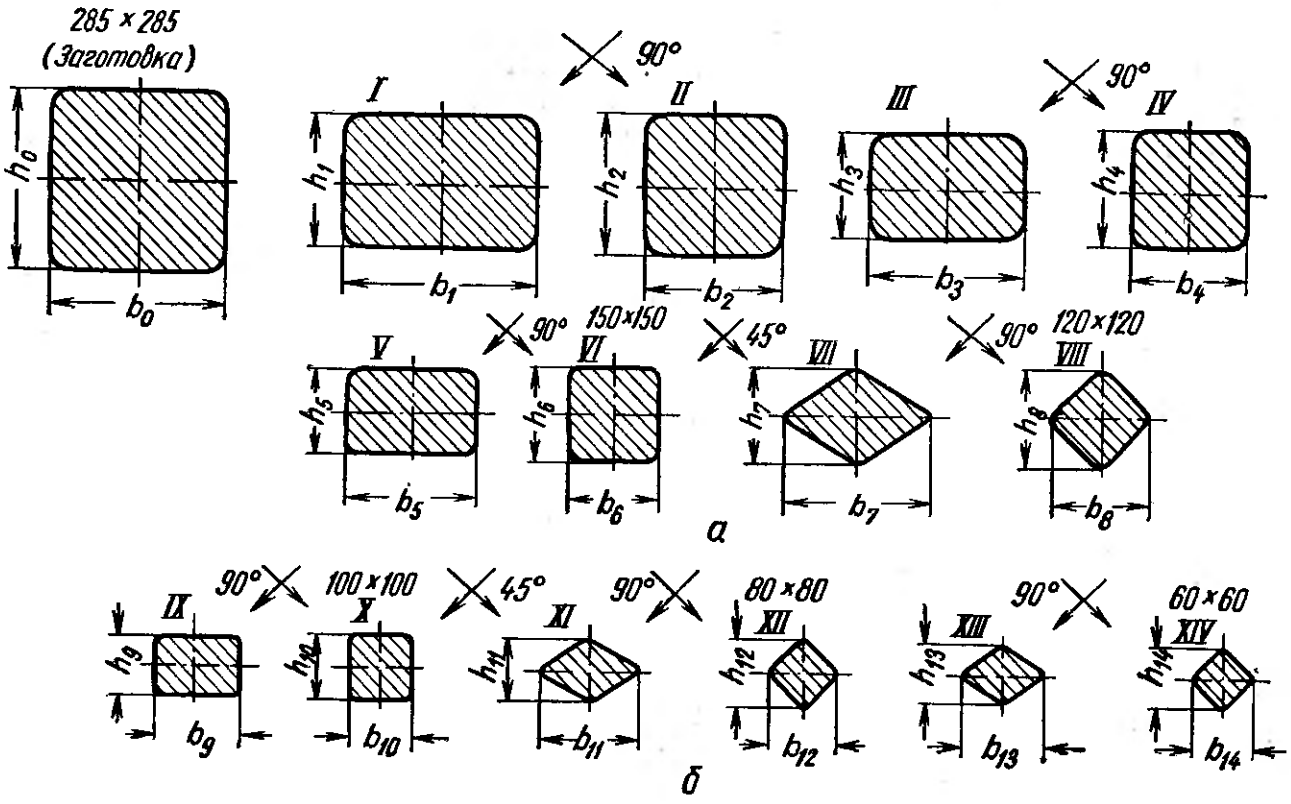



Рис. 63. Предварительная схема калибровки непрерывного заготовочного стана 630/450:

*а* — первая группа; *б* — вторая группа

Коэффициент ограничения $k_{огр} = 1{,}0$ в первых двух клетях и $k_{огр} = 0{,}7$ во всех остальных клетях.

Схему калибровки выбираем, исходя из следующих соображений. В первых шести клетях первой и двух клетях второй группы

принимаем ящичные (прямоугольные) калибры, а в последних двух клетях первой группы и в четырех клетях второй группы принимаем чередующиеся ромбические и квадратные калибры, врезанные по диагонали по тем же причинам, что и в калибровке непрерывного заготовочного стана с индивидуальным приводом клетей.

Предварительная схема калибровки валков непрерывного заготовочного стана 630/450 приведена на рис. 63.

По принятой схеме калибровки валков заготовки сечением 150 × 150, 120 × 120 и 100 × 100 *мм* получаем соответственно из прямоугольных калибров клетей 6, 8 и 10, а заготовки сечением 80 × 80 и 60 × 60 *мм* — из квадратных калибров клетей 12 и 14.

### *Расчет калибровки валков второй группы*

Калибровку рассчитываем с целью получения профиля при минимальном допуске. Размеры горячего профиля поэтому принимаем равными размерам холодного, т. е.

$$c_{14} = 60 \text{ мм}.$$

Как и в предыдущем примере, расчет производим, исходя из минимального диаметра валков.

### *Расчет констант прокатки для клетей второй группы*

Площадь поперечного сечения $q_{14}$ готового профиля без закругления

$$q_{14} = c_{14}^2 = 60 \cdot 60 = 3600 \text{ мм}^2.$$

Катающий диаметр валков клети 14г

$$D_{к\,14} = D_0 - \frac{h_{14}}{2} = 450 - \frac{60 \cdot 1{,}41}{2} = 408 \text{ мм},$$

где $h_{14}$ — высота квадратного калибра *XIV*.

Константу прокатки (калибровки) для клети 14г определяем по формуле

$$K_{14} = q_{14} D_{к14}\, n_{14} = 3600 \cdot 408 \cdot 201{,}6 = 297 \cdot 10^6,$$

где $n_{14}$ — число оборотов валков клети 14г.

Для остальных клетей:

$$K_{n-1} = \frac{K_n}{k_н},$$

где $k_н$ — коэффициент натяжения полосы между клетями;

$$K_{13} = \frac{297 \cdot 10^6}{1{,}015} = 293 \cdot 10^6;$$

$$K_{12} = \frac{293 \cdot 10^6}{1{,}015} = 289 \cdot 10^6;$$

$$K_{11} = \frac{289 \cdot 10^6}{1{,}015} = 285 \cdot 10^6;$$

$$K_{10} = \frac{285 \cdot 10^6}{1{,}015} = 281 \cdot 10^6;$$

$$K_9 = \frac{281 \cdot 10^6}{1{,}015} = 277 \cdot 10^6.$$

*Расчет размеров калибров валков клетей 13в и 14г*

Высота квадратного калибра клети 14г

$$h_{14} = 1{,}41 c_{14} = 1{,}41 \cdot 60 = 85 \text{ мм}.$$

Ширина калибра XIV равна его высоте

$$b_{14} = h_{14} = 85 \text{ мм}.$$

Общий коэффициент вытяжки в калибрах *XIII* и *XIV*

$$\mu_{13\text{–}14} = \frac{80 \cdot 80}{60 \cdot 60} = 1{,}78.$$

Коэффициенты вытяжки в клетях 13 и 14 принимаем одинаковыми:

$$\mu_{13} = \mu_{14} = \sqrt{\mu_{13\text{–}14}} = \sqrt{1{,}78} = 1{,}33.$$

Площадь поперечного сечения полосы после калибра *XIII*

$$q_{13} = q_{14}\mu_{14} = 3600 \cdot 1{,}33 = 4780 \text{ мм}^2.$$

Для определения высоты калибра *XIII* необходимо знать уширение ромбической полосы в квадратном калибре $\Delta b_{14}$, которое находим по графикам (рис. 54—57).

Ввиду того, что графика для стана с валками диаметром 450 *мм* нет, определяем уширение интерполяцией:

так как $\Delta b = 11$ *мм* при $D = 500$ *мм* и $\Delta b = 8$ *мм* при $D = 350$ *мм*, то можно принять

$$\Delta b_{14} = 10 \text{ мм}.$$

Высота ромбического калибра *XIII*

$$h_{13} = b_{14} - \Delta b_{14} = 85\text{—}10 = 75 \text{ мм}.$$

Ширина ромбического калибра *XIII*

$$b_{13} = \frac{2q_{13}}{h_{13}} = \frac{2 \cdot 4780}{75} = 127 \text{ мм}.$$

Обжатие в квадратном калибре *XIV*

$$\Delta h_{14} = b_{13} - h_{14} = 127 - 85 = 42 \text{ мм}.$$

Обжатие в ромбическом калибре *XIII*

$$\Delta h_{13} = 1{,}41c_{12} - h_{13} = 1{,}41 \cdot 80 - 75 = 38 \text{ мм}.$$

Простор на уширение в ромбическом калибре *XIII*

$$\Delta b_{13} = b_{13} - 1{,}41c_{12} = 127 - 1{,}41 \cdot 80 \approx 14 \text{ мм}.$$

Расчетное уширение квадратной полосы в ромбическом калибре *XIII*

$$\Delta b_{13} = 0{,}4 \sqrt{(113 - 75)\frac{450 - 75}{2} \cdot \frac{113 - 75}{113}} = 8 \text{ мм}.$$

Уширение значительно меньше простора на уширение ($14 > 8$), поэтому размеры ромбического калибра XIII оставляем без изменений.

Катающий диаметр валков клети 13

$$D_{к\,13} = \frac{K_{13}}{q_{13}n_{13}} = \frac{293}{4780 \cdot 155{,}5} = 396 \text{ мм}.$$

Номинальный диаметр валков клети 13

$$D_{013} = D_{к\,13} + \frac{h_{13}}{2} = 396 + \frac{75}{2} = 433 \text{ мм}.$$

Угол захвата в клети 14

$$\alpha_{14} = \arccos\left(1 - \frac{\Delta h_{14}}{D_{14\,\min}}\right),$$

где $D_{14\,\min}$ — диаметр валка по месту наибольшего вреза калибра;

$$D_{14\,\min} = D_{014} - h_{14} = 450 - 85 = 365 \text{ мм};$$

$$\alpha_{14} = \arccos\left(1 - \frac{42}{365}\right) = 28°.$$

Угол захвата в клети 13

$$\alpha_{13} = \arccos\left(1 - \frac{38}{433 - 75}\right) = 26°30'.$$

### *Расчет калибров XI и XII*

Квадратный калибр клети 12г и ромбический калибр валков клети 11 рассчитываем аналогично калибрам валков клетей 13 и 14.

Коэффициенты вытяжек в клетях 11 и 12 равны

$$\mu_{11} = \mu_{12} = \sqrt{\frac{100 \cdot 100}{80}} = 1{,}25.$$

По графикам (см. рис. 55 и 56) определяем уширение $\Delta b_{12} = 9$ *мм*. Размеры ромбического калибра

$$h_{11} b_{12} = 104 \cdot 154 \text{ мм}.$$

Простор на уширение в ромбическом калибре

$$\Delta b_{11} = b_{11} - 1{,}41 \cdot c_{10} = 154 - 1{,}41 \cdot 100 = 13 \text{ мм}.$$

По формуле (48) уширение составляет 8,5 *мм*, т. е. расчетное уширение меньше простора на уширение, поэтому размеры ромбического калибра не корректируем. По ширине этот калибр заполнен на

$$\frac{141 + 8{,}5}{154} \cdot 100 = 97\%.$$

Далее идут прямоугольные калибры клетей 9 и 10.

*Расчет калибра X*

Площадь поперечного сечения калибра без закруглений

$$q_{10} = 100 \cdot 100 = 10\,000 \text{ мм}^2.$$

Катающий диаметр

$$D_{к\,10} = \frac{K_{10}}{q_{10} n_{10}} = \frac{281 \cdot 10^6}{10000 \cdot 75{,}69} = 382 \text{ мм}.$$

Начальный диаметр валков

$$D_{0_{10}} = D_к + h_{10} = 382 + 100 = 482 \text{ мм}.$$

Принимаем угол захвата

$$\alpha_{10} = 23^\circ = 0{,}401 \text{ рад};$$

$$\cos 23^\circ = 0{,}920.$$

Абсолютное обжатие

$$\Delta h_{10} = D_{к\,10} (1 - \cos \alpha_{10}) = 382 (1 - 0{,}920) = 27 \text{ мм}.$$

Высота задаваемого в калибр раската

$$H_{10} = h_{10} + \Delta h_{10} = 100 + 27 = 127 \text{ мм}.$$

Уширение при $b_{ср} = 97$ *мм* по формуле (1) равно

$$\Delta b_{10} = \frac{2 \cdot 97 \cdot 27 \cdot 0{,}7}{(127 + 100)\left[1 + (1 + 0{,}401)\left(\frac{97}{191 \cdot 0{,}401}\right)^2\right]} = 5 \text{ мм}.$$

*Расчет калибра IX*

Высота полосы

$$h_9 = b_{10} - \Delta b_{10} = 100—5 = 95 \text{ мм}.$$

Ширина полосы

$$b_9 = h_{10} = 127 \text{ мм}.$$

Площадь поперечного сечения полосы после калибра *IX*

$$q_9 = b_9 h_9 = 95 \cdot 127 = 12\,000 \text{ мм}^2.$$

Коэффициент вытяжки в клети 10

$$\mu_{10} = \frac{12000}{10000} = 1{,}2.$$

Катающий диаметр валков клети 9

$$D_{к9} = \frac{277 \cdot 10^6}{12000 \cdot 61{,}64} = 374 \text{ мм}.$$

Начальный диаметр валков клети 9

$$D_9 = D_{к9} + h_9 = 374 + 95 = 469 \text{ мм}.$$

Принимаем угол захвата

$$\alpha_9 = 21° = 0{,}366 \text{ рад};$$

$$\cos 21° = 0{,}932.$$

Абсолютное обжатие

$$\Delta h_9 = D_{к9} (1 - \cos \alpha_9) = 374 (1 - 0{,}932) = 25 \text{ мм}.$$

Высота задаваемого в калибр раската

$$H_9 = h_9 + \Delta h_9 = 95 + 25 = 120 \text{ мм}.$$

Уширение в калибре *IX* при $b_{ср} \approx 125$ *мм* равно

$$\Delta b_9 = \frac{2 \cdot 125 \cdot 25 \cdot 0{,}7}{(120 + 95)\left[1 + (1 + 0{,}366)\left(\frac{125}{187 \cdot 0{,}366}\right)^2\right]} = 5 \text{ мм}.$$

Ширина задаваемого в калибр *IX* раската

$$B_9 = b_9 - \Delta b_9 = 127 - 5 = 122 \text{ мм}.$$

*Корректировка калибровки клетей 9 и 10*

Полученные размеры отличаются от заданных. Вместо исходной заготовки 120 × 120 *мм* в результате расчета получили заготовку 120 × 122 *мм*. Для того чтобы ликвидировать эту неувязку, необходимо изменить размеры раската, поступающего в клеть 10. Корректировать калибровку можно двумя способами.

*Для корректировки первым способом* — подбором искомых значений — задаемся обжатием в клети 10

$$\Delta h_{10} = 25 \text{ мм},$$

тогда высота задаваемой в калибр $X$ полосы равна

$$H_{10} = h_{10} + \Delta h_{10} = 100 + 25 = 125 \text{ мм}.$$

Угол захвата в клети 10

$$\alpha_{10} = \arccos\left(1 - \frac{\Delta h_{10}}{D_{к10}}\right) = \arccos\left(1 - \frac{25}{382}\right) = 21°00' = 0{,}366 \text{ рад};$$

$$\cos\alpha_{10} = \cos 21° = 0{,}932.$$

Уширение в калибре $X$

$$\Delta b_{10} = \frac{2 \cdot 97 \cdot 25 \cdot 0{,}7}{(125 + 100)\left[1 + (1 + 0{,}366)\left(\frac{97}{191 \cdot 0{,}366}\right)^2\right]} = 4{,}8 \text{ мм} \approx 5 \text{ мм}.$$

Ширина задаваемой в калибр полосы

$$B_{10} = b_{10} - \Delta b_{10} = 100 - 5 = 95 \text{ мм}.$$

Тогда для клети 9 площадь поперечного сечения калибра равна

$$q_9 = b_9 h_9 = 95 \cdot 125 = 11\,650 \text{ мм}^2.$$

Коэффициент вытяжки в клети 10

$$\mu_{10} = \frac{11650}{10000} = 1{,}16.$$

Катающий диаметр валков клети 9

$$D_{к9} = \frac{K_9}{q_9 n_9} = \frac{277 \cdot 10^6}{11650 \cdot 61{,}64} = 385 \text{ мм}.$$

Начальный диаметр валков

$$D_{0_9} = D_{к9} + h_9 = 385 + 95 = 480 \text{ мм}.$$

Абсолютное обжатие оставляем прежнее

$$\Delta h_9 = 25 \text{ мм}.$$

Высота задаваемой в калибр полосы

$$H_9 = h_9 + \Delta h_9 = 95 + 25 = 120 \text{ мм}.$$

Угол захвата в калибре IX

$$\alpha_9 = \arccos\left(1 - \frac{\Delta h_9}{D_{к9}}\right) = \arccos\left(1 - \frac{25}{385}\right) = 20°50' = 0{,}38 \text{ рад}.$$

Уширение в калибре $IX$ при $b_{ср} \approx 122$ *мм* равно

$$\Delta b_9 = \frac{2 \cdot 122 \cdot 25 \cdot 0{,}7}{(120 + 95)\left[1 + (1 + 0{,}38)\left(\frac{122}{192 \cdot 0{,}38}\right)^2\right]} = 5{,}2 \text{ мм} \approx 5 \text{ мм}.$$

Ширина задаваемой в калибр полосы

$$B_9 = b_9 - \Delta b_9 = 125 - 5 = 120 \text{ мм}.$$

Коэффициент вытяжки в клети 9

$$\mu_9 = \frac{120 \cdot 120}{11650} = 1{,}24.$$

*Для корректировки вторым способом* воспользуемся формулами, позволяющими определить размеры калибра, когда известны размеры раската, поступающего в данный калибр, и размеры последующего калибра. Этим способом удобнее пользоваться при большой разнице искомых и расчетных данных.

В принятых обозначениях формулы имеют вид:

$$h_9 = \frac{b_{10} - k_{10}(b_8 + k_9 h_8 - h_{10})}{1 - k_9 k_{10}};$$

$$b_9 = b_8 + k_9 (h_8 - h_9),$$

где $h_9$ — высота раската, выходящего из клети 9 (после корректировки);

$b_9$ — ширина раската, выходящего из клети 9 (после корректировки);

$k_9$ и $k_{10}$ — показатели уширения в клетях 9 и 10, равные:

$$k_9 = \frac{\Delta b_9}{\Delta h_9} = \frac{5}{25} = 0{,}2;$$

$$k_{10} = \frac{\Delta b_{10}}{h_{10}} = \frac{1}{27} = 0{,}185.$$

Высота раската после корректировки

$$h_9 = \frac{100 - 0{,}185(120 + 0{,}2 \cdot 122 - 100)}{1 - 0{,}2 \cdot 0{,}185} = 95 \text{ мм}.$$

Ширина раската после корректировки

$$b_9 = 120 + 0{,}2(122 - 95) = 125 \text{ мм}.$$

Размеры прямоугольного калибра получились такие же, как и по первому способу корректировки, поэтому уширение, катающие диаметры и углы захвата не меняем.

Полученные расчетные данные приведены в табл. 28.

*Расчет калибровки валков клетей первой группы*

Константа клети 8 с учетом закруглений равна

$$K_8 = 0{,}98 q_8 D_{к8} n_8;$$

$$D_{к8} = D_8 - \frac{h_8}{2} = 630 - \frac{1{,}41 \cdot 120}{2} = 545 \text{ мм};$$

$$K_8 = 0{,}98 \cdot 14\,400 \cdot 545 \cdot 48{,}42 = 380 \cdot 10^6.$$

Таблица 28

**Калибровка валков второй группы 450 непрерывного заготовочного стана 630/450**

| Номер клети | Вид калибра | Размеры полосы, *мм* | | | Обжатие $\Delta h$, *мм* | Уширение $\Delta b$, *мм* | Площадь поперечного сечения $q$, *мм²* | Число оборотов валков $n$, *об/мин* | Катающий диаметр $D_к$, *мм* | Начальный диаметр $D$, *мм* | Константа калибровки $K \cdot 10^{-6}$ | Коэффициент вытяжки $\mu$ | Угол захвата | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | высота $h$ | ширина $b$ | сторона квадрата $c$ | | | | | | | | | при $D_{max}$ | при $D_{min}$ |
| 9 | Заготовка . . | 120 | 120 | 120 | — | — | 14 400 | — | — | — | — | — | — | — |
| | Прямоугольный . . . | 95 | 125 | — | 25 | 5 | 11 650 | 61,64 | 385 | 480 | 277 | 1,24 | 20° 50′ | 22° 00′ |
| | Кантовка | | | | | | | | | | | | | |
| 10 | Прямоугольный . . . . | 100 | 100 | 100 | 25 | 5 | 10 000 | 75,69 | 382 | 482 | 281 | 1,16 | 21° 00′ | 22° 00′ |
| | Кантовка | | | | | | | | | | | | | |
| 11 | Ромб . . . . | 104 | 154 | — | 37 | 8 | 8 000 | 93,88 | 381 | 432 | 285 | 1,25 | 27° 30′ | 29° 20′ |
| | Кантовка | | | | | | | | | | | | | |
| 12 | Квадрат . . . | 113 | 113 | 80 | 41 | 9 | 6 400 | 115,75 | 390 | 446 | 289 | 1,25 | 28° 40′ | 30° 10′ |
| 13 | Ромб . . . . | 75 | 127 | — | 38 | 10 | 4 780 | 155,5 | 396 | 433 | 293 | 1,33 | 26° 30′ | 27° 40′ |
| | Кантовка | | | | | | | | | | | | | |
| 14 | Квадрат . . . | 85 | 85 | 60 | 42 | 10 | 3 600 | 201,6 | 408 | 450 | 297 | 1,33 | 28° 00′ | 29° 30 |

Константы остальных клетей:

$$K_7 = \frac{K_8}{k_н} = \frac{380 \cdot 10^6}{1{,}01} = 377 \cdot 10^6;$$

$$K_6 = \frac{377 \cdot 10^6}{1{,}01} = 374 \cdot 10^6;$$

$$K_5 = \frac{374 \cdot 10^6}{1{,}01} = 371 \cdot 10^6;$$

$$K_4 = \frac{371 \cdot 10^6}{1{,}01} = 368 \cdot 10^6;$$

$$K_3 = \frac{368 \cdot 10^6}{1{,}01} = 365 \cdot 10^6;$$

$$K_2 = \frac{365 \cdot 10^6}{1{,}01} = 362 \cdot 10^6;$$

$$K_1 = \frac{362 \cdot 10^6}{1{,}01} = 359 \cdot 10^6;$$

*Расчет калибровки валков клетей 7в и 8г*

Высота квадратного калибра *VIII*

$$h_8 = 1{,}41 c_8 = 1{,}41 \cdot 120 = 169 \text{ мм}.$$

Ширина квадратного калибра *VIII* равна его высоте

$$b_8 = h_8 = 169 \text{ мм}.$$

Площадь поперечного сечения квадратного калибра *VIII* (без учета закруглений):

$$q'_8 = 120 \cdot 120 = 14\,400 \text{ мм}^2.$$

Общий коэффициент вытяжки в клетях 7 и 8

$$\mu_{7-8} = \frac{150 \cdot 150}{14400} = 1{,}56.$$

Принимаем одинаковые коэффициенты вытяжки в клетях 7в и 8г

$$\mu_7 = \mu_8 = \sqrt{\mu_{7-8}} = \sqrt{1{,}56} = 1{,}25.$$

Площадь поперечного сечения полосы после ромбического калибра *VII* (без учета закруглений)

$$q_7 = q_8 \mu = 14\,400 \cdot 1{,}25 = 1800 \text{ мм}^2.$$

С учетом закруглений

$$q_7 = 0{,}98 \cdot 18\,000 = 17\,600 \text{ мм}^2.$$

Уширение ромбической полосы в квадратном калибре *VIII* определяем по графикам $\Delta b = f(c, \mu, D)$

$$\Delta b_8 = 13 \text{ мм}.$$

Высота ромбического калибра *VII*

$$h_7 = b_8 - \Delta b_8 = 169 - 13 = 156 \text{ мм}.$$

Ширина ромбического калибра *VII* без учета закруглений

$$b_7 = \frac{2q_7}{h_7} = \frac{2 \cdot 18000}{156} = 230 \text{ мм}.$$

Абсолютное обжатие в квадратном калибре *VIII*

$$\Delta h_8 = b_7 - h_8 = 230 - 169 = 61 \text{ мм}.$$

Обжатие в ромбическом калибре *VII*

$$\Delta h_7 = 1{,}41 c_6 - h_7 = 1{,}41 \cdot 150 - 156 = 56 \text{ мм}.$$

Катающий диаметр валков клети 7

$$D_{к7} = \frac{K_7}{q_7 n_7} = \frac{377 \cdot 10^6}{17600 \cdot 38{,}74} = 555 \text{ мм}.$$

Начальный диаметр валков клети 7

$$D_7 = D_{к7} + \frac{h_7}{2} = 555 + \frac{156}{2} = 633 \text{ мм}.$$

Простор на уширение в ромбическом калибре *VII*

$$\Delta b_7 = b_7 - 1{,}41 c_6 = 226 - 1{,}41 \cdot 150 = 14 \text{ мм}.$$

Расчетное уширение квадратной полосы в ромбическом калибре *VII*

$$\Delta b_7 = 0{,}4 \sqrt{(212 - 156) \frac{633 - 156}{2} \cdot \frac{212 - 156}{212}} = 12{,}2.$$

Угол захвата в клети 8

$$\alpha_8 = \arccos\left(1 - \frac{57}{630 - 169}\right) = 28°40'.$$

Угол захвата в клети 7

$$\alpha_7 = \arccos\left(1 - \frac{56}{633 - 156}\right) = 25°20'.$$

*Расчет размеров прямоугольных калибров I—VI*

*Калибр VI.* Площадь поперечного сечения

$$q_6 = 0{,}98 \cdot 150 \cdot 150 = 22\,050 \text{ мм}^2.$$

Катающий диаметр валков

$$D_{к6} = \frac{K_6}{q_6 n_6} = \frac{374 \cdot 10^6}{22050 \cdot 31{,}86} = 530 \text{ мм}.$$

Начальный диаметр валков

$$D_6 = D_{к6} + h_6 = 530 + 150 = 680 \text{ мм}.$$

Принимаем угол захвата

$$\alpha_6 = 24° = 0{,}419 \text{ рад};$$
$$\cos 24° = 0{,}913.$$

Абсолютное обжатие

$$\Delta h_6 = D_{к6} (1 - \cos \alpha_6) = 530 (1 - 0{,}913) = 45 \text{ мм}.$$

Высота задаваемого в калибр раската

$$H_6 = h_6 + \Delta h_6 = 150 + 45 = 195 \text{ мм}.$$

Расчетное уширение при $b_{ср} \approx 145$ мм

$$\Delta b_6 = \frac{2 \cdot 145 \cdot 45 \cdot 0{,}7}{(195 + 150)\left[1 + (1 + 0{,}419)\left(\frac{145}{260 \cdot 0{,}419}\right)^2\right]} = 7{,}5 \approx 8 \text{ мм}.$$

*Калибр V*. Принимаем угол захвата

$$\alpha_5 = 25° = 0{,}436 \text{ рад};$$
$$\cos 25° = 0{,}906.$$

Высота полосы

$$h_5 = b_6 - \Delta b_6 = 150 - 8 = 142 \text{ мм}.$$

Ширина полосы

$$b_5 = h_6 = 195 \text{ мм}.$$

Площадь поперечного сечения полосы

$$q_5 = 0{,}98 b_5 h_5 = 0{,}98 \cdot 195 \cdot 142 = 27\,200 \text{ мм}^2.$$

Коэффициент вытяжки в калибре *VI*

$$\mu_6 = \frac{27200}{22050} = 1{,}23.$$

Катающий диаметр валков клети 5

$$D_{к5} = \frac{K_5}{q_5 n_5} = \frac{371 \cdot 10^6}{27200 \cdot 26{,}46} = 515 \text{ мм}.$$

Начальный диаметр валков

$$D_5 = D_{к5} + h_5 = 515 + 142 = 657 \text{ мм}.$$

Таблица 29

**Результаты расчета размеров прямоугольных калибров клетей 1—6 заготовочного стана 630/450**

| Номер калибра | Заданное $n$, об/мин | $K \cdot 10^{-6}$ | $h' = h + \Delta h$; мм, $h' = b - \Delta b'$, мм | $b' = b - \Delta b$, $b' = h + \Delta h$, мм | $q = 0{,}98hb$, мм² | $D_к = \frac{K}{qn}$, мм | $D = D_к + h$, мм | $\alpha$ | | $\Delta h = D_к (1 - \cos\alpha)$, мм | Ориентировочная ширина $b_{ср}$, мм | Уширение $\Delta b$, мм, рассчитанное по формуле (1) | $\mu = \frac{q'}{q}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | | град. | рад. | | | | |
| *VI* | 31,6 | 374 | 150 | 150 | 22 050 | 530 | 680 | 24 | 0,419 | 45 | 145 | ~8 | 1,23 |
| | | | | | Кантовка | | | | | | | | |
| *V* | 26,46 | 371 | 142 | 195 | 27 200 | 515 | 657 | 25 | 0,436 | 48 | 190 | 7 | 1,29 |
| *IV* | 20,4 | 368 | 190 | 188 | 35 000 | 500 | 690 | 29 | 0,506 | 60 | 184 | ~8 | 1,26 |
| | | | | | Кантовка | | | | | | | | |
| *III* | 15,8 | 365 | 180 | 250 | 44 000 | 510 | 690 | 29 | 0,506 | 60 | 245 | ~8 | 1,29 |
| *II* | 11,6 | 362 | 240 | 242 | 57 000 | 550 | 790 | 26 | 0,453 | 54 | 240 | 7 | 1,18 |
| | | | | | Кантовка | | | | | | | | |
| *I* | 9,2 | 359 | 235 | 294 | 68 000 | 575 | 810 | 24 | 0,419 | 50 | 290 | 6 | |
| Заготовка | | | 285 | 288 | | | | | | | | | |

Примечание. $b'$ и $h'$ — размеры задаваемого раската.

Абсолютное обжатие

$$\Delta h_5 = D_{к5}(1 - \cos\alpha_5) = 515(1 - 0{,}906) = 48{,}3 \approx 48 \text{ мм}.$$

Высота задаваемого в калибр раската

$$H_5 = h_5 + \Delta h_5 = 142 + 48 = 190 \text{ мм}.$$

Расчетное уширение при $b_{ср} \approx 190$ мм

$$\Delta b_5 = \frac{2 \cdot 190 \cdot 48 \cdot 0{,}7}{(190 + 142)\left[1 + (1 + 0{,}436)\left(\frac{190}{252 \cdot 0{,}436}\right)^2\right]} = 7{,}2 \approx 7 \text{ мм}.$$

Результаты расчета размеров прямоугольных калибров *I—VI* приведены в табл. 29. Так как расчет вели против хода прокатки, то размеры калибра в предыдущей клети равны $h' = h + \Delta h$, $b' = b - \Delta b$ при отсутствии кантовки и $h' = b - \Delta b$, $b' = h + \Delta h$ при прокатке с кантовкой.

### *Корректировка калибровки клетей 1 и 2*

Полученные размеры отличаются от заданных. Задан блюм 285 × 285 *мм*, а в результате расчета получили исходную заготовку 285 × 288 *мм*. Разность размеров устраняем корректировкой калибровки валков клетей 1 и 2. Учитывая незначительную разность размеров расчетной и заданной заготовок, корректировку производим подбором искомых значений.

*Клеть 2.* Принимаем обжатие

$$\Delta h_2 = 50 \text{ мм}.$$

Высота задаваемой в калибр полосы

$$H_2 = h_2 + \Delta h_2 = 240 + 50 = 290 \text{ мм}.$$

Угол захвата в калибре *II*

$$\alpha_2 = \arccos\left(1 - \frac{\Delta h_2}{D_{к2}}\right) = \arccos\left(1 - \frac{50}{550}\right) = 24°50' = 0{,}433.$$

Уширение при $b_{ср} \approx 240$ мм.

$$\Delta b_2 = \frac{2 \cdot 240 \cdot 50}{(290 + 240)\left[1 + (1 + 0{,}433)\left(\frac{240}{270 \cdot 0{,}433}\right)^2\right]} = 6{,}8 \approx 7 \text{ мм}.$$

Ширина полосы, задаваемой в калибр *II*:

$$B_2 = b_2 - \Delta b_2 = 242 - 7 = 235 \text{ мм}.$$

*Клеть 1.* Площадь поперечного сечения полосы после калибра *I*

$$q_1 = 0{,}98 h_1 b_1 = 0{,}98 \cdot 290 \cdot 235 = 67\,400 \text{ мм}^2.$$

Коэффициент вытяжки в калибре *II*

$$\mu_2 = \frac{67400}{57000} = 1,18.$$

Площадь поперечного сечения блюма

$$q_0 = 0,98 \cdot 285 \cdot 285 = 79\,600 \text{ мм}^2.$$

Коэффициент вытяжки в калибре *I*

$$\mu_1 = \frac{79600}{67400} = 1,19.$$

Катающий диаметр валков клети 1

$$D_{к1} = \frac{K_1}{q_1 n_1} = \frac{359 \cdot 10^6}{67400 \cdot 9,2} = 582 \text{ мм}.$$

Начальный диаметр валков

$$D_{0_1} = D_{к1} + h_1 = 582 + 235 = 817 \text{ мм}.$$

Абсолютное обжатие

$$\Delta h_1 = H_0 + h_1 = 285 - 235 = 50 \text{ мм}.$$

Угол захвата в калибре *I*

$$\alpha_1 = \arccos\left(1 - \frac{\Delta h_1}{D_{к1}}\right) = \arccos\left(1 - \frac{50}{582}\right) = 24° = 0,419 \text{ рад}.$$

Уширение при $b_{ср} \approx 287$ *мм*

$$\Delta b_1 = \frac{2 \cdot 287 \cdot 50}{(235 + 285)\left[1 + (1 + 0,419)\left(\frac{287}{286 \cdot 0,419}\right)^2\right]} = 5,2 \approx 5 \text{ мм}.$$

Ширина раската, задаваемого в калибр *I*:

$$B_0 = b_1 - \Delta b_1 = 290 - 5 = 285 \text{ мм}.$$

Полученные расчетные данные приведены в табл. 30.

Расчет и построение калибров производим по методике, описанной выше. Отличие заключается в том, что величину зазора между валками принимаем равными:
в клетях второй группы

$$s = (0,075 \div 0,1)\ h;$$

а в клетях первой группы

$$s = (0,15 \div 0,2)\ h.$$

Расчетные размеры калибров для прокатки заготовки 60 × × 60 *мм* из блюма 285 × 285 *мм* приведены в табл. 31.

Иногда перед калибровщиком стоит задача рассчитать калибровку таким образом, чтобы при заданном конечном сечении проката получить максимальную производительность имеющегося или

Таблица 30

## Калибровка валков первой группы 630 непрерывного заготовочного стана 630/450

| Номер клети | Вид калибра | Размеры * калибра, *мм* | | | Обжатие $\Delta h$, *мм* | Уширение $\Delta b$, *мм* | Площадь поперечного сечения *q*, *мм*² | Число оборотов валков *n*, *об/мин* | Катающий диаметр $D_к$, *мм*, | Начальный диаметр *D*, *мм* | Констата калибровки $K \cdot 10^{-6}$ | Коэффициент вытяжки $\mu$ | Угол захвата | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | высота *h* | ширина *b* | стороны квадрата *c* | | | | | | | | | при $D_{max}$ | при $D_{min}$ |
| | Заготовка | 285 | 285 | 285 | — | — | 79 600 | — | — | — | — | — | — | — |
| 1 | Прямоугольный | 235 | 290 | — | 50 | 5 | 67 400 | 9,2 | 582 | 817 | 359 | 1,19 | 24° | 25° 40′ |
| | Кантовка | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | Прямоугольный | 240 | 242 | — | 54 | 7 | 57 000 | 11,6 | 550 | 790 | 362 | 1,18 | 24° 50′ | 26° 30′ |
| 3 | То же | 180 | 250 | | 60 | 8 | 44 000 | 15,8 | 510 | 690 | 365 | 1,29 | 28° 10′ | 28° 40′ |
| | Кантовка | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | Прямоугольный | 190 | 188 | — | 60 | 8 | 35 000 | 20,4 | 500 | 690 | 368 | 1,26 | 28° 20′ | 28° 50′ |
| 5 | То же | 142 | 195 | | 48 | 7 | 27 200 | 26,46 | 515 | 657 | 371 | 1,29 | 25° | 26° 30′ |
| | Кантовка | | | | | | | | | | | | | |
| 6 | Прямоугольный | 150 | 150 | 150 | 45 | 8 | 22 050 | 31,86 | 530 | 680 | 374 | 1,23 | 24° | 25° 10′ |
| | Кантовка | | | | | | | | | | | | | |
| 7 | Ромб | 156 | 226 | — | 56 | 12 | 17 600 | 38,74 | 555 | 633 | 377 | 1,25 | 25° 10′ | 26° 20′ |
| | Кантовка | | | | | | | | | | | | | |
| 8 | Квадрат | 169 | 169 | 120 | 57 | 13 | 14 100 | 48,42 | 545 | 630 | 380 | 1,25 | 28° 40′ | 30° 00′ |

* Размеры для ромбов и квадратов даны без учета закруглений.

Таблица 31

## Расчетные размеры калибров валков непрерывного заготовочного стана 630/450

| Номер клети | Форма калибра | Размеры калибра, *мм* | | Диаметр валков, *мм* | | Размеры калибров, *мм* | | | | Радиус закругления, *мм* | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | высота $h$ | ширина $b$ | катающий $D_к$ | начальный $D$ | высота $h_к$ | ширина по разъему $B_к$ | ширина по дну ручья $b_к$ | высота ручья $h_р$ | диа калибра $R$ | буртов $r$ |
| 1 | Прямоугольный | 235 | 290 | 582 | 817 | 235 | 323 | 285 | 95 | 50 | 30 |
| 2 | » | 240 | 242 | 550 | 790 | 240 | 274 | 235 | 97,5 | 50 | 30 |
| 3 | » | 180 | 250 | 510 | 690 | 180 | 272 | 242 | 75 | 50 | 25 |
| 4 | » | 190 | 188 | 500 | 690 | 190 | 212 | 180 | 80 | 45 | 20 |
| 5 | » | 142 | 195 | 515 | 657 | 142 | 212 | 188 | 61 | 40 | 20 |
| 6 | » | 150 | 150 | 530 | 680 | 150 | 155 | 142 | 65 | 30 | 15 |
| 7 | Ромб | 156 | 226 | 555 | 633 | 143 | 204 | — | 64 | 30 | 15 |
| 8 | Квадрат | 169 | 169 | 545 | 630 | 154 | 154 | — | 69,5 | 18 | 10 |
| 9 | Ящичный | 95 | 125 | 385 | 480 | 95 | 137 | 120 | 42,5 | 20 | 15 |
| 10 | Ящичный | 100 | 100 | 382 | 482 | 100 | 113 | 95 | 45 | 15 | 10 |
| 11 | Ромб | 104 | 154 | 381 | 432 | 98 | 140 | — | 44 | 15 | 10 |
| 12 | Квадрат | 113 | 113 | 390 | 446 | 104 | 103 | — | 47 | 10 | 10 |
| 13 | Ромб | 75 | 127 | 396 | 433 | 73 | 114 | — | 32,5 | 10 | 5 |
| 14 | Квадрат | 85 | 85 | 408 | 450 | 79,5 | 77 | — | 35,8 | 8 | 5 |

вновь проектируемого технологического оборудования. В обжимно-заготовочном цехе эту задачу решают выбором максимальных размеров блюма при условии надежного захвата полосы валками непрерывного заготовочного стана.

В этом случае калибровку рассчитывают по максимально допустимым углам захвата.

## Примерный расчет калибровки непрерывного заготовочного стана 630 по максимальным углам захвата

### *Исходные данные*

Конечное сечение заготовки $120 \times 120$ *мм*.

Начальный диаметр валков $D = 630$ *мм*.

Значения чисел оборотов валков по клетям, *об/мин*: $n_1 = 9{,}2$; $n_2 = 11{,}6$; $n_3 = 15{,}8$; $n_4 = 20{,}4$; $n_5 = 26{,}46$; $n_6 = 31{,}86$; $n_7 = 38{,}74$; $n_8 = 48{,}42$.

Коэффициент натяжения полосы между клетями принимаем $k_н = 1{,}01$.

Коэффициент, учитывающий закругления углов калибров, принимаем равным 0,98.

Коэффициент ограничения уширения:

в первых двух клетях $k_{огр} = 1{,}0$;

во всех остальных клетях $k_{огр} = 0{,}7$.

Принимаем схему калибровки стана в соответствии с рис. 63.

С целью получения наибольшего сечения исходной заготовки расчет производим, исходя из максимально возможных углов захвата. Учитывая возможность переточки валков, принимаем начальный диаметр на 11% меньше заданного:

$$D = D' (1—0{,}11) = 630 (1 - 0{,}11) = 570 \text{ мм}.$$

Чтобы получить профиль с минусовыми допусками, принимаем

$$c_8 = 120 \text{ мм}.$$

### *Расчет констант прокатки*

Константу прокатки (калибровки) для клети 8 определяем по формуле

$$K_8 = 0{,}98 q_8 D_{к8} n_8,$$

где катающий диаметр валков клети 8 равен

$$D_{к8} = D_{08} - \frac{h_8}{2} = 570 - \frac{1{,}41 \cdot 120}{2} = 485 \text{ мм},$$

тогда

$$K_8 = 0{,}98 \cdot 120 \cdot 120 \cdot 485 \cdot 48{,}42 = 330 \cdot 10^6.$$

Для остальных клетей

$$K_{n-1} = \frac{K_n}{k_н};$$

$$K_7 = \frac{330 \cdot 10^6}{1{,}01} = 327 \cdot 10^6;$$

$$K_6 = \frac{327 \cdot 10^6}{1{,}01} = 324 \cdot 10^6;$$

$$K_5 = \frac{324 \cdot 10^6}{1{,}01} = 321 \cdot 10^6;$$

$$K_4 = \frac{321 \cdot 10^6}{1{,}01} = 318 \cdot 10^6;$$

$$K_3 = \frac{318 \cdot 10^6}{1{,}01} = 315 \cdot 10^6;$$

$$K_2 = \frac{315 \cdot 10^6}{1{,}01} = 312 \cdot 10^6;$$

$$K_1 = \frac{312 \cdot 10^6}{1{,}01} = 309 \cdot 10^6.$$

*Расчет размеров калибров VII и VIII*

Размеры квадратного калибра *VIII*:

$$b_8 = h_8 = 1{,}41 \cdot c_8 = 1{,}41 \cdot 120 = 169 \text{ мм};$$

$$q_8 = 0{,}98c^2 = 0{,}98 \cdot 120 \cdot 120 = 14\,100 \text{ мм}^2.$$

Принимаем размеры ящичного калибра *VI*

$$h_6 = b_6 = 150 \text{ мм}.$$

Общий коэффициент вытяжки в клетях 7 и 8

$$\mu_{7-8} = \frac{150 \cdot 150}{120 \cdot 120} = 1{,}56.$$

Принимаем равные коэффициенты вытяжки в клетях 7 и 8:

$$\mu_7 = \mu_8 = \sqrt{\mu_{7-8}} = \sqrt{1{,}56} = 1{,}25.$$

Площадь поперечного сечения полосы после калибра *VII*

$$q_7 = q_8\mu_8 = 14\,100 \cdot 1{,}25 = 17\,600 \text{ мм}^2.$$

Уширение ромбической полосы в квадратном калибре *VIII* определяем по графику (см. рис. 55):

$$\Delta b_8 = 13 \text{ мм}.$$

Высота ромбического калибра *VII*

$$h_7 = b_8 - \Delta b_8 = 169 - 13 = 156 \text{ мм}.$$

Ширина *VII* ромбического калибра без учета закруглений

$$b_7 = \frac{2q_7}{h_7} = \frac{2 \cdot 17\,600}{0{,}98 \cdot 156} = 230 \text{ мм}.$$

Обжатие в квадратном калибре *VIII*

$$\Delta h_8 = b_7 - h_8 = 226 - 169 = 57 \text{ мм}.$$

Обжатие в ромбическом калибре *VII*

$$\Delta h_7 = 1{,}41 c_6 - h_7 = 1{,}41 \cdot 150 - 156 = 56 \text{ мм}.$$

Простор на уширение в калибре *VII*

$$\Delta b_7 = b_7 - 1{,}41 c_6 = 230 - 1{,}41 \cdot 150 = 18 \text{ мм}.$$

Катающий диаметр валков клети 7

$$D_{к7} = \frac{K_7}{q_7 n_7} = \frac{327 \cdot 10^6}{17\,600 \cdot 38{,}74} = 480 \text{ мм}.$$

Начальный диаметр валков клети 7

$$D_7 = D_{к7} + \frac{h_7}{2} = 480 + \frac{156}{2} = 558 \text{ мм}.$$

Угол захвата в клети 8

$$\alpha_8 = \arccos\left(1 - \frac{\Delta h}{D_{\min}}\right) = \arccos\left(1 - \frac{57}{570 - 169}\right) = 30°50'.$$

Угол захвата в клети 7

$$\alpha_7 = \arccos\left(1 - \frac{56}{580 - 156}\right) = 30°40'.$$

*Расчет ящичных калибров I—VI*

Площадь поперечного сечения калибра *VI*

$$q_6 = 0{,}98 \cdot 150 \cdot 150 = 22\,050 \text{ мм}^2.$$

Катающий диаметр валков

$$D_{к6} = \frac{K_6}{q_6 n_6} = \frac{324 \cdot 10^6}{22050 \cdot 31{,}86} = 460 \text{ мм}.$$

Начальный диаметр валков

$$D_6 = D_{к6} + h_6 = 460 + 150 = 610 \text{ мм}.$$

Таблица 32

**Расчет прямоугольных калибров клетей 1—6 заготовочного стана 630**

| Номер калибра | Заданное $n$, *об/мин* | $K \cdot 10^{-6}$ | $h' = h + \Delta h$; $h' = b - \Delta b$, *мм* | $b' = b - \Delta b$; $b' = h + \Delta h$, *мм*, | $q = 0{,}98hb$, *мм²* | $D_к = \frac{K}{qn}$, *мм* | $D = D_к + h$, *мм* | $\alpha$, град. | $\Delta h = D_к \times (1 - \cos)$ | Ушнрение $\Delta b$, *мм*, рассчитанное по формуле (1) | $\mu = \frac{q'}{q}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *VI* | 31,86 | 324 | 150 | 150 | 22 050 | 460 | 610 | 30 | 62 | 10 | 1,32 |
| | | | | Кантовка | | | | | | | |
| *V* | 26,46 | 321 | 140 | 212 | 29 100 | 417 | 557 | 30 | 56 | 7 | 1,36 |
| *IV* | 20,4 | 318 | 196 | 205 | 39 500 | 395 | 591 | 30 | 53 | 5 | 1,24 |
| | | | | Кантовка | | | | | | | |
| *III* | 15,8 | 315 | 200 | 249 | 48 900 | 408 | 608 | 29 | 50 | 4 | 1,23 |
| *II* | 11,6 | 312 | 250 | 245 | 60 300 | 446 | 696 | 29 | 55 | 6 | 1,19 |
| | | | | Кантовка | | | | | | | |
| *I* | 9,2 | 309 | 239 | 305 | 71 400 | 461 | 700 | 27 | 51 | 5 | 1,20 |
| Заготовка | | | 290 | 300 | | | | | | | |

Примечание. $b'$ и $h'$ — размеры задаваемого раската.

Таблица 33

## Калибровка валков первой группы непрерывного заготовочного стана 630

| Номер клети | Форма калибра | Размеры калибра, мм | | | $\Delta h$, мм | $\Delta b$, мм | $q$, мм² | $n$, об/мин | $D_к$, мм | $D$, мм | $K \cdot 10^{-6}$ | $\mu$ | $\alpha$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $h$ | $b$ | $c$ | | | | | | | | | |
| | Блюм | 290 | 300 | — | — | — | 85 200 | — | — | — | — | — | — |
| 1 | Прямоугольный | 239 | 305 | — | 51 | 5 | 71 400 | 9,2 | 461 | 700 | 309 | 1,20 | 27° |
| | Кантовка | | | | | | | | | | | | |
| 2 | » | 250 | 245 | — | 55 | 6 | 60 200 | 11,6 | 446 | 696 | 312 | 1,19 | 29° |
| 3 | » | 200 | 249 | — | 50 | 4 | 48 900 | 15,8 | 408 | 608 | 315 | 1,23 | 29° |
| | Кантовка | | | | | | | | | | | | |
| 4 | » | 196 | 205 | — | 53 | 5 | 39 500 | 20,4 | 395 | 591 | 318 | 1,24 | 30° |
| 5 | » | 140 | 212 | — | 56 | 7 | 29 100 | 26,46 | 417 | 557 | 321 | 1,36 | 30° |
| | Кантовка | | | | | | | | | | | | |
| 6 | » | 150 | 150 | 150 | 62 | 10 | 22 050 | 31,86 | 460 | 610 | 324 | 1,32 | 30° |
| 7 | Ромб [1] | 156 | 230 | — | 56 | 12 | 17 600 | 38,74 | 480 | 558 | 327 | 1,25 | 30° 40′ |
| 8 | Квадрат | 169 | 169 | 120 | 57 | 13 | 14 100 | 48,42 | 485 | 570 | 330 | 1,25 | 30° 50′ |

[1] Размеры для ромбических и квадратных калибров даны без учета закруглений.

Принимаем угол захвата

$$\alpha_6 = 30^\circ = 0{,}523 \text{ } рад;$$

$$\cos 30^\circ = 0{,}866.$$

Абсолютное обжатие

$$\Delta h_6 = D_{к6} (1 - \cos \alpha_6) = 460 (1 - 0{,}866) = 61{,}6 \approx 62 \text{ } мм.$$

Высота задаваемого в калибр раската

$$H_6 = h_6 + \Delta h_6 = 150 + 62 = 212 \text{ } мм.$$

Уширение при $b_{ср} = 145$ *мм*

$$\Delta b_6 = \frac{2 \cdot 145 \cdot 6{,}2 \cdot 0{,}7}{(212 + 150)\left[1 + (1 + 0{,}523)\left(\frac{145}{230 \cdot 0{,}523}\right)^2\right]} \approx 10 \text{ } мм.$$

Результаты расчета для остальных клетей приведены в табл. 32 и 33.

Глава IV

# КАЛИБРОВКА ВАЛКОВ ЗАГОТОВОЧНЫХ СТАНОВ И ОБЖИМНЫХ КЛЕТЕЙ ТРИО

## 1. ХАРАКТЕРИСТИКА ЗАГОТОВОЧНЫХ СТАНОВ И ОБЖИМНЫХ КЛЕТЕЙ ТРИО

Различают два вида станов трио для прокатки заготовок: заготовочные станы трио и обжимные клети трио, работающие в составе сортопрокатных станов. Эти трехвалковые станы и клети имели раньше широкое применение на металлургических заводах благодаря простоте их нереверсивного привода [25].

Применение нереверсивных двигателей с маховиком позволяет использовать большие обжатия по сравнению с реверсивными станами такой же мощности, так как перегрузочная способность привода с маховиком в несколько раз выше, а среднеквадратичный момент получается ниже.

Увеличение развеса слитков повлекло за собой увеличение диаметра валков, размеров клети и установку подъемно-качающихся столов.

Заготовочные станы трио (иногда их называют трио-блюминги) служат для прокатки заготовок сечением $80\times80$—$180\times180$ *мм* из слитков малого развеса (0,8—2,0 *т*). В отдельных случаях станы трио служат для прокатки заготовок из блюмов. Обычно заготовочные станы трио применяют на старых заводах и на заводах качественных сталей, где масштабы производства гораздо меньше, чем на заводах, производящих рядовые стали, и где нецелесообразна установка высокопроизводительных непрерывных заготовочных станов. Одновременно следует отметить, что в настоящее время устанавливают непрерывные заготовочные станы и на заводах качественных сталей.

Иногда при небольшом объеме производства на станах трио прокатывают также крупносортные профили. На ряде заводов работают специализированные трубозаготовочные станы трио. Обычно заготовочный стан трио состоит из одной или нескольких клетей. В последнем случае стан состоит из двух или трех рабочих клетей, расположенных в одну линию, с приводом от общего двигателя. Диаметр рабочих валков заготовочных станов трио равен 700—850 *мм*, а у трио-блюмингов достигает 1000—1100 *мм*. Слитки или блюмы нагревают в двух-четырех нагревательных методических печах. В отдельных случаях блюмы поступают с блюминга на заготовочный стан без дополнительного подогрева.

Рабочие клети заготовочных станов, как правило, оборудуют подъемно-качающимися столами, передающими раскаты из одного горизонта прокатки в другой. Валки рабочих клетей трио на отечественных заводах во время работы не раздвигаются, поэтому в каждом калибре, как правило, производят один проход.

За рубежом существуют обжимные станы трио, валки которых могут вертикально перемещаться. Конструкция рабочей клети в этом случае значительно усложняется.

В настоящее время вместо обжимных станов трио даже при малых масштабах производства предпочитают устанавливать реверсивные станы с валками диаметром до 700 *мм* [22, 25].

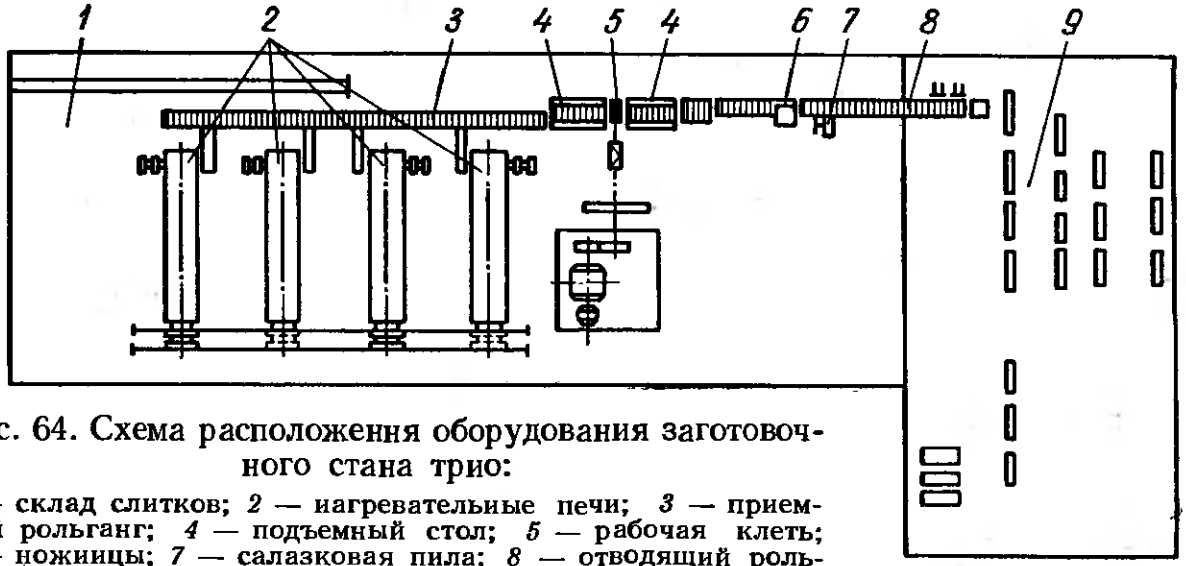



Рис. 64. Схема расположения оборудования заготовочного стана трио:

*1* — склад слитков; *2* — нагревательные печи; *3* — приемный рольганг; *4* — подъемный стол; *5* — рабочая клеть; *6* — ножницы; *7* — салазковая пила; *8* — отводящий рольганг; *9—13* — участок отделки

После прокатки на стане трио металл разрезают на мерные длины на ножницах горячей резки, охлаждают на холодильнике или в колодцах замедленного охлаждения и подают на стеллажи для осмотра и ремонта.

Для выявления поверхностных пороков на заготовках из качественной стали в цехах устанавливают травильные ванны.

Внутренние пороки выявляют при помощи ультразвуковых дефектоскопов. Зачищают заготовки пневматическими зубилами, наждачными кругами и на специальных обдирочных станках. В ряде случаев применяют огневую зачистку.

В качестве примера рассмотрим расположение основного оборудования и технологический процесс прокатки на заготовочном стане трио 800 (рис. 64).

Слитки весом до 1,5 *т* поступают из сталеплавильных цехов на склад, где их подвергают осмотру, а при необходимости — зачистке или обдирке. Нагревают металл в методических нагревательных печах. Наличие нескольких печей позволяет легко маневрировать при переходе на прокатку сталей или сплавов другой группы, требующих иного режима нагрева, и позволяет проводить холодный ремонт печей без остановки стана. Слитки нагревают

до 1200—1250° С, выдают на рольганг и подают к стану, на котором их прокатывают в заготовки сечением 100×100—170×170 *мм*.

Валки рабочей клети — стальные кованые диаметром 830 *мм* и с бочкой длиной 2300 *мм*. Скорость вращения валков 30—60 *об/мин*. Приводятся валки от электродвигателя мощностью 880 *квт* ($n = 250 \div 500$ *об/мин*) через редуктор и маховик диаметром 8 *м* и весом 79 *т*.

Рабочая клеть оборудована с передней и задней сторон подъемно-качающимися столами с приводными роликами. На переднем столе имеется кантовальный аппарат с манипуляторными линейками длиной 3,5 *м*.

Горячую заготовку режут на мерные или кратные длины на ножницах, расположенных в конце транспортного рольганга. Давление ножниц 8 *Мн* (800 *Т*), число резов в минуту три. Для резки заготовки применяют дисковую пилу салазкового типа, которую располагают за ножницами. Упоры у ножниц и пилы позволяют резать раскаты на заготовки длиной 0,5—3,0 *м*, которые затем подают на склад.

В зависимости от марки (группы) стали заготовки охлаждают на воздухе или в колодцах замедленного охлаждения. После охлаждения металл подвергают тщательному осмотру и в случае необходимости подвергают травлению, светлению змейкой и зачистке пневматическими зубилами или наждачными кругами.

Кроме заготовочных станов, стоящих отдельно, обжимные клети трио применяют также в составе сортовых и проволочных станов линейного типа. Эти обжимные клети имеют валки диаметром 450—700 *мм*. В обжимных клетях прокатывают заготовки (очень редко — слитки малого развеса) сечением 125×125—200×200 *мм*.

В зависимости от расположения клетей различают:

1) обжимные клети, расположенные отдельно от остальных клетей стана (мелкосортные, проволочные и среднесортные станы);

2) обжимные клети, расположенные в одной линии с остальными клетями стана (почти все крупносортные и линейные среднесортные станы старого типа).

## 2. КАЛИБРОВКА ВАЛКОВ ЗАГОТОВОЧНЫХ СТАНОВ И ОБЖИМНЫХ КЛЕТЕЙ ТРИО

В заготовочных станах применяют калибры: прямоугольные, ромбические и квадратные. В обжимных клетях трио применяют также стрельчатые и овальные калибры. Специализированные трубозаготовочные станы трио имеют прямоугольные, плоские овальные и круглые калибры.

Рассмотрим расположение и специфические свойства прямоугольных калибров, применяемых на валках клетей трио. В зависимости от расположения на валках прямоугольные калибры делят

на два типа: сопряженные (связанные) калибры и несопряженные (несвязанные) калибры.

Сопряженными называют два калибра клети трио, расположенные на одной вертикали таким образом, что ручей среднего валка является общим для верхнего и нижнего калибров (рис. 65).

Несопряженными называются два калибра клети трио, врезанные самостоятельно на различных вертикалях (рис. 66).

Несопряженные калибры имеют целый ряд преимуществ, основные из которых следующие. Величину верхнего (или нижнего) давления калибровщик может выбрать, исходя только из

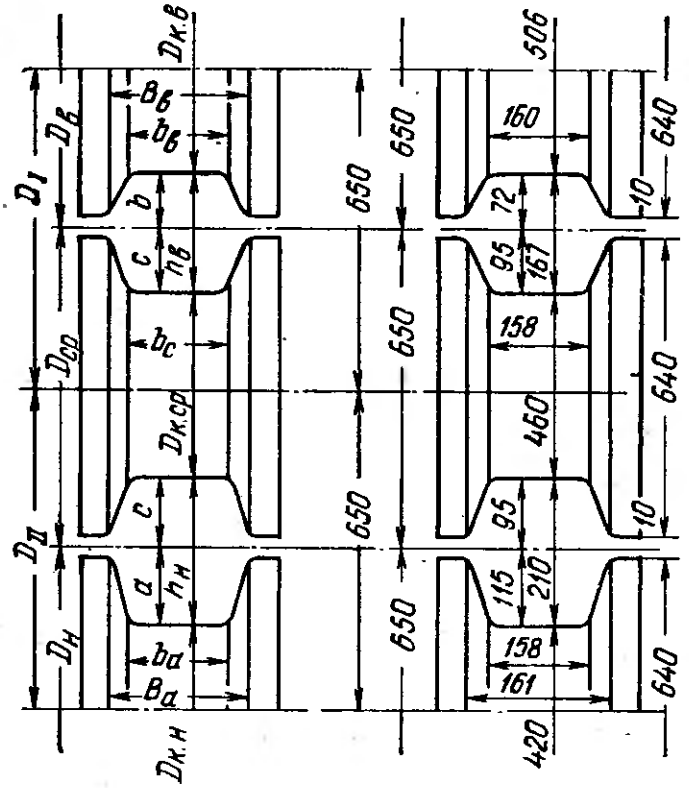
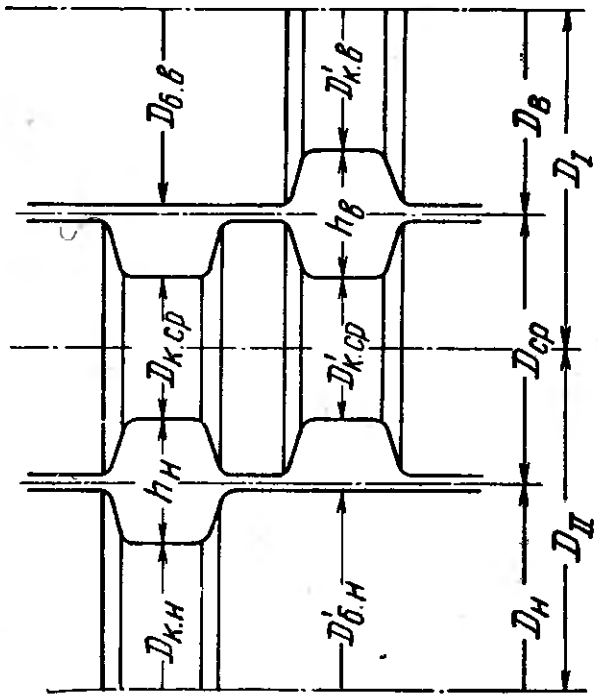



Рис. 65. Расположение сопряженных калибров в валках



Рнс. 66. Несопряженные калнбры и расположение их в валках

требований технологии. Благодаря малым значениям давления (верхнего или нижнего) обеспечиваются небольшая разность окружных скоростей, минимальные внутренние напряжения в металле и устраняется опасность повреждения поверхности прокатываемой полосы. Износ среднего валка соизмерим с износом верхнего и нижнего валков. Несопряженные калибры рассчитывают по описанной выше методике конструирования прямоугольных калибров блюмингов и непрерывных заготовочных станов.

Сопряженные калибры рассчитывают по другой методике. Высокое качество проката можно получить только при правильно сконструированных калибрах, при оптимальных верхнем или нижнем давлении и диаметрах валков. Чем больше разность диаметров валков, тем больше давление, тем больше разность окружных скоростей валков и изгиб полосы. Все это приводит к увеличению скольжения металла по валкам в очаге деформации и яв-

ляется причиной повышенного износа калибров, образования внутренних напряжений и наружных пороков на прокатываемой полосе.

Рассмотрим случай (см. рис. 65), когда имеется три валка с начальными диаметрами $D_в$, $D_{ср}$ и $D_н$. Расстояние между осями пары валков или, что то же — средние диаметры пар валков $D_I$ и $D_{II}$ равны:

$$D_I = \frac{D_в + D_{ср}}{2}; \qquad D_{II} = \frac{D_{ср} + D_н}{2}.$$

Катающие диаметры $D_к$ соответствующих валков

$$D_{к.в} = D_в - 2b; \tag{51}$$

$$D_{к.ср} = D_{ср} - 2c; \tag{52}$$

$$D_{к.н} = D_н - 2a. \tag{53}$$

Рассмотрим связь между средними диаметрами $D_I$ и $D_{II}$, катающими диаметрами $D_{к.в}$, $D_{к.ср}$, $D_{к.н}$ и высотами сопряженных калибров $h_в$ и $h_н$:

$$D_I = \frac{D_{к.в}}{2} + \frac{D_{к.ср}}{2} + h_в, \tag{54}$$

$$D_{II} = \frac{D_{к.ср}}{2} + \frac{D_{к.н}}{2} + h_н.$$

Вычтем последнее выражение из выражения (54):

$$D_I - D_{II} = \frac{D_{к.в}}{2} + \frac{D_{к.ср}}{2} + h_в - \frac{D_{к.ср}}{2} - \frac{D_{к.н}}{2} - h_н$$

или

$$\frac{D_{к.в}}{2} - \frac{D_{к.ср}}{2} + \frac{D_{к.ср}}{2} - \frac{D_{к.н}}{2} = D_I - D_{II} - h_в + h_н;$$

$$D_{к.в} - D_{к.ср} + D_{к.ср} - D_{к.н} = 2(D_I - D_{II}) + 2(h_н - h_в),$$

где $D_{к.в} - D_{к.ср} = \Delta D_{в.п}$ — давление для верхней пары валков;
$D_{к.ср} - D_{к.н} = \Delta D_{н.п}$ — давление для нижней пары валков;
$h_н - h_в = \Delta h_в$ — абсолютное обжатие при подаче полосы из нижнего калибра в верхний.

Итак, получили следующую зависимость для сопряженных калибров:

$$\Delta D_{в.п} + \Delta D_{н.п} = 2(D_I - D_{II}) + 2\Delta h_в, \tag{55}$$

которая показывает, что сумма верхних давлений для сопряженных калибров равняется удвоенной разности средних диаметров каждой пары валков плюс удвоенное абсолютное обжатие при подаче полосы из нижнего калибра в верхний ($h_н > h_в$). Как бы

ни были врезаны сопряженные калибры, при заданных диаметрах валков и абсолютных обжатиях сумма давлений остается постоянной.

Большое верхнее (или нижнее) давление нежелательно, так как в калибре создается большая разность окружных скоростей на верхней и нижней грани полосы.

Скорость валка на верхней грани полосы

$$v_{в} = \frac{\pi D_{к.\,в} n}{60};$$

на нижней

$$v_{ср} = \frac{\pi D_{к.\,ср} n}{60}.$$

Следовательно, в одном калибре разность скоростей составляет

$$v_{в} - v_{ср} = \frac{\pi n}{60} (D_{к.\,в} - D_{к.\,ср}).$$

Для того чтобы избавиться от давления, нужно, чтобы левая часть уравнения (55) была равна нулю:

$$\Delta D_{в} + \Delta D_{н} = 0,$$

т. е.

$$D_{I} - D_{II} + h_{н} - h_{в} = 0$$

или

$$D_{II} - D_{I} = h_{н} - h_{в} = \Delta h.$$

Сумма верхних давлений равна нулю в том случае, когда средний диаметр нижней пары валков больше среднего диаметра верхней пары на величину абсолютного обжатия. Однако этот способ полного устранения верхнего давления приводит к значительной разности начальных диаметров валков и большому перекосу шпинделей. Во избежание большой разности катающих диаметров необходимо глубину вреза ручьев ($a$, $b$, $c$) выбирать таким образом, чтобы сумма верхних давлений распределялась поровну. Это условие выполняется при выборе глубины вреза по следующим формулам:

$$a = 0{,}75h_{н} - 0{,}25h_{в}; \quad (56)$$

$$b = 0{,}75h_{в} - 0{,}25h_{н}; \quad (57)$$

$$c = 0{,}25h_{н} + 0{,}25h_{в}. \quad (58)$$

Указанные величины врезов в валки получаются из следующих условий. Принимаем, что $D_{в} = D_{ср} = D_{н}$, средние диаметры пары валков $D_{II} = D_{I}$ и давления $\Delta D_{в.\,п} = \Delta D_{н.\,п}$.

В этом случае можно написать следующие зависимости:

$$D_{к.ср} - D_{к.н} = h_н - h_в = D_{ср} - 2c - (D_н - 2a);$$

$$h_н - h_в = 2a - 2c;$$

$$h_н = a + c;$$

$$h_в = c + b;$$

$$a = h_н - c;$$

$$h_н - h_в = 2h_н - 2c - 2c;\ 4c = h_н + h_в.$$

Из этих равенств получаем

$$c = \frac{1}{4} h_н + \frac{1}{4} h_в;$$

$$a = \frac{3}{4} h_н - \frac{1}{4} h_в;$$

$$b = \frac{3}{4} h_в - \frac{1}{4} h_н.$$

Необходимо предусматривать малый врез калибров в средний валок. При этом увеличивается срок службы валка, так как при переточке снимается меньший слой металла за счет повышенного уклона боковых стенок ручья. Несимметричный врез калибра устраняет скручивание заготовки при осевом смещении валков.

Задаваясь различными значениями начальных диаметров, можно получить любое верхнее давление для верхней пары валков $\Delta D_{в.п}$ и нижней $\Delta D_{н.п}$ (рис. 67):

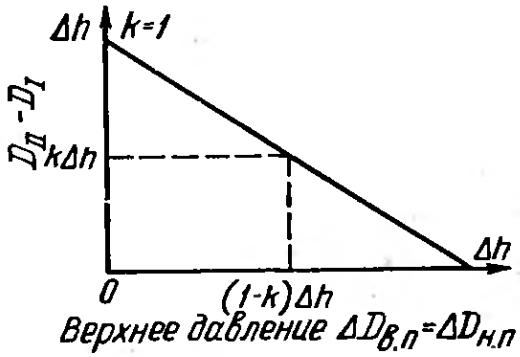


Рис. 67. Зависимость верхнего давления $\Delta D$ от разности средних диаметров валков $D_{II} - D_I$

1) при $D_{II} - D_I = 0$ и $D_н = D_{ср} = D_в$

верхнее давление

$$\Delta D_{в.п} = \Delta D_{н.п} = \Delta h;$$

2) при $D_{II} - D_I = \Delta h$ или $D_н - D_{ср} = D_{ср} - D_в = \Delta h$

верхнее давлеиие

$$\Delta D_{в.п} = \Delta D_{н.п} = 0;$$

3) при $D_{II} - D_I = k\Delta h$, где $k = 1 \div 0$,

верхиее давление

$$\Delta D_{в.п} = \Delta D_{н.п} = (1 - k)\,\Delta h,$$

так как при равенстве верхних давлений

$$2\Delta D = 2\Delta h - 2\,(D_{II} - D_I),$$

$$\Delta D = \Delta h - (D_{II} - D_I) = \Delta h - k\,\Delta h = (1 - k)\,\Delta h.$$

Если имеется несколько пар сопряженных калибров, то устанавливаем среднее обжатие $\Delta h_{ср}$ и разность средних диаметров

$$D_{II} - D_I = k\,\Delta h_{ср}.$$

Приведенные выше выводы основаны на равенстве верхних давлений

$$\Delta D_{в.\,п} = \Delta D_{н.\,п}.$$

Однако на практике часто $\Delta D_{в.\,п} \neq \Delta D_{н.\,п}$ и глубина среза в среднем валке

$$c \neq \frac{h_н + h_в}{4}.$$

Меняя величину среза $c$, можно выравнивать верхнее давление и сводить его к минимальному значению при рациональном выборе начальных диаметров валков с учетом допустимого перекоса их.

Обычно глубина среза $c$ колеблется в широких пределах и составляет

$$c = (0{,}20 \div 0{,}50)\ h_н.$$

Чем меньше срез в среднем валке, тем лучше удерживается полоса в калибре, так как увеличивается глубина среза нижнего и верхнего валков. Можно рекомендовать глубину среза $c = (0{,}25 \div 0{,}35)\ h_н$.

На практике часто принимают начальный диаметр среднего валка меньше начального диаметра верхнего или нижнего валка, что дает возможность сделать более глубокий срез в нижнем валке.

На следующем примере можно видеть, как соответствующим подбором начальных диаметров можно изменить срезы в валки.

Пусть дано $D_н = D_{ср} = D_в = 600$ *мм*.

Для нижнего и верхнего калибров соответственно $h_н = 140$ *мм* и $h_в = 100$ *мм*.

Согласно изложенному, срез в среднем валке равен

$$c = \frac{h_н + h_в}{4} = \frac{240}{4} = 60\ мм.$$

Срез в нижнем валке

$$a = h_н - c = 140 - 60 = 80\ мм,$$

в верхнем валке

$$b = h_в - c = 100 - 60 = 40\ мм.$$

Катающие диаметры:

$$D_{к.в} = 520 \text{ мм}; \; D_{к.ср} = 480 \text{ мм}; \; D_{к.н} = 440 \text{ мм}.$$

Верхнее давление

$$\Delta D_{в.п} = \Delta D_{н.п} = 40 \text{ мм}.$$

Примем другие начальные диаметры:

$$D_н = 650; \; D_{ср} = 550; \; D_в = 650 \text{ мм}.$$

Тогда

$$D_I = \frac{D_в + D_{ср}}{2} = 600 \text{ мм}; \; D_{II} = \frac{D_{ср} + D_н}{2} = 600 \text{ мм}.$$

Если принять меньший врез в среднем валке, например

$$c = 0{,}25h_н = 35 \text{ мм}, \text{ то}$$

$$a = h_н - c = 140 - 35 = 105 \text{ мм};$$

$$b = h_в - c = 100 - 35 = 65 \text{ мм}.$$

Получим следующие катающие диаметры:

$$D_{к.в} = D_в - 2b = 650 - 130 = 520 \text{ мм};$$

$$D_{к.ср} = D_{ср} - 2c = 550 - 70 = 480 \text{ мм};$$

$$D_{к.н} = D_н - 2a = 650 - 210 = 440 \text{ мм}.$$

В этом случае верхнее давление получилось одинаковым для обеих пар валков:

$$\Delta D_{в.п} = \Delta D_{н.п} = 40 \text{ мм},$$

но величины врезов будут более благоприятные.

Следует отметить, что в общем виде глубина среза в среднем валке равна

$$c = \frac{h_н + h_в + D_{ср} - 0{,}5(D_н + D_в)}{4} =$$

$$= \frac{140 + 100 + 550 - 0{,}5(650 + 650)}{4} = 35 \text{ мм}.$$

Последняя формула получается аналогично выводу, который был дан выше для врезов $c$, $a$ и $b$ при разных начальных диаметрах валков. При наличии разных начальных диаметров и одинаковых верхних давлениях можно записать равенство

$$\Delta D_{н.п} = D_{к,ср} - D_{к.н} = h_н - h_в + D_I - D_{II},$$

так как ранее приняли, что

$$\Delta D_{в.п} = \Delta D_{н.п}.$$

Кроме того,

$$D_I - D_{II} = \frac{D_в + D_{ср}}{2} - \frac{D_{ср} + D_н}{2} = 0{,}5\,(D_в - D_н),$$

поэтому

$$h_н - h_в = D_{ср} - 2c - D_н + 2a + 0{,}5\,(D_н - D_в) =$$
$$= 2a - 2c + D_{ср} - 0{,}5\,(D_н + D_в);$$
$$a = h_н - c;$$
$$h_н - h_в = 2h_н - 2c - 2c + D_{ср} + 0{,}5\,(D_н + D_в),$$

откуда врез в средний валок равен

$$c = \frac{h_н + h_в + D_{ср} - 0{,}5\,(D_н + D_в)}{4}. \qquad (59)$$

Врезы в нижний и верхний валки равны:

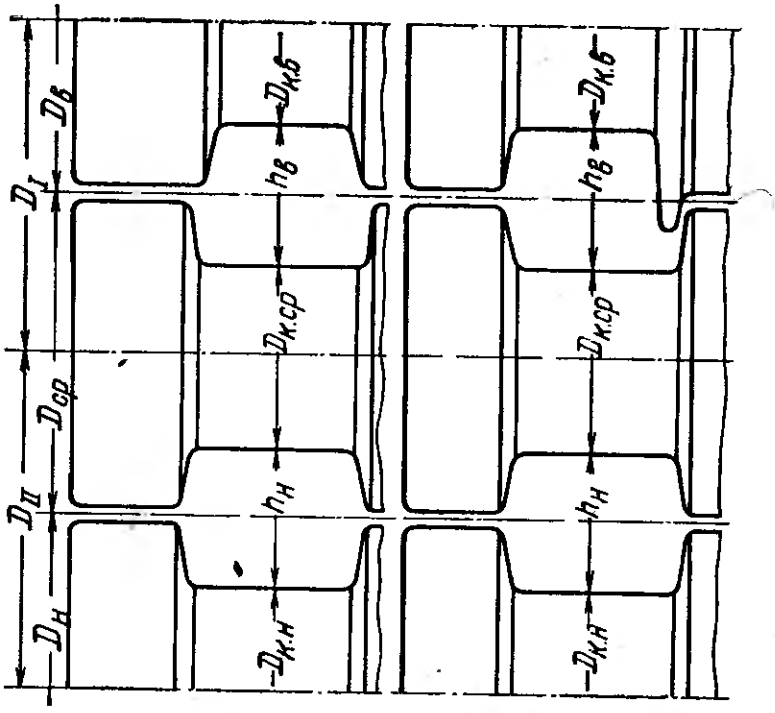



Рис. 68. Сопряженные калибры одинаковой высоты

$$a = h_н - c;\ b = h_в - c.$$

Из формулы (59) видно, что с уменьшением $D_{ср}$ и увеличением $D_н$ и $D_в$ величина среза в средний валок $c$ уменьшается.

Если нужно уменьшить верхнее давление, то необходимо $D_{II}$ сделать больше $D_I$, т. е. начальный диаметр $D_н$ должен быть больше $D_в$, а начальный диаметр среднего валка $D_{ср}$ меньше начальных диаметров верхнего и нижнего валков.

Чтобы избавиться от большого верхнего давления, можно также изменить размеры калибров (рис. 68) и порядок прокатки. В этом случае высота нижнего калибра равна высоте верхнего. Ширина верхнего калибра меньше, чем нижнего. Раскат перед задачей в верхний калибр необходимо кантовать на 90°. Недостаток этого способа заключается в том, что применение кантовки с задней стороны увеличивает паузу (снижает производительность), утяжеляет условия работы и затрудняет полную механизацию стана.

Систему вытяжных калибров ромб—квадрат, так же как и на непрерывных заготовочных станах, на клетях трио применяют начиная с сечения 120×120—100×100 *мм*. Эти калибры — несопряженные и расчет их не вызывает затруднений.

Для улучшения качества поверхности легированной стали вместо обычных калибров иногда применяют ромбические калибры, близкие по форме к квадратным, но с утолщениями по краям (рис. 69). Утолщенные края полосы позволяют лучше сохранять

температуру металла, чем у обычной ромбической полосы с острыми углами. Полоса в таком калибре прокатывается устойчиво, захват металла валками улучшается. Захват полосы после кантовки в следующем квадратном калибре также улучшается, так как при одинаковых площадях поперечного сечения высота полосы с утолщениями меньше. Наконец, в результате лучшего сохранения температуры металла повышается стойкость валков

Методики расчета калибровки валков заготовочных стаиов и обжимных клетей трио одинаковые.

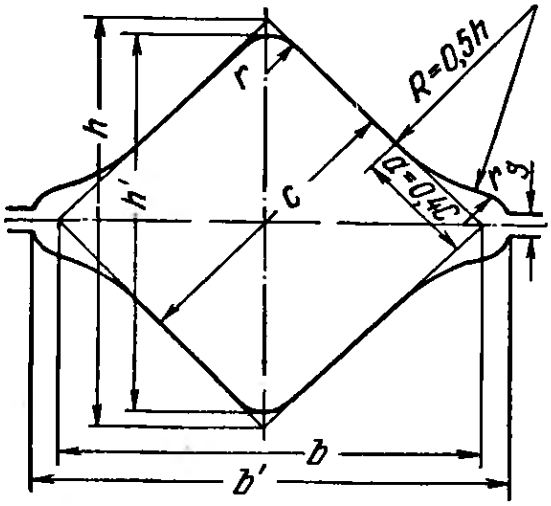



Рис. 69. Построение ромбического калибра с увеличенным раскрытием для прокатки качественной стали

## Примерный расчет калибровки валков обжимной клети трио

### *Исходные данные*

Начальный диаметр валков стана $D = 650$ *мм*, $n = 75$ *об/мин*. Валки стальные. Сечение блюма $240 \times 240$ *мм*. Конечное сечение заготовки $110 \times 110$ *мм*.

Размеры ящичных калибров рассчитываем по максимальным углам захвата, пользуясь графиком зависимости угла $\alpha$ от скорости прокатки (см. рис. 45). При расчете высоты калибра по углу захвата исходим из минимального диаметра валков.

Уширение рассчитываем по начальному диаметру.

Принимаем среднюю высоту калибра равной

$$h_{к.\,ср} = 150 \text{ мм}.$$

Диаметр валка с учетом переточек

$$D_{min} = 600 \text{ мм}.$$

Средний катающий диаметр равен

$$D_{к.\,ср} = D_{min} - h_{н.\,ср} = 600 - 150 = 450 \text{ мм}.$$

Средняя окружная скорость валков

$$v = \frac{\pi D_{к.\,ср} n}{60} = \frac{3{,}14 \cdot 0{,}45 \cdot 75}{60} = 1{,}77 \text{ м/сек}.$$

Допустимый угол захвата (см. рис. 45)

$$\alpha = 26 \div 27°.$$

*Первый проход*

Размеры задаваемой заготовки

$$b_0 = h_0 = 240 \text{ мм}.$$

Угол захвата принимаем

$$\alpha_1 = 26^\circ;\ \cos\alpha = 0{,}899.$$

Высоту выходящей полосы можно определить из выражения

$$h_0 - h_1 = (D_{\min} - h_1)(1 - \cos\alpha_1),$$

откуда

$$h_1 = \frac{h_0 - D_{\min}(1 - \cos\alpha)}{\cos\alpha},$$

тогда

$$h_1 = \frac{240 - 600(1 - 0{,}899)}{0{,}899} = 200 \text{ мм}.$$

Обжатие в первом проходе

$$\Delta h_1 = 240 - 200 = 40 \text{ мм}.$$

Катающий диаметр $D_к = D - h$, откуда

$$D_{к1} = 650 - 200 = 450 \text{ мм}.$$

Уточняем угол захвата:

$$\alpha = \arccos\left(1 - \frac{\Delta h}{D_к}\right);$$

$$\alpha = \arccos\left(1 - \frac{40}{450}\right) = 24^\circ 15';$$

$$\alpha = 0{,}392 \text{ рад}.$$

Уширение составляет

$$\Delta b_1 = \frac{2 \cdot 44 \cdot 40}{(240 + 200)\left[1 + 1{,}392\left(\frac{244}{225 \cdot 0{,}392}\right)^2\right]} = 3{,}82 \approx 4 \text{ мм}.$$

Ширина раската

$$b_1 = b_0 + \Delta b_1 = 240 + 4 = 244 \text{ мм}.$$

Коэффициент вытяжки

$$\mu_1 = \frac{h_0 b_0}{h_1 b_1} = \frac{240 \cdot 240}{200 \cdot 244} = 1{,}18.$$

*Второй проход*

Размеры задаваемой заготовки: $h_1 = 200$ *мм*; $b_1 = 244$ *мм*.

Угол захвата

$$\alpha_2 = 26°.$$

Высота выходящей полосы

$$h_2 = \frac{200 - 600\,(1 - 0{,}899)}{0{,}899} = 156 \text{ мм}.$$

Обжатие

$$\Delta h_2 = 200 - 156 = 44 \text{ мм}.$$

Катающий диаметр

$$D_{к2} = 650 - 156 = 494 \text{ мм}.$$

Уточняем угол захвата

$$\alpha_2 = \arccos\left(1 - \frac{44}{494}\right) = 24° 15';$$

$$\alpha_2 = 0{,}392 \text{ рад}.$$

Уширение

$$\Delta b_2 = \frac{2 \cdot 246 \cdot 44}{(200 + 156)\left[1 + 1{,}392\left(\frac{246}{247 \cdot 0{,}392}\right)^2\right]} = 6{,}1 \approx 6 \text{ мм}.$$

Ширина полосы

$$b_2 = 244 + 6 = 250 \text{ мм}.$$

Коэффициент вытяжки

$$\mu_2 = \frac{200 \cdot 244}{156 \cdot 250} = 1{,}25.$$

После кантовки раскат задают в нижний третий калибр второй пары сопряженных калибров.

Аналогично рассчитывают и остальные калибры. Результаты расчета приведены в табл. 34.

Как видно из табл. 34, задаемся углом захвата $\alpha = 26°$ в калибрах *III* и *IV*, а затем определяем обжатие, уширение и размеры раската $h$ и $b$.

По калибровке предусмотрено два последних калибра — ромб и квадрат, чтобы получить заготовку сечением $110 \times 110$ *мм*. Всего должно быть нечетное число проходов, следовательно, ящичный квадрат должен быть в нечетном проходе, однако в 5-м проходе его получить не представляется возможным, поэтому предусматривают семь ящичных калибров. В калибрах *V* и *VI* приходится давать уменьшенные обжатия.

Допустимое обжатие по углу захвата $\Delta h = 40$ *мм* разбиваем на два обжатия по 20 *мм*. После 6-го прохода имеется кантовка,

Таблица 34

**Результаты расчета прямоугольных калибров валков обжимной клети трио ($D = 650$ мм)**

| Номер калибра | Принимаемый $\alpha$ | Высота выходящей полосы $h$ (по формуле *), мм | $b' = b + \Delta b$; $b' = h' + \Delta b$, мм | $\Delta h = h' - h$; $\Delta h = b' - h$, мм | $D_к = D - h = 650 - h$, мм | $\alpha = \arccos\left(1 - \frac{\Delta h}{D_к}\right)$ | | Уширение $\Delta b$, мм, рассчитанное по формуле (1) | $\mu = \frac{h'b'}{hb}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | град. — мин. | рад. | | |
| Заготовка | | 240 | 240 | — | — | — | — | — | — |
| *I* | 26° | 200 | 244 | 40 | 450 | 24—15 | 0,392 | 4 | 1,18 |
| *II* | 26° | 156 | 250 | 44 | 494 | 24—15 | 0,392 | 6 | 1,25 |
| | | | Кантовка | | | | | | |
| *III* | 26° | 210 | 161 | 40 | 440 | 24—30 | 0,428 | 5 | 1,15 |
| *IV* | 26° | 167 | 168 | 43 | 483 | 24—15 | 0,392 | 7 | 1,20 |
| | | | Кантовка | | | | | | |
| *V* | — | 148 | 170 | 20 | 502 | 16—15 | 0,284 | 3 | 1,12 |
| *VI* | — | 128 | 173 | 20 | 522 | 16—00 | 0,27 | 3 | 1,14 |
| | | | Кантовка | | | | | | |
| *VII* | — | 135 | 135 | 38 | 515 | 22—00 | 0,38 | 7 | 1,22 |

Примечание. После кантовки соответственно $b'$ — высота и $h'$ — ширина задаваемого раската.

* $h = \frac{h' - D_{min}(s - \cos\alpha)}{\cos\alpha}$

из 7-го прохода выходит раскат 135×135 *мм*, который по допускаемым вытяжкам и обжатиям вполне подходит для дальнейшей прокатки его в 8-м ромбическом и 9-м квадратном калибрах.

*Восьмой и девятый проходы*

Размеры задаваемой полосы:

$$h_8 = b_8 = 1{,}41c_7 = 1{,}41 \cdot 135 = 190 \text{ мм}.$$

Размеры выходящей полосы

$$h_9 = b_9 = 1{,}41 \cdot c_9 = 1{,}41 \cdot 110 = 155 \text{ мм}.$$

Общий коэффициент вытяжки в ромбе и квадрате

$$M_{8,9} = \frac{135 \cdot 135}{110 \cdot 110} = 1{,}51.$$

Частные коэффициенты вытяжки

$$\mu_8 = \mu_9 = \sqrt{M_{8,9}} = \sqrt{1{,}51} = 1{,}23.$$

Уширение ромбической полосы в квадратном калибре определим по графикам, приведенным на рис. 54 и 55, откуда $\Delta b_9 = 11$ *мм*.

Высота ромба

$$h_8 = b_9 - \Delta b_9 = 155 - 11 = 144 \text{ мм}.$$

Площадь поперечного сечения ромба

$$q_8 = q_9\mu_9 = 110 \cdot 110 \cdot 1{,}23 = 14\,900 \text{ мм}^2.$$

Ширина ромба

$$b_8 = \frac{2q_8}{h_8} = \frac{2 \cdot 14\,900}{144} = 206 \text{ мм}.$$

Обжатие за восьмой проход

$$\Delta h_8 = H_8 - h_8 = 190 - 144 = 46 \text{ мм}.$$

Катающий диаметр

$$D_{к8} = 650 - 144 = 506 \text{ мм}.$$

Угол захвата

$$\alpha_8 = \arccos\left(1 - \frac{46}{506}\right) = 24^\circ 37'.$$

Обжатие за девятый проход

$$\Delta h_9 = b_8 - h_9 = 206 - 155 = 51 \text{ мм}.$$

Катающий диаметр

$$D_{к9} = 650 - 155 = 495 \text{ мм}.$$

Угол захвата

$$\alpha_з = \arccos\left(1 - \frac{51}{495}\right) = 26°\,38'.$$

Полученные расчетные данные приведены в табл. 35.

Таблица 35

**Калибровка валков обжимной клети трио 650**

| Номер прохода | Форма калибра | Размеры, *мм* | | Обжатие $\Delta h$, *мм* | Уширение $\Delta b$, *мм* | Катающий диаметр $D_к$, *мм* | Угол захвата $\alpha$ | Коэффициент вытяжки |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $h$ | $b$ | | | | | |
| | Заготовка . . . . . | 240 | 240 | — | — | — | — | — |
| 1 | Ящичный . . . . . | 200 | 244 | 40 | 4 | 450 | 24° 15′ | 1,18 |
| 2 | » . . . . . | 156 | 250 | 44 | 6 | 494 | 24° 15′ | 1,25 |
| 3 | » . . . . . | 210 | 161 | 40 | 5 | 440 | 24° 30′ | 1,15 |
| 4 | » . . . . . | 167 | 168 | 43 | 7 | 483 | 24° 15′ | 1,20 |
| 5 | » . . . . . | 148 | 169 | 20 | 2 | 502 | 16° 15′ | 1,12 |
| 6 | » . . . . . | 129 | 171 | 19 | 2 | 521 | 15° 30′ | 1,13 |
| 7 | » . . . . . | 135 | 135 | 36 | 6 | 515 | 21° 33′ | 1,21 |
| 8 | Ромб . . . . . | 144 | 206 | 46 | 16 | 506 | 24° 37′ | 1,23 |
| 9 | Квадрат . . . . . | 155 | 155 | 51 | 11 | 495 | 26° 38′ | 1,23 |

## Построение сопряженных калибров

Прежде чем расположить калибры на валках стана трио 650 *мм*, необходимо установить начальные диаметры и верхнее давление $\Delta D$.

Если по нашей калибровке принять среднее обжатие $\Delta h_{ср} \approx \approx 40$ *мм*, то для уменьшения верхнего давления примем $D_{II} - D_I = 20$ *мм*, следовательно:

$$\Delta D_{в.п} = \Delta D_{н.п} = \Delta h_{ср} - (D_{II} - D_I) = 40 - 20 = 20 \text{ мм}.$$

В нашем случае принимаем

$$D_{II} - D_I = 660 - 640 = 20 \text{ мм}.$$

Кроме того, для уменьшения вреза в средний валок принимаем начальный диаметр среднего валка меньше начальных диаметров верхнего и нижнего валков. Принимаем окончательно следующие начальные диаметры валков:

$$D_в = 660 \text{ мм};\ D_{ср} = 620 \text{ мм};\ D_н = 700 \text{ мм}.$$

Средние диаметры валков:

$$D_I = \frac{D_в + D_{ср}}{2} = \frac{660 + 620}{2} = 640 \text{ мм}.$$

$$D_{II} = \frac{D_{ср} + D_н}{2} = \frac{620 + 700}{2} = 660 \text{ мм}.$$

Определим врез в средний валок для первой пары сопряженных калибров высотой $h_1 = 200$ *мм* и $h_2 = 156$ *мм*.

Глубина среза в средний валок равна

$$c_1 = \frac{h_1 + h_2 + D_{ср} - 0{,}5\,(D_н + D_в)}{4} =$$

$$= \frac{200 + 156 + 620 - 0{,}5\,(700 + 660)}{4} = 74 \text{ мм}.$$

Глубина среза в нижний и верхний валки

$$a_1 = h_1 - c_1 = 200 - 74 = 126 \text{ мм};$$

$$b_2 = h_2 - c_1 = 156 - 74 = 82 \text{ мм}.$$

Катающие диаметры

$$D_{к.в} = 660 - 2 \cdot 82 = 496 \text{ мм};$$

$$D_{к.ср} = 620 - 2 \cdot 74 = 472 \text{ мм};$$

$$D_{к.н} = 700 - 2 \cdot 126 = 448 \text{ мм}.$$

Верхнее давление нижней пары валков

$$\Delta D_{н.п} = 472 - 448 = 24 \text{ мм};$$

верхней пары

$$\Delta D_{в.п} = 496 - 472 = 24 \text{ мм}.$$

Обжатие для первой пары валков

$$\Delta h_2 = h_1 - h_2 = 200 - 156 = 44 \text{ мм}.$$

Разность средних диаметров

$$D_{II} - D_I = 20 \text{ мм}.$$

Следовательно, верхнее давление нижней и верхней пары валков

$$\Delta D_{н.п} = \Delta D_{в.п} = 44 - 20 = 24 \text{ мм},$$

т. е. расчеты сделаны правильно.

Катающие диаметры для несопряженного калибра *VII* определим, задавшись величиной верхнего давления.

Принимаем

$$\Delta D_к = D_{к.ср} - D_{к.н} = 10 \text{ мм}.$$

Из рис. 65 видно, что

$$D_{II} = \frac{D_{к.ср}}{2} + \frac{D_{к.н}}{2} + h_7$$

или $$D_{\text{п}} = \frac{D_{\text{к. и}}}{2} + \frac{\Delta D_{\text{к}}}{2} + \frac{D_{\text{к. и}}}{2} + h_7;$$

$$D_{\text{п}} = D_{\text{к. и}} + \frac{\Delta D_{\text{к}}}{2} + h_7;$$

откуда $$D_{\text{к. и}} = D_{\text{п}} - \frac{\Delta D_{\text{к}}}{2} - h_7; \qquad (60)$$

$$D_{\text{к. и}} = 660 - 5 - 135 = 520 \text{ мм};$$

$$D_{\text{к. ср}} = 520 + 10 = 530 \text{ мм};$$

$$D_{\text{к7}} = \frac{D_{\text{к. и}} + D_{\text{к. ср}}}{2} = \frac{520 + 530}{2} = 525 \text{ мм}.$$

Выпуск калибра в нижнем валке делают равным 10—15% от глубины вреза. Ширину калибра у основания нижнего валка $b_{\text{н}}$ принимают равной высоте предыдущего калибра. Ширину ручья у основания среднего валка $b_{\text{ср}}$ принимают на 2—3 *мм* больше, чем у нижнего валка. Ширину ручья у основания верхнего валка $b_{\text{в}}$ принимают на 2—3 *мм* больше, чем у среднего валка.

Стрела выпуклости дна черновых калибров должна составлять 1—3 *мм*. Радиусы закругления внутренних углов принимают в пределах 10—20% от ширины калибра. Радиусы закругления буртов обычно принимают на 5 *мм* меньше радиусов закругления внутренних углов калибра.

Задавшись определенным верхним давлением, размещают ромбический и квадратный калибры, которые являются несопряженными.

В качестве примера рассмотрим несколько заводских калибровок валков заготовочных станов и обжимных клетей трио. Причем особое внимание уделим выбору углов захвата.

Допустимый угол захвата зависит от коэффициента трения металла о валки и степени загрубления поверхности валков при применении насечки и наварки.

На основании анализа литературных и практических данных можно выбирать предельные углы захвата в клетях трио в зависимости от скорости прокатки и состояния поверхности валков (табл. 36).

На рис. 70 приведена действующая калибровка обжимного стана трио 850. Начальные диаметры верхнего и среднего валков

Таблица 36

**Предельные углы захвата, град., в клетях трио**

| Поверхность бочки валка | Скорость прокатки, *м/сек* | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 1,0 | 1,5 | 2,0 | 2,5 | 3,0 |
| С насечкой | 33 | 31 | 29 | 27 | 25 |
| Без насечки | 29 | 27 | 25 | 23 | 21 |

почти одинаковы, начальный диаметр нижнего валка значительно больше. Благодаря этому в четырех калибрах нижнего горизонта можно получить нулевое давление, а в трех остальных калибрах —

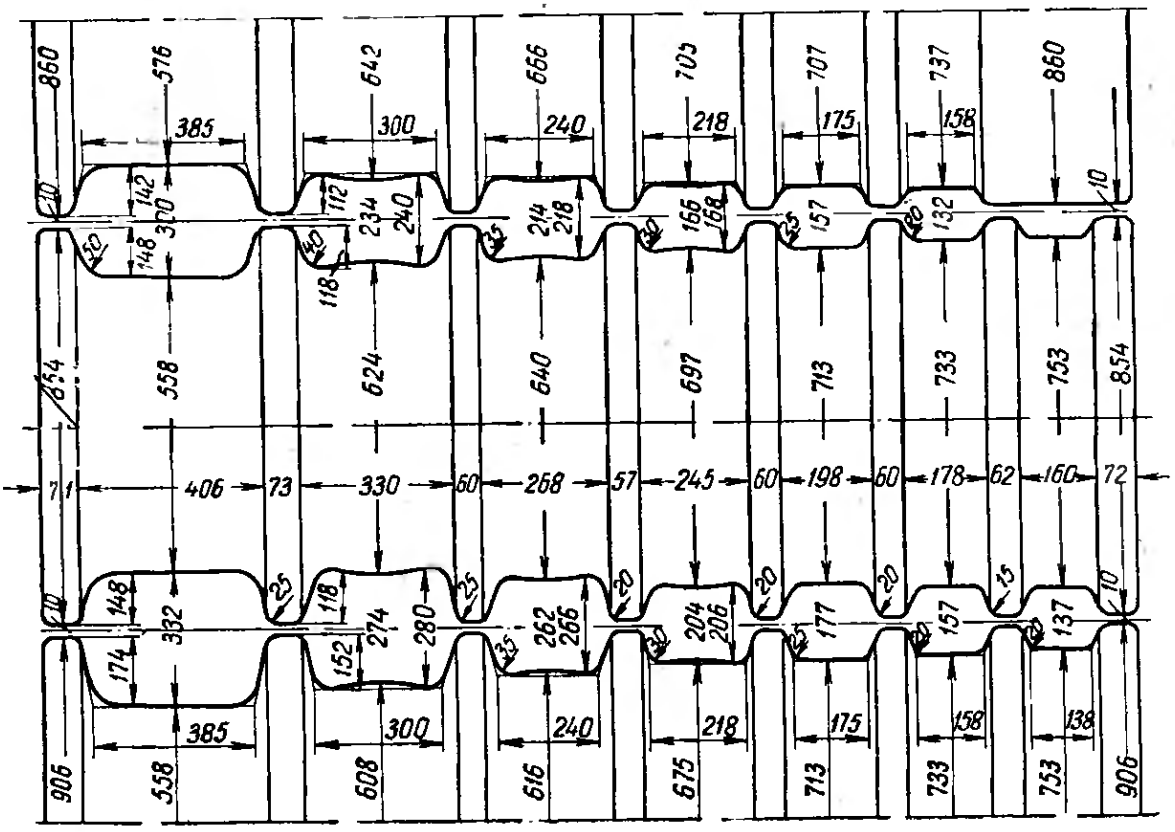



Рис. 70. Калибровка валков обжимной клети трио 850

верхнее давление, равное 16—24 *мм*. В шести калибрах верхнего горизонта верхнее давление составляет 4—26 *мм*.

Во всех калибрах, кроме последнего, прокатку ведут с ограниченным уширением: ширина задаваемой полосы равна ширине дна калибра. Простор на уширение в калибре получают за счет

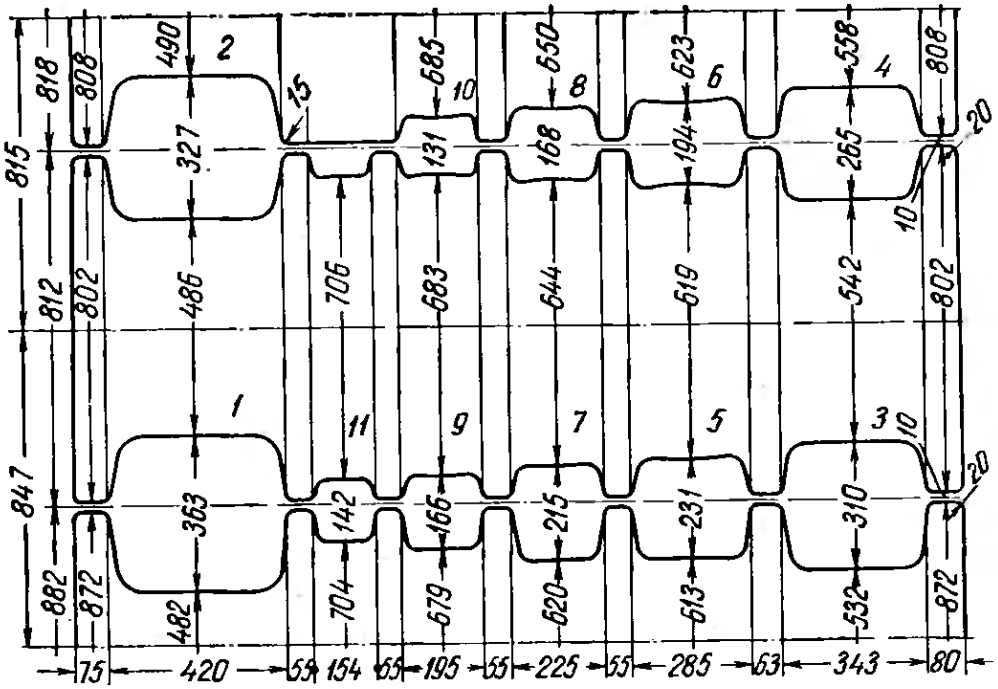



Рис. 71. Калибровка валков обжимной клети трио 800

выпусков и выпуклости дна предыдущего калибра. В последнем калибре *XI* прокатку производят со свободным уширением.

Калибровка валков обжимного стана трио 800 приведена на рис. 71. Как и в предыдущей калибровке, здесь все калибры прямоугольные, но расположены иначе. Первые две пары калибров, имеющие наибольшую глубину вреза, расположены на противоположных концах бочки валков. Такое расположение способ-

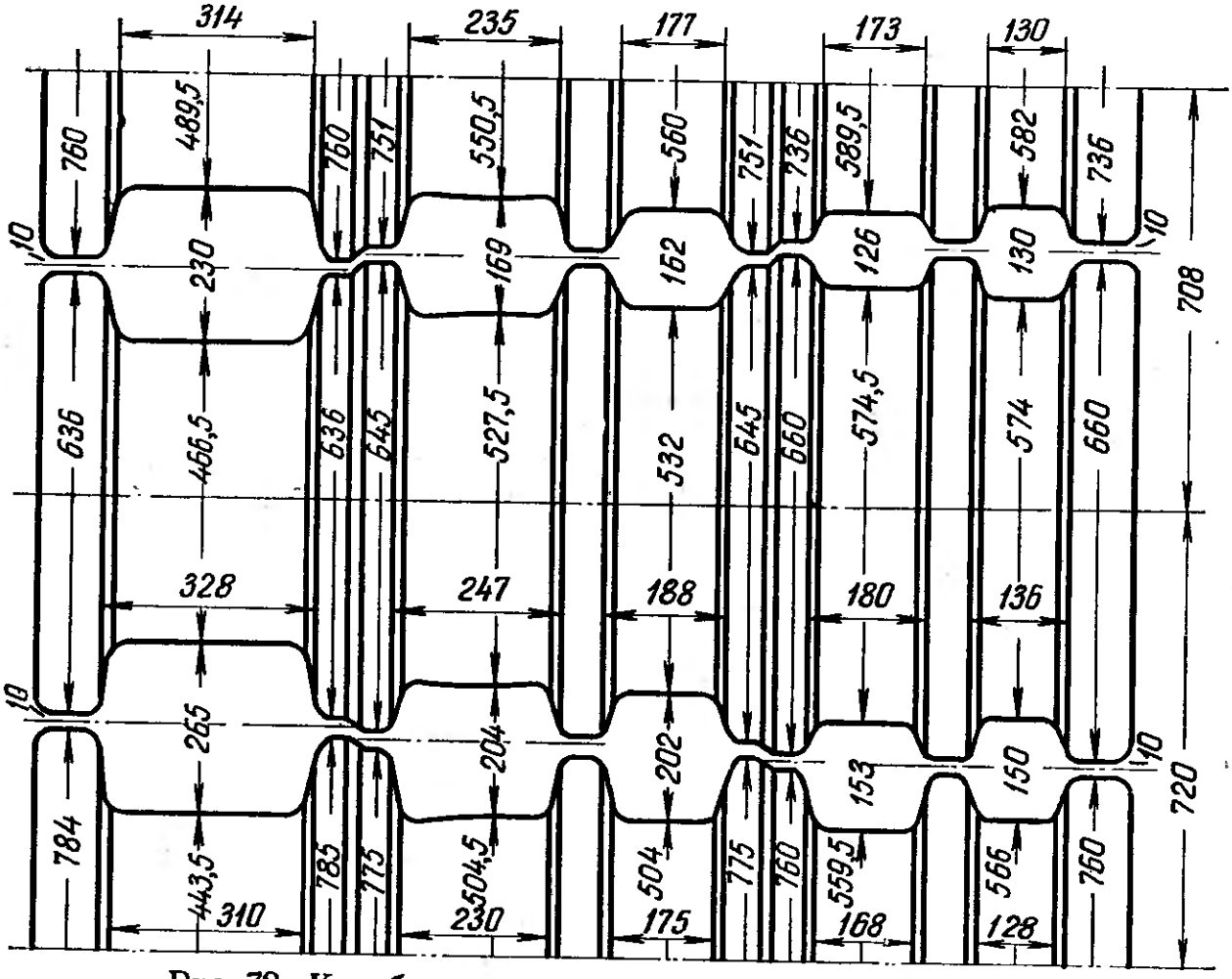



Рис. 72. Калибровка валков обжимной клети трио 700

ствует повышению прочности валков, однако при этом увеличивается время перемещения раската из калибра *II* в калибр *III*.

В приведенной калибровке средний диаметр верхней пары валков (815 *мм*) также меньше среднего диаметра нижней пары (847 *мм*). Во всех калибрах предусмотрено верхнее давление в пределах 2—22 *мм*.

На рис. 72 приведена калибровка валков заготовочного стана трио 700, состоящая из прямоугольных сопряженных калибров. Средний валок имеет меньший диаметр (636—660 *мм*), чем верхний (760—736 *мм*) и нижний (784—760 *мм*).

Верхние давления пары сопряженных калибров одинаковые и изменяются в пределах 8—28 *мм*. Чтобы верхние давления не превышали допустимых значений, сопряженные калибры располагают уступами на нескольких уровнях. Стремятся получать верхнее давление не более 3% от диаметра валков.

Глава V

# ПРОКАТКА И КАЛИБРОВКА КРУГЛОЙ СТАЛИ

## 1. СПОСОБЫ ПРОКАТКИ И КАЛИБРОВКИ КРУГЛОЙ СТАЛИ

Прокатные станы, на которых прокатывают сортовой и фасонный прокат, бывают следующих типов:

1) проволочные станы с валками диаметром $D = 250 \div 300$ *мм*;
2) мелкосортные станы ($D = 250 \div 350$ *мм*);
3) полосовые и штрипсовые станы ($D = 300 \div 450$ *мм*);
4) среднесортные станы ($D = 400 \div 550$ *мм*);
5) крупносортные станы ($D = 600 \div 750$ *мм*);
6) рельсобалочные станы ($D = 750 \div 900$ *мм*).

Следует отметить, что на сортовых станах нового типа устанавливают валки меньшего диаметра, чем на станах линейного типа. Например, шахматный стан 350 можно отнести по прокатываемому сортаменту к среднесортным станам, а зигзагообразный стан 500 — к крупносортным.

Сортовые станы (мелкосортные, среднесортные и крупносортные) старого типа имеют линейное расположение — в одну две и больше линий.

Мелкосортные станы 250, 300 и 350 нового типа являются непрерывными и состоят из двух или трех групп — черновой и чистовой или еще промежуточной.

На мелкосортных станах 250 Криворожского, Западно-Сибирского и Череповецкого заводов в черновых группах клетей прокатку ведут в две нитки, поэтому эти станы имеют по две чистовые группы.

Наиболее совершенными станками являются непрерывные мелкосортные станы 250 для бесконечной прокатки, которые установлены на Западно-Сибирском и Криворожском заводах. На этих станах заготовки сечением $80 \times 80$ *мм* и длиной 12 *м* сваривают встык на стыкосварочных машинах так, что на стане ведут прокатку бесконечной полосы. Этим обеспечивается высокая скорость прокатки (до 20 *м/сек* и выше), меньшие расходные коэффициенты и большая производительность стана — до 900 тыс. *т* в год.

Сортовые и проволочные станы детально описаны в работах [3, 26—32].

Согласно ГОСТ 2590—57, круглую сталь прокатывают диаметром 5—250 *мм*. На прокатных станах прокатывают круги боль-

шего диаметра, до 300 *мм*, например трубную заготовку (по ТУ). Круглая сталь диаметром 5—9 *мм*, сматываемая в мотки, называется проволокой (катанкой).

Допускаемые отклонения по диаметру, согласно ГОСТ, например, для стали диаметром 20 *мм* составляют +0,4 и —0,5 *мм* при обычной точности прокатки и +0,2 и —0,4 *мм* при повышенной точности. Для наибольшего диаметра круга 250 *мм* отклонение составляет +1,2 и —3,0 *мм*.

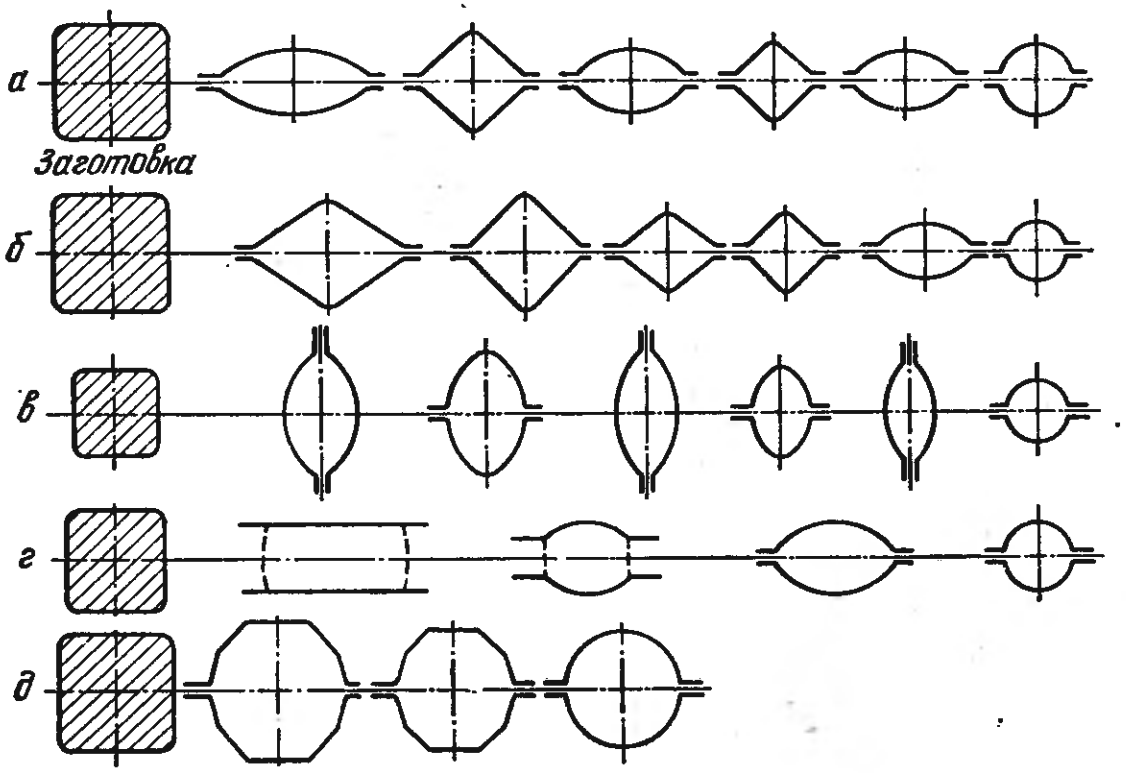



Рис. 73. Схемы прокатки круглой стали с применением различных систем калибров:

*а* — овал—квадрат; б — ромб—квадрат; *в* — овал—ребровый овал; *г* — система универсальных калибров; *д* — с применением десятигранных калибров

В зависимости от размеров профилей, качества стали, типа стана и других факторов применяют различные способы прокатки круглой стали, наиболее распространенные из которых приведены на рис. 73.

На рис. 73, *а* приведена схема прокатки круглой стали по системе овал—квадрат в черновых калибрах, после которых полоса поступает в предчистовой квадрат и далее в предчистовой овал и чистовой круг.

Способ прокатки по системе овал—квадрат широко применяют при прокатке проволоки на линейных и непрерывных проволочных станах, а также при прокатке кругов диаметром 10—30 *мм* на мелкосортных станах линейного типа.

Как указывалось в гл. I, система черновых калибров овал—квадрат характеризуется большими коэффициентами вытяжки, что имеет значение при прокатке мелкосортных профилей. В тех случаях, когда по условиям прокатки применяются меньшие вытяжки,

в качестве вытяжных калибров можно использовать систему ромб—квадрат. Поэтому на линейных среднесортных станах, на которых прокатывают круги диаметром от 30 *мм* и выше, применяют эту систему (рис. 73, *б*).

При прокатке кругов применяют также и смешанную систему черновых калибров — сочетание систем ромб—квадрат и овал—квадрат.

На непрерывных мелкосортных станах при прокатке круглой и квадратной стали широко применяют черновые калибры системы овал—ребровый овал (рис. 73, *в*). В случае прокатки в калибрах этой системы отпадает необходимость в кантовке при задаче раската из клети в клеть. Хотя при прокатке по этой системе применяют небольшие вытяжки — порядка 1,3—1,4, однако такие вытяжки на непрерывных станах, особенно в чистовой группе, вполне обеспечивают получение круглых профилей различных размеров.

На рис. 73, *г* приведена универсальная калибровка, применяющаяся при прокатке круглых профилей из качественной стали. При прокатке по этой системе соблюдают определенное чередование калибров: раскат квадратного сечения прокатывают в гладких валках, далее после кантовки его задают в ребровый калибр и затем в предчистовой овал и чистовой круг. При прокатке кругов различного диаметра зазор между валками меняется, поэтому в одних и тех же калибрах можно прокатывать различные сечения.

При этой калибровке число перевалок, а, следовательно, и парк валков значительно сокращаются. Наличие больших зазоров на гладкой бочке и в ребровом калибре обеспечивает хорошее удаление окалины, сам раскат не имеет острых углов, что положительно влияет на качество поверхности готового профиля.

При прокатке кругов диаметром 100—300 *мм* часто применяют систему десятигранных калибров (рис. 73, *д*). Существуют и другие схемы прокатки круглой стали. Так, например, для прокатки проволоки в последних клетях применяют систему овал—круг, что позволяет в случае перехода на прокатку проволоки большего диаметра отключать последние две клети с предчистовыми овалами и чистовыми кругами меньшего диаметра.

Применяют также разновидность универсальной калибровки, когда ребровый калибр представляет собой ящичный квадрат. Круги большого размера прокатывают также в системе прямоугольных калибров с большим наклоном боковых граней, например на трубозаготовочном стане.

## 2. МЕТОД РАСЧЕТА КАЛИБРОВКИ КРУГЛОЙ СТАЛИ

При расчете калибровки круглой стали необходимо иметь исходные данные: характеристику стана, размеры исходной заготовки или число проходов.

Ход расчета калибровки следующий.

1. Прежде всего устанавливаем систему черновых калибров в зависимости от типа стана (линейный или непрерывный) и размеров прокатываемого круга.

2. Расчет ведем против хода прокатки, начиная с чистового круга, размеры которого определяем с учетом принятых допусков и температуры конца прокатки. Полученные горячие размеры круга являются исходными величинами для дальнейшего расчета.

3. Задаваясь коэффициентами вытяжки в чистовом круге и предчистовом овале, находим площади предчистового овала и предчистового квадрата. Коэффициенты вытяжки в чистовом и предчистовом калибрах определяем на основе практических данных (рис. 74). Как видно из рис. 74, коэффициент вытяжки изменяется в пределах $\mu = 1{,}1 \div 1{,}2$ в чистовом круге и $\mu = 1{,}18 \div 1{,}28$ в предчистовом овале.

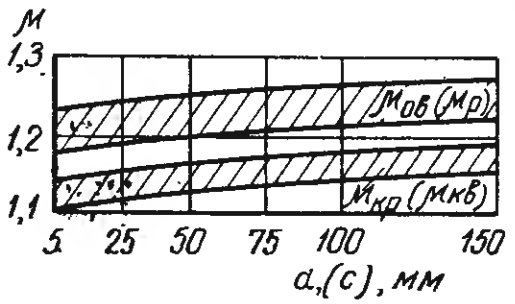



Рис. 74. Зависимость коэффициентов вытяжки в чистовом круге и предчистовом овале, а также в чистовом квадрате и предчистовом ромбе от диаметра круга $d$ или стороны квадрата $c$

4. Определив по графикам или формуле уширение в чистовом круге, находим размеры предчистового овала. По площади предчистового квадрата определяем сторону квадратного калибра, который является также последним квадратом в системе черновых калибров.

5. Рассчитываем размеры черновых калибров выбранной системы.

Расчет размеров черновых калибров сводится к следующему.

1. Необходимо установить коэффициенты вытяжки по отдельным калибрам вплоть до исходной заготовки, если она задана.

При определении коэффициентов вытяжки по калибрам необходимо учитывать допустимые углы захвата, для чего используем графики зависимости коэффициентов вытяжки от допустимых углов захвата для черновых квадратов различных размеров.

2. Установив коэффициенты вытяжки по отдельным калибрам, находим площади их, а также размеры черновых квадратов, значения которых можно округлить до целых миллиметров.

3. Чтобы определить размеры промежуточных овалов в системе овал—квадрат или ромбов в системе ромб—квадрат, определяем уширение при прокатке полосы в черновом квадрате, пользуясь графиками уширения [1].

Зная площадь и высоту овала или ромба, находим ширину промежуточных овалов или ромбов.

---

[1] В приведенных ниже примерных расчетах показано, как пользоваться такими графиками; аналогичные графики для системы ромб—квадрат были приведены в гл. III при расчете калибровки непрерывного заготовочного стана (см. рис. 54—57).

Проверяем уширение при прокатке квадратной полосы в овальном калибре или в ромбе. В случае необходимости корректируем размеры овалов или квадратов.

4. Данные расчета заносим в таблицу, вычерчиваем калибры.

Порядок расчета черновых калибров по системе овал—ребровый овал такой же.

По значениям коэффициентов вытяжки определяем площади всех черновых калибров и размеры ребровых калибров, после чего по уширению определяем размеры промежуточных овалов.

Ниже приведены примерные расчеты калибровки круглой стали, в которых изложены детали и особенности всей методики калибровки.

## 3. ПРОКАТКА И КАЛИБРОВКА КРУГЛОЙ СТАЛИ НА НЕПРЕРЫВНЫХ СТАНАХ

Благодаря простоте сечения прокатку круглой стали освоили на непрерывных станах раньше других профилей. В настоящее время круглая сталь входит в сортамент почти всех непрерывных сортовых станов.

При непрерывной прокатке следует учитывать постоянство секундных объемов по клетям, скоростной режим (петлевание или натяжение), наличие горизонтальных и вертикальных валков, износ валков и др. Поэтому, несмотря на простоту профиля круглой стали, прокатка этого профиля на непрерывных станах потребовала разработки специальных систем калибровок, таких как система овал—ребровый овал, которая получила у нас наибольшее распространение.

Впервые прокатку круглой стали по такой системе освоили на непрерывном стане 350 Макеевского металлургического завода. Черновая группа стана состоит из семи клетей, из которых клети 1 и 5 с вертикальными валками. Чистовая группа этого стана состоит из восьми клетей, из которых 10, 12 и 14 с вертикальными валками. В черновой группе первые три клети имеют прямоугольные калибры, в остальных клетях применена система овал—квадрат.

При выборе рациональной калибровки в чистовой группе приходилось учитывать наличие натяжения между клетями, которое вызывало неустойчивость полосы при прокатке ее после кантовки. Применение тесных вводных проводок для удержания полосы перед калибром приводило к застреванию штуки. Кантующие проводки быстро изнашивались и выходили из строя. Поэтому систему овал—квадрат, которую сначала применяли в чистовой группе, заменили на систему ромб—квадрат. Однако применение системы ромб—квадрат также не дало положительных результатов.

Лучшие результаты показала система овал—ребровый овал, которая обеспечивает устойчивый режим прокатки при натяжении,

поскольку между клетями чистовой группы отсутствует кантовка прокатываемой полосы.[1]

Коэффициенты вытяжки по системе овал—ребровый овал небольшие, обычно не превосходят 1,4—1,45, однако такие вытяжки вполне достаточны в чистовой группе непрерывного стана.

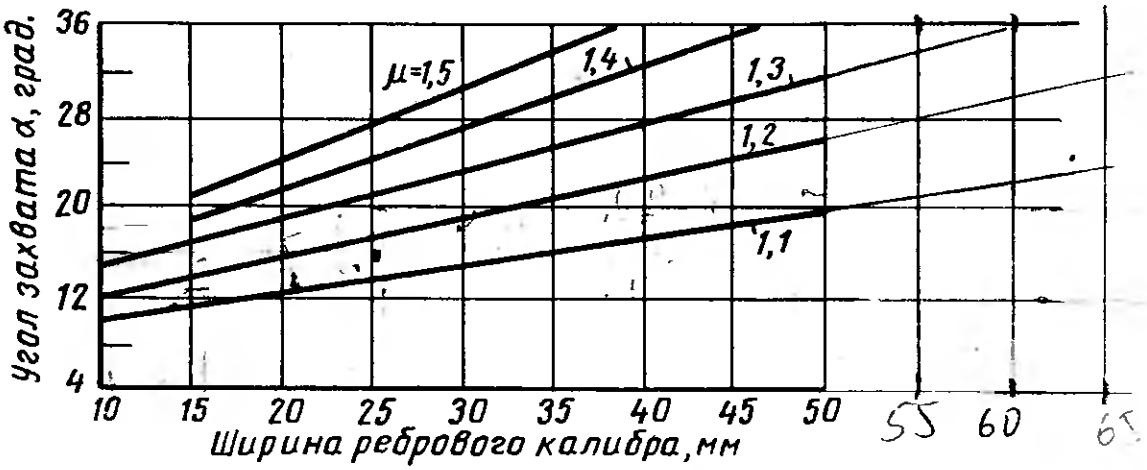



Рис. 75. Зависимость коэффициентов вытяжки от углов захвата и ширины ребрового калибра при прокатке овальной полосы в валках диаметром 250 *мм*

Ниже приведена методика расчета калибровки круглой стали с черновыми калибрами по системе овал—ребровый овал.

Общий ход расчета калибровки круглой стали для непрерывного мелкосортного стана следующий.

Рис. 76. Зависимость коэффициентов вытяжки от углов захвата и ширины ребрового калибра при прокатке овальной полосы в валках диаметром 350 *мм*

1. Определяем размеры чистового круга и предчистового овала, за которыми идет система черновых калибров овал—ребровый овал (см. рис. 73, *в*).

2. Находим размеры ребровых овалов, пользуясь графиком зависимости углов захвата от скорости валков (см. рис. 45) и гра-

[1] За рубежом на непрерывных станах применяют также систему овал—круг.

фиком зависимости коэффициентов вытяжки от углов захвата и диаметра валков $D$ (рис. 75, 76).

Пользуясь указанными графиками, находим вытяжку в реброво овале и коэффициент вытяжки в следующем большем овале, принимая, что коэффициент вытяжки в обычном овале больше, чем в ребровом:

$$\mu_{ов} = 1 + 1{,}25\,(\mu_{р.\,ов} - 1).$$

3. Находим общую вытяжку от реброво овала к ребровому овалу

$$M = \mu_{ов}\mu_{р.\,ов}.$$

Полученные коэффициенты вытяжки уточняем в соответствии с заданными начальным и конечным сечениями:

$$\mu_{общ} = \frac{q_0}{q_{n-1}} = M_1 M_2 M_3 \ldots$$

4. Сначала находим площади и размеры всех ребровых овалов, принимая отношение $\frac{h_{р.\,ов}}{b_{р.\,ов}} \approx 1{,}2 \div 1{,}25$. При $\frac{h_{р.\,ов}}{b_{р.\,ов}} = 1{,}25$ имеем:

$$\left.\begin{aligned} q_{р.\,ов} &= 0{,}75 h_{р.\,ов} b_{р.\,ов} = 0{,}94 b^2_{р.\,ов}; \\ b_{р.\,ов} &= \sqrt{1{,}06 q_{р.\,ов}}; \\ h_{р.\,ов} &= 1{,}25 b_{р.\,ов}. \end{aligned}\right\} \qquad (61)$$

5. Зная площади ребровых овалов, находим коэффициенты вытяжки и площади промежуточных овалов.

Если общая вытяжка от реброво овала к ребровому овалу известна:

$$M = \mu_{ов}\mu_{р.\,ов} = \frac{0{,}94 b'^2_{р.\,ов}}{0{,}94 b^2_{р.\,ов}} = \frac{b'^2_{р.\,ов}}{b^2_{р.\,ов}},$$

то можно определить площадь промежуточного овала

$$M = \mu_{р.\,ов}\mu_{ов} = \mu_{р,\,ов}\left[1 + 1{,}25\,(\mu_{р.\,ов} - 1)\right] =$$
$$= 1{,}25\mu^2_{р.\,ов} - 0{,}25\mu_{р.\,ов},$$

откуда

$$\mu_{р.\,ов} = \frac{0{,}25 + \sqrt{0{,}063 + 5M}}{2{,}5}; \qquad (62)$$

$$\mu_{ов} = \frac{M}{\mu_{р.\,ов}}.$$

По вытяжке находим площади промежуточных овалов, расположенных в вертикальных валках чистовой группы:

$$q_{ов} = \mu_{р.\,ов} q_{р\,.ов}.$$

6. Чтобы найти размеры промежуточных овалов, определяем уширение в ребровых овалах по графикам, приведенным на рис. 77 и 78.

Чтобы определить уширение для валков диаметром в пределах 250—350 *мм*, пользуемся методом интерполяции. Если нужно

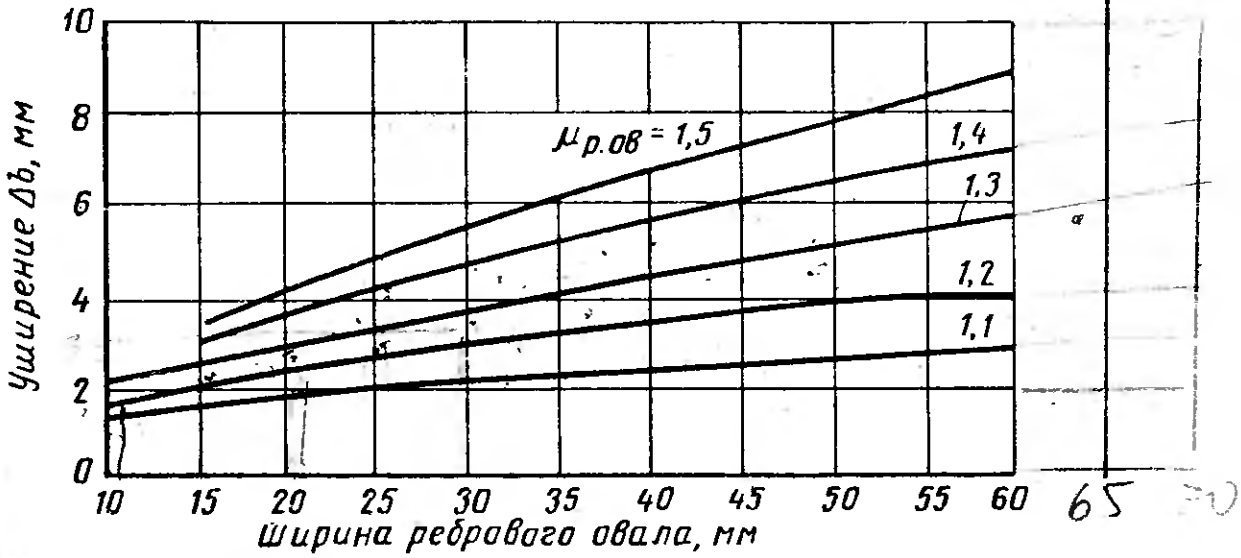



Рис. 77. Уширение овальной полосы в ребровом овале при прокатке в валках диаметром 250 *мм*

определить уширение для валков диаметром более 350 *мм*, то сначала находим уширение $\Delta b'$ для валков диаметром 350 *мм* (рис. 78), а затем находим уширение $\Delta b$ соответственно заданному диаметру, пользуясь выражением

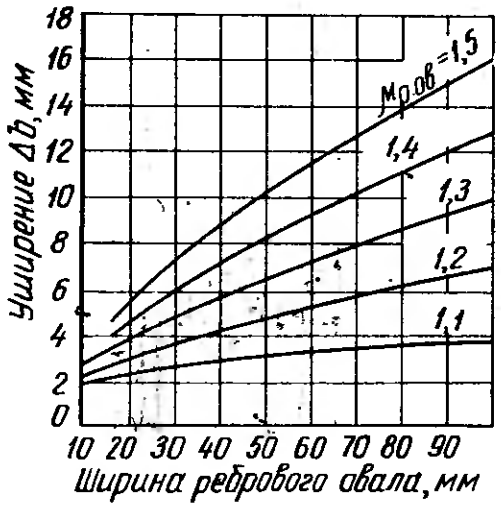



Рис. 78. Уширение овальной полосы в ребровом овале при прокатке в валках диаметром 350 *мм*

$$\Delta b = \Delta b' \sqrt{\frac{D}{350}}.$$

Тогда ширина (толщина) и высота овала будут равны:

$$b_{ов} = b_{р.ов} - \Delta b;$$

$$h_{ов} = \frac{3q_{р.ов}}{2b_{ов} + s},$$

где $s$ — величина зазора.

Проверяем уширение в овальном калибре по формуле

$$\Delta b_{ов} = (0{,}45 \div 0{,}50) \sqrt{\Delta h_{ср} R_{к.ср}} \frac{\Delta h_{ср}}{b_{1ср}},$$

где $\Delta h_{ср} = b_{1ср} - b_{ов.ср}$ — среднее обжатие;
$R_{к.ср}$ — средний катающий радиус;
$b_{1ср}$ — средняя толщина задаваемого ребрового овала;
$b_{ов.ср}$ — средняя толщина овального калибра.

Высота овала равна

$$h_{ов} = h_1 + \Delta b_{ов},$$

где $h_1$ — высота задаваемой ребровой овальной полосы.

В случае необходимости для обеспечения простора на уширение делаем корректировку размеров.

Результаты расчета заносим в таблицу.

Ниже приведен примерный расчет калибровки круга по системе овал—ребровый овал в чистовой группе непрерывного стана.

## Примерный расчет калибровки круглой стали

### *Исходные данные*

Произвести расчет калибровки круглой стали диаметром 16 *мм* для непрерывного мелкосортного стана 250. Диаметры валков: 280 *мм* — в клетях 13 и 15 и 330 *мм* — в остальных клетях (8, 9—12, 14) чистовой группы.

Окружная скорость валков последней клети $v_{16} \approx 15$ *м/сек*. Размеры исходного овального сечения, выходящего из черновой группы (клеть 7), по заводским данным: $h_7 \cdot b_7 = 44 \cdot 38$ *мм*; $q_7 = 1280$ *мм*$^2$.

Система черновых калибров в чистовой группе: овал—ребровый овал.

Расчет ведем против хода прокатки, начиная от чистового калибра.

### *Чистовой круг*

Для круга диаметром 16 *мм* допуски, согласно ГОСТ 2590—57, составляют +0,3 и —0,5 *мм* при обычной точности прокатки.

Принимая минусовый допуск, находим размер круга в холодном состоянии

$$d_x = 16 - \frac{0{,}5}{2} = 15{,}75 \text{ мм}.$$

Размеры чистового круга в горячем состоянии:

$$d_{15} = d_г = d_x \cdot 1{,}014 = 15{,}75 \cdot 1{,}014 = 16 \text{ мм}.$$

Площадь чистового круга в клети 15

$$q_{15} = \frac{\pi d_{15}^2}{4} = \frac{3{,}14 \cdot 16^2}{4} = 201 \text{ мм}^2.$$

Согласно графику (см. рис. 74) принимаем коэффициенты вытяжки $\mu_{15} = 1{,}15$ в чистовом калибре и $\mu_{14} = 1{,}20$ в предчистовом овале.

*Предчистовой овал*

Площадь предчистового овала равна

$$q_{14} = \mu_{15} q_{15} = 1{,}15 \cdot 201 = 231 \text{ мм}^2.$$

Уширение овальной полосы в круглом калибре по графику (см. рис. 57) принимаем $\Delta b_{15} = 2$ *мм*.

Толщина предчистового овала (горизонтальный размер) в клети 14 с вертикальными валками равна

$$b_{14} = d_{15} - \Delta b_{15} = 16 - 2 = 14 \text{ мм}.$$

Высота овала (вертикальный размер) при зазоре $s = 2$ *мм* равна

$$h_{14} = \frac{3q_{14}}{2b_{14} + s} = \frac{3 \cdot 231}{2 \cdot 14 + 2} = 23{,}1 \text{ мм}.$$

В остальных клетях принимаем черновые калибры системы овал—ребровый овал.

В ребровых овалах в данном случае коэффициенты вытяжки можно принимать в пределах $\mu_{р.ов} = 1{,}20 \div 1{,}30$, в овальных калибрах коэффициенты вытяжки можно принимать несколько больше, а именно $\mu_{ов} = 1{,}25 \div 1{,}4$.

Общая вытяжка от ребрового овала к ребровому овалу составит

$$M = \mu_{р.ов} \mu_{ов} = 1{,}5 \div 1{,}8.$$

В клети 13 площадь ребрового овала равна

$$q_{13} = \mu_{14} q_{14} = 1{,}2 \cdot 231 = 277 \text{ мм}^2.$$

Между клетями 7 и 13 расположены три ребровых овала (клети 9, 11 и 13), причем площадь ребрового овала клети 7 (последняя клеть черновой группы) задана:

$$q_7 = 1280 \text{ мм}^2.$$

Тогда средняя вытяжка от ребрового овала к ребровому будет равна

$$M = \mu_{р.ов} \mu_{ов} = \sqrt[3]{\frac{q_7}{q_{13}}} = \sqrt[3]{\frac{1280}{277}} = 1{,}665.$$

Таким образом, коэффициенты вытяжки получились небольшие, так как основная деформация приходится на черновую группу.

С точки зрения меньшего износа калибров в чистовой группе при больших скоростях прокатки применение больших вытяжек не рекомендуется.

Принятые коэффициенты вытяжки и соответствующие площади калибров по отдельным клетям приведены в табл. 37, из которой

видно, что в овальных калибрах приняты бо́льшие вытяжки, чем в ребровых овалах.

Таблица 37

**Коэффициенты вытяжки и площади калибров по клетям стана 250**

| Номер клети | Форма калибра | Коэффициент вытяжки | Площадь калибра, *мм*² |
|---|---|---|---|
| 7г | Ребровый овал . . . . . | — | 1280 |
| 8в | Овал . . . . . | 1,39 | 920 |
| 9г | Ребровый овал . . . . . | 1,30 | 709 |
| 10в | Овал . . . . . | 1,32 | 537 |
| 11г | Ребровый овал . . . . . | 1,26 | 426 |
| 12в | Овал . . . . . | 1,26 | 338 |
| 13г | Ребровый овал . . . . . | 1,22 | 277 |
| 14в | Предчистовой овал . . . . | 1,20 | 231 |
| 15г | Чистовой круг . . . . . | 1,15 | 201 |

Зная площади калибров по отдельным клетям, можно определить размеры черновых калибров, причем будем определять размеры по металлу.

*Клеть 13г — ребровый овал*

Площадь ребрового овала $q_{13} = 0{,}75 \cdot 1{,}25 b_{13} b_{13} = 277$ *мм*².

Ширина ребрового овала

$$b_{13} = \sqrt{1{,}06 \cdot q_{13}} = \sqrt{1{,}06 \cdot 277} = 17{,}1 \text{ мм}.$$

Высота ребрового овала

$$h_{13} = 1{,}25 b_{13} = 1{,}25 \cdot 17{,}1 = 21{,}4 \text{ мм}.$$

Уширение в ребровом овале определяем по графикам (см. рис. 77 и 78):

$$\Delta b_{13} = 3 \text{ мм}.$$

*Клеть 12в — овал*

Площадь овала $q_{12} = 338$ *мм*².

Толщина овала (горизонтальный размер)

$$b_{12} = b_{13} - \Delta b_{13} = 17{,}1 - 3 = 14{,}1 \text{ мм}.$$

Высота овала при зазоре $s = 3{,}5$ *мм*

$$h_{12} = \frac{3 q_{12}}{2 b_{12} + s} = \frac{3 \cdot 338}{2 \cdot 14{,}1 + 3{,}5} = 32{,}0 \text{ мм}.$$

*Клеть 11 — ребровый овал*

Площадь овала

$$q_{11} = 426 \text{ мм}^2,$$

Ширина ребрового овала

$$b_{11} = \sqrt{1{,}06 \cdot 426} = 21{,}2 \text{ мм}.$$

Высота ребрового овала

$$h_{11} = 1{,}25 \cdot 21{,}2 = 26{,}5 \text{ мм}.$$

Определим уширение в ребровом овале для $\mu_{11} = 1{,}28$ по графикам (см. рис. 77 и 78):

$$\Delta b_{11} \approx 4 \text{ мм}.$$

Проверим уширение в овале клети 12, для этого воспользуемся формулой уширения

$$\Delta b = 0{,}45 \sqrt{\Delta h_{ср} R_{к.\,ср}} \frac{\Delta h_{ср}}{b_{ср}};$$

$$\Delta h_{ср} = 0{,}75 \cdot 21{,}2 - \frac{338}{32{,}0} = 15{,}9 - 10{,}5 = 5{,}4 \text{ мм};$$

$$R_{к.\,ср} = \frac{330 - 10{,}5}{2} = 159{,}8 \text{ мм}.$$

$$\Delta b_{12} = 0{,}45 \sqrt{5{,}4 \cdot 159{,}8} \frac{5{,}4}{15{,}9} = 4{,}5 \text{ мм}.$$

Простор на уширение составляет

$$\Delta b_{12} = h_{12} - h_{11} = 32{,}0 - 26{,}5 = 5{,}5 \text{ мм}.$$

Оставляем размеры овала без изменения, так как уширение в овале можно регулировать зазором между валками.

*Клеть 10 — овал*

Площадь овала

$$q_{10} = 537 \text{ мм}^2.$$

Толщина овала

$$b_{10} = b_{11} - \Delta b_{11} = 21{,}2 - 4{,}0 = 17{,}2 \text{ мм}.$$

Принимаем зазор $s = 5$ мм, определяем высоту овала

$$h_{10} = \frac{3 \cdot 537}{2 \cdot 17{,}2 + 5} = 40{,}8 \text{ мм}.$$

*Клеть 9 — ребровый овал*

Площадь овала

$$q_9 = 709 \text{ мм}^2.$$

Ширина ребрового овала

$$b_9 = \sqrt{1{,}06 \cdot 709} = 27{,}4 \text{ мм}.$$

Высота ребрового овала

$$h_9 = 1{,}25 \cdot 27{,}4 = 34{,}2 \text{ мм}.$$

Уширение в ребровом овале, согласно графику (см. рис. 75 и 76), составляет

$$\Delta b_9 = 4{,}5 \text{ мм}.$$

Проверим уширение в клети 10:

$$\Delta h_{ср} = 0{,}75 \cdot 27{,}4 - \frac{537}{40{,}8} = 20{,}5 - 13{,}1 = 7{,}4 \text{ мм};$$

$$R_{к.\,ср} = \frac{330 - 13{,}1}{2} = 158{,}5 \text{ мм};$$

$$\Delta b_{10} = 0{,}45 \sqrt{7{,}4 \cdot 158{,}5}\ \frac{7{,}4}{20{,}5} = 5{,}6 \text{ мм}.$$

Простор на уширение в овале клети 10 равен

$$\Delta b_{10} = h_{10} - h_9 = 40{,}8 - 34{,}2 = 6{,}6 \text{ мм}.$$

Можно оставить размеры калибров без изменений, так как разница между расчетным уширением и простором на уширение небольшая.

*Клеть 8 — овал*

Площадь овала

$$q_8 = 920 \text{ мм}^2.$$

Толщина овала

$$b_8 = b_9 - \Delta b_9 = 27{,}4 - 4{,}5 = 22{,}9 \text{ мм}.$$

Высота овала при зазоре $s = 6{,}5$ мм равна

$$h_8 = \frac{3 \cdot 920}{2 \cdot 22{,}9 + 6{,}5} = 52{,}8 \text{ мм}.$$

Размеры ребрового овала из клети 7 составляют

$$h_7 \cdot b_7 = 44 \cdot 38 \text{ мм}.$$

Простор на уширение в овале равен

$$\Delta b_8 = h_8 - h_7 = 52{,}8 - 44 = 8{,}8 \text{ мм}.$$

Проверим фактическое уширение в овале:

$$\Delta h_{ср} = 75 \cdot 38 - \frac{920}{52{,}8} = 28{,}5 - 17{,}4 = 11{,}1 \text{ мм};$$

$$R_{к.\,ср} = \frac{330 - 17{,}4}{2} = 156{,}3 \text{ мм};$$

$$\Delta b_8 = 0{,}45 \sqrt{11{,}1 \cdot 156{,}3}\ \frac{11{,}1}{28{,}5} = 7{,}3 \text{ мм}.$$

Так как простор на уширение больше фактического уширения, то размеры оставляем без изменений.

Результаты расчетов приведены в табл. 38. Полученные размеры относятся к полосе (к металлу). В табл. 38 приведены также размеры калибров, причем высоту $h_{ов}$ овальных калибров принимаем несколько больше размеров полосы (примерно на 5—10%), чтобы обеспечить простор на уширение при колебании температуры прокатки и избежать образования заусенцев. Увеличиваем также на 5—10% толщину ребровых овальных калибров $b_{р.ов}$,

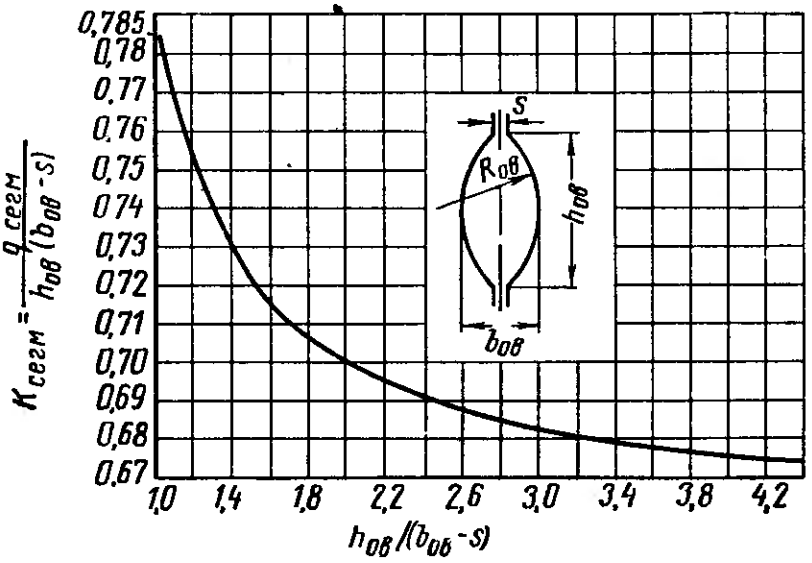



Рис. 79. Зависимость коэффициента $k_{сегм}$ от $\frac{h_{ов}}{b_{ов}-S}$ для овальных калибров

чтобы обеспечить некоторый простор на уширение при прокатке в этом калибре овальной полосы. Площадь овалов можно уточнить, пользуясь формулой

$$q_{ов} = h_{ов}s + k_{сегм}h_{ов}\,(b_{ов} - s),$$

где $s$ — зазор между валками;

$h_{ов}$ — высота овала в вертикальных валках;

$b_{ов}$ — толщина овала;

$k_{сегм}$ — коэффициент, определяемый по графику (рис. 79).

Углы захвата определяем по максимальному обжатию.

Средний катающий диаметр находим по формуле

$$D_{к.ср} = D_0 - \frac{q}{b} = D_0 - h_{ср}.$$

Построение чистовых кругов и овальных калибров изложено ниже [1].

---

[1] См. с. 216.

Таблица 38

## Калибровка круглой стали на непрерывном стане 250 (чистовая группа)

| Номер клети | Форма калибра | Размеры калибров, *мм* | | | | Размеры полосы | | | $\mu$ | $\Delta h$, *мм* | $\Delta b$, *мм* | Диаметр, *мм* | | *n*, *об/мин* | Скорость прокатки *v*, *м/сек* | Максимальный угол захвата |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | высота *h* | ширина *b* | глубина врезa *f* | зазор *s* | высота *h*, *мм* | ширина *b*, *мм* | площадь сечения *q*, *мм* | | | | начальный *D* | средний катающий $D_{к.ср}$ | | | |
| 7г | Ребровый овал | 44 | 39 | 19,5 | 5 | 44 | 38 | 1280 | — | — | — | 380 | 346,3 | 130 | 2,36 | — |
| 8в | Овал | 55 | 22,9 | 8,2 | 6,5 | 52,8 | 22,9 | 920 | 1,39 | 15,1 | 8,8 | 330 | 312,7 | 200 | 3,28 | 18° |
| 9г | Ребровый овал | 34,2 | 29 | 13,6 | 7,0 | 34,2 | 27,4 | 709 | 1,30 | 18,6 | 4,5 | 330 | 304,1 | 267 | 4,25 | 20° 30′ |
| 10в | Овал | 42 | 17,2 | 6,1 | 5,0 | 40,8 | 17,2 | 537 | 1,32 | 10,2 | 6,6 | 330 | 316,9 | 338 | 5,61 | 14° 45′ |
| 11г | Ребровый овал | 26,5 | 23 | 10,75 | 5,0 | 26,5 | 21,2 | 426 | 1,26 | 14,3 | 4 | 330 | 309,9 | 435 | 7,06 | 17° 30′ |
| 12в | Овал | 34 | 14,1 | 5,3 | 3,5 | 32,0 | 14,1 | 338 | 1,26 | 7,1 | 5,5 | 330 | 319,5 | 532 | 8,95 | 12° 15′ |
| 13г | Ребровый овал | 21,4 | 18,5 | 8,2 | 5,0 | 21,4 | 17,1 | 277 | 1,22 | 10,6 | 3 | 280 | 263,8 | 787 | 10,85 | 16° 30′ |
| 14в | Овал | 24 | 14 | 6,0 | 2 | 23,1 | 14 | 231 | 1,20 | 3,1 | 1,7 | 330 | 313,5 | 794 | 13,10 | 8° |
| 15г | Чистовой круг | 16 | 16,5 | 7,25 | 1,5 | 16 | 16 | 201 | 1,15 | 7,1 | 2 | 280 | 267,4 | 1070 | 15 | 13° 15′ |

В табл. 23 приведены размеры для полосы и для калибров, причем для регулировки размеров калибров за счет зазора между валками ширину калибров в клетях с горизонтальными валками и высоту калибров в клетях с вертикальными валками приняли несколько большими, чем соответствующие размеры для полосы, учитывая колебание уширения при прокатке или настройке валков.

Обжатие $\Delta h$ для вертикальных валков соответствует уменьшению размеров по ширине (боковое обжатие), а уширение $\Delta b$ в этих клетях представляет собой увеличение высоты раската.

Начальный диаметр валков $D$ представляет собой расстояние между осями валков при данной настройке.

Средний катающий диаметр равен

$$D_{к.\,ср} = D - h_{ср} = D - \frac{q}{b}.$$

Если от начального диаметра отнять величину зазора, то получим диаметр по буртам

$$D_б = D - s.$$

Диаметр по буртам в заводских калибровках называют часто номинальным диаметром и по этому диаметру рассчитывают средний катающий диаметр, для чего от номинального диаметра отнимают среднюю величину вреза в валки (глубину ручья).

Для определения чисел оборотов и окружных скоростей по клетям приняли для последней клети $v_{15} = 15$ *м/сек* и $n = 267{,}4$ *об/мин*.

Константа калибровки равна

$$K = qD_{к.\,ср} = 201 \cdot 267{,}4 \cdot 1070 = 57{,}5 \cdot 10^6$$

Соответственно этой константе рассчитывают числа оборотов и окружные скорости валков по отдельным клетям.

В табл. 38 приведены также максимальные углы захвата по клетям соответственно максимальному обжатию $\Delta h$ посередине калибра.

Возможную часовую производительность стана при прокатке данного профиля можно определить по известной формуле:

$$p = \frac{3600 \cdot Qn}{T}\ т/ч,$$

где $Q$ — масса заготовки, *т*;

$n$ — число одновременно прокатываемых заготовок (для двухниточного непрерывного стана $n = 2$);

$T$ — темп или ритм прокатки.

В нашем случае вес заготовки сечением $80 \times 80$ *мм* и длиной 11,5 *м* равен $Q = 575$ *кг*.

Темп прокатки равен

$$T = \frac{l}{v} + t_{\text{п}} \text{ сек.}$$

Длина готовой полосы

$$l = \frac{6400}{201} \cdot 11{,}5 = 367 \text{ м.}$$

Паузу $t_{\text{п}}$ между отдельными заготовками можно принять равной 3 *сек*, тогда темп прокатки

$$T = \frac{367}{15} + 3 = 24{,}4 + 3 = 27{,}4 \text{ сек.}$$

Возможная (максимальная) производительность стана при прокатке круга диаметром 16 *мм* равна

$$p = \frac{3600 \cdot 575 \cdot 2}{27{,}4} = 151 \text{ т/ч.}$$

При определении годовой производительности стана необходимо определить сначала среднюю часовую производительность стана соответственно удельному весу каждого профиля в сортаменте (см. гл. II), число часов работы стана в году (примерно 7000 *ч*).

Коэффициент использования стана можно принять $k \approx 0{,}9$.

## Расчет калибровки черновой группы непрерывного мелкосортного стана

Калибровка черновой группы непрерывного мелкосортного стана является общей при прокатке на стане различных профилей.

Настройкой валков (изменением зазора между валками) или частичной перевалкой валков устанавливаем ряд калибров, пригодных для прокатки того или иного профиля.

В табл. 39 приведены схемы калибровок, применяемые в черновых группах непрерывных мелкосортных станов.

В первых трех клетях черновой группы, как правило, применяют прямоугольные калибры с большим зазором (46 *мм*) и малой вытяжкой ($\mu = 1{,}04 \div 1{,}08$). В следующих клетях применяют системы овал—квадрат (на Макеевском заводе), овал—ребровый овал, или прямоугольник — гладкая бочка (на Криворожском заводе).

Наиболее удобной схемой калибровки следует признать калибровку черновой группы, применяемую на стане 250-3 Криворожского металлургического завода с использованием гладкой бочки, что упрощает расточку калибров, делает всю калибровку более гибкой и универсальной, хотя свободное уширение на гладкой бочке несколько снижает коэффициент вытяжки.

Таблица 39

**Калибровки валков черновых групп непрерывных мелкосортных станов**

| Номер клети | Макеевский завод, стан 350 | Криворожский завод | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | стан 250-2 | | стан 250-3 | |
| | | Заготовка, *мм* | | | |
| | 106×106 | 80×80 | 80×80 | 80×80 | 80×80 |
| 1 | Гладкая бочка | Прямоугольный | Прямоугольный | Прямоугольный | Прямоугольный |
| 2 | Прямоугольный | То же | — | Гладкая бочка | Прямоугольный |
| | Кантовка | | | Кантовка | |
| 3 | Прямоугольный | Прямоугольный | Прямоугольный | Прямоугольный | Прямоугольный |
| | | Кантовка | | | |
| 4 | Овал | Плоский овал | Прямоугольный | Гладкая бочка | Гладкая бочка |
| 5 | Квадрат | Ребровый овал | — | Ребровый овал | Прямоугольный |
| 6 | Овал | Овал | Плоский овал | Овал | Гладкая бочка |
| 7 | Квадрат | Ребровый овал | Ребровый овал | Ребровый овал | Ребровый овал |
| | | Готовый профиль *d*, *мм* | | | |
| | 14—32 | 10—24 | 25—30 | 12 | 14—30 |

Как видно из табл. 39, основной схемой калибровки в черновой группе стана 250-3 является схема при прокатке кругов почти всех размеров диаметром 14—30 *мм*.

Ниже приведен расчет калибровки черновой группы по основной схеме: прямоугольник, прямоугольник, ящичный квадрат, гладкая бочка, ящичный квадрат, гладкая бочка, ребровый калибр (рис. 80). Исходная заготовка — квадрат 81×81 *мм* (в горячем состоянии). Ориентирами могут служить ящичные квадраты клетей 3 и 5, в которых калибры имеют примерно квадратное сечение, т. е. $h_3 \approx b_3$ и $h_5 \approx b_5$.

Если известны размеры ящичных квадратов, то легко определить размеры полосы из промежуточных клетей 4 и 6 с гладкой бочкой. Для определения размеров и площадей ящичных квадратов клетей 3 и 5 можно задаваться коэффициентом вытяжки от квадрата к квадрату в пределах 1,7—1,8.

В нашем случае задаемся

$$M = \mu_7\mu_6 = 1{,}8;$$

$$M = \mu_5\mu_4 = 1{,}75.$$

Зная вытяжки, определяем размеры калибров III и V.

Общая вытяжка в черновой группе составляет (см. табл. 23)

$$\mu_{общ} = \frac{6400}{1280} = 5,$$

где $Q_0 = 0{,}97 \cdot 81 \cdot 81 = 6400$ *мм*$^2$ — площадь исходной заготовки.

В клети 1 даем небольшую вытяжку $\mu_1 = 1{,}05 \div 1{,}07$, тогда на остальные клети приходится

$$\mu_{2-7} = \frac{5}{1{,}05} = 4{,}77.$$

Средняя вытяжка на каждую пару калибров равна

$$M_{ср} = \sqrt[3]{4{,}77} = 1{,}66.$$

Принимаем

$$M_{2-3}M_{4-5}M_{6-7} = 1{,}51 \cdot 1{,}75 \cdot 1{,}8 = 4{,}77.$$

Получаем следующие площади:

$$q_0 = 6400 \text{ мм}^2;$$

$$q_1 = \frac{q_0}{\mu_1} = \frac{6400}{1{,}05} = 6100 \text{ мм}^2;$$

$$q_3 = \frac{q_1}{1{,}51} = \frac{6100}{1{,}51} = 4040 \text{ мм}^2;$$

$$q_5 = \frac{4040}{1{,}75} = 2310 \text{ мм}^2;$$

$$q_7 = \frac{2310}{1{,}8} = 1280 \text{ мм}^2.$$

Рассчитаем размеры последних трех калибров клетей 5—7, в которых имеется ящичный квадрат $q_5 = 2310$ *мм*$^2$, гладкая бочка (клеть 6) и ребровый овал $h_7 \cdot b_7 = 44 \cdot 38$ *мм*,

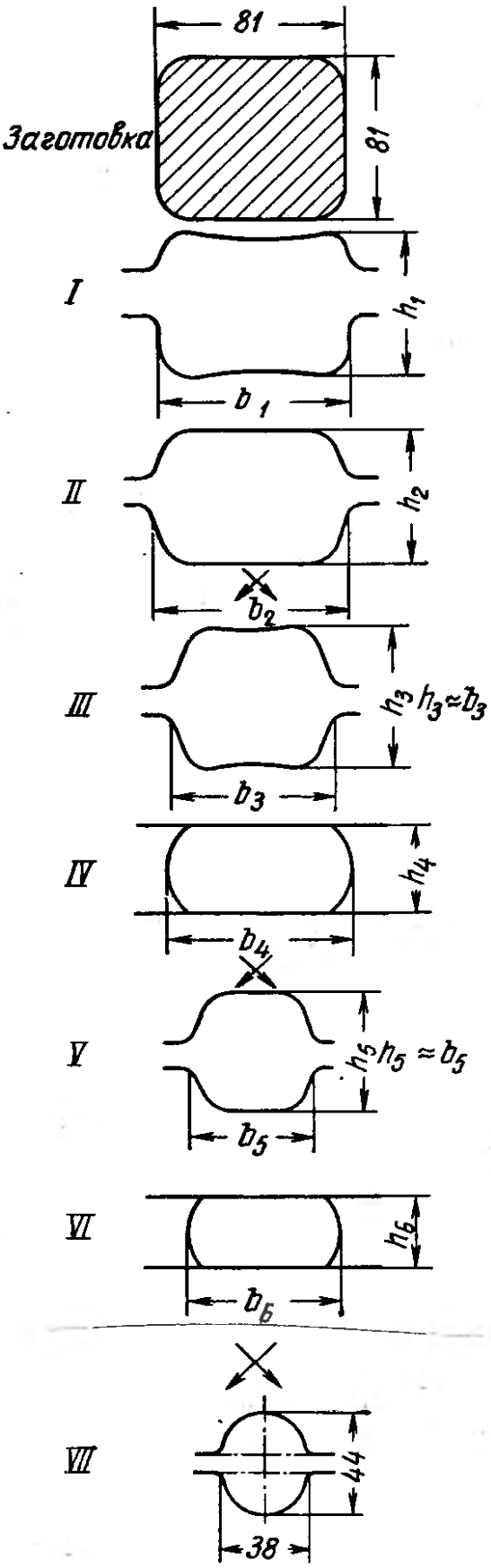



Рис. 80. Калибровка черновой группы клетей для прокатки круглого профиля

Площадь ящичного квадрата равна

$$q_5 = 0{,}97 \cdot b_5 h_5 = 2310 \text{ мм}^2,$$

откуда

$$h_5 = b_5 = 49 \text{ мм}.$$

Определяем размеры ящичного квадрата с учетом наклона боковых стенок калибра, равного 20%, и разницы ширины по дну и зазору около 8 *мм*. Тогда ширина полосы по дну калибра $b_5' = 44$ *мм* и у зазора $b_5 = 52$ *мм*, а для калибра ширину у зазора можно принять на 2—3 *мм* больше, т. е. $b_{к5} = 55$ *мм*.

Чтобы найти размеры промежуточного калибра (гладкая бочка) клети 6, зададимся предварительными размерами полосы, проверим уширение в клетях 6 и 7 и скорректируем окончательно размеры полосы в клети 6.

Для выбора предварительных размеров воспользуемся приближенными показателями уширения в клетях 6 и 7, на основании чего можно написать следующие равенства:

$$h_6 = b_7 - 0{,}40\,(b_6 - h_7);$$
$$b_6 = b_5 + 0{,}6\,(h_5 - h_6),$$

откуда

$$h_6 = \frac{b_7 - 0{,}40 \cdot b_5 - 0{,}24 \cdot h_5 + 0{,}40 h_7}{0{,}76}.$$

Подставляя численные значения размеров в последнюю формулу, получим:

$$h_6 = \frac{38 - 0{,}40 \cdot 52 - 0{,}24 \cdot 49 + 0{,}40 \cdot 44}{0{,}76} \approx 30 \text{ мм};$$

$$b_6 = 52 + 0{,}6\,(49 - 30) \approx 64 \text{ мм}.$$

Определим уширение в клети 7.

Средняя высота калибра

$$h_{7ср} = \frac{1280}{38} = 33{,}7 \text{ мм}.$$

Среднее обжатие

$$\Delta h_{ср} = b_6 - h_{7ср} = 65 - 33{,}7 = 31{,}3 \text{ мм}.$$

Уширение

$$\Delta b_7 = 0{,}25 \sqrt{\Delta h_{ср} R_{к.ср}} \frac{\Delta h_{ср}}{b_6} = 0{,}25 \sqrt{31{,}3 \cdot 173{,}2} \frac{31{,}3}{65} = 9 \text{ мм}.$$

Следовательно, высота $h_6$ должна быть равна

$$h_6 = b_7 - \Delta b_7 = 38 - 9 = 29 \text{ мм}.$$

Проверим уширение в калибре VI:

$$\Delta b_6 = \frac{2 \cdot 56{,}5 \cdot 20}{(49+29)\left[1+(1+0{,}36)\frac{56{,}5}{190 \cdot 0{,}36}\right]} = 14 \text{ мм}.$$

Следовательно, ширина в калибре VI должна быть

$$b_6 = b_5 + \Delta b_6 = 52 + 14 = 66 \text{ мм}.$$

Окончательно принимаем размеры полосы на гладкой бочке калибра 6:

$$h_6 \cdot b_6 = 29 \cdot 66 \text{ мм}.$$

Таким же образом определяем размеры полосы в клети 4 (гладкая бочка).

Размеры ящичного квадрата клети 3 определяем по площади

$$q_3 = 0{,}97 \cdot h_3 b_3 = 4040 \text{ мм}^2.$$

При $h_3 = b_3$ находим

$$h_3 = b_3 = 64{,}5 \text{ мм}.$$

С учетом боковых стенок принимаем $b_3' = 60$ мм и $b_3 = 69$ мм.

Предварительные размеры полосы в клети 6 определяем по приведенной выше формуле

$$h_4 = \frac{b_5 - 0{,}40 \cdot b_3 - 0{,}24 \cdot h_3 + 0{,}40 \cdot h_5}{0{,}76} =$$

$$= \frac{53 - 0{,}40 \cdot 69 - 0.24 \cdot 64{,}5 + 0{,}40 \cdot 49}{0{,}76} = 39 \text{ мм};$$

$$b_4 = 69 + 0{,}6\,(64{,}5 - 39) = 84{,}5 \text{ мм}.$$

Проверяем уширение в калибрах *IV* и *V*. Уширение в калибре *IV*

$$\Delta b_4 = \frac{2 \cdot 76{,}8 \cdot 25{,}5}{(64{,}5+39)\left[1+(1+0{,}4)\frac{76{,}8}{190 \cdot 0{,}40}\right]} \approx 15 \text{ мм}.$$

Следовательно, ширина полосы в калибре *IV* равна

$$b_4 = b_3 + \Delta b_4 = 69 + 15 = 84 \text{ мм}.$$

Уширение в калибре *V*

$$\Delta b_5 = \frac{2 \cdot 46 \cdot 35{,}5}{(84{,}5+49)\left[1+(1+0{,}465)\frac{46}{165{,}5 \cdot 0{,}465}\right]} \approx 14 \text{ мм}.$$

Следовательно, толщина полосы в калибре *IV*

$$h_4 = b_5 - \Delta b_5 = 52 - 14 = 38 \text{ мм}.$$

Окончательно, можно принять размеры калибра *IV*

$$h_4 \cdot b_4 = 38 \cdot 84 \text{ мм}.$$

Остается определить размеры полосы и прямоугольных калибров клетей 1 и 2.

При сечении заготовки $81 \times 81$ *мм* принимаем обжатие $\sim 4$ *мм*, а уширение $\sim 1$ *мм*

Получим размеры полосы, выходящей из калибра *I*:

$$h_1 \cdot b_1 = 77 \cdot 82 \text{ мм};$$

$$q_1 = 0{,}97 \cdot 77 \cdot 81 = 6100 \text{ мм}^2.$$

Если учесть, что прямоугольный калибр имеет уклон, получим ширину полосы $b_1 = 80$ *мм* по дну калибра и $b_1' = 82$ *мм* у зазора.

Размеры калибра будут больше на 1—3 *мм*, о чем будет сказано ниже.

При определении размеров полосы, выходящей из калибра *II*, поступаем как и в предыдущем случае.

Записываем равенство

$$h_2 = b_3 - 0{,}35\,(b_2 - h_3);$$

$$b_2 = b_1 + 0{,}35\,(h_1 - h_2),$$

откуда

$$h_2 = \frac{b_3 - 0{,}35b_1 - 0{,}123h_1 + 0{,}35h_3}{0{,}877}.$$

В нашем случае

$$h_2 = \frac{69 - 0{,}35 \cdot 82 - 0{,}123 \cdot 77 + 0{,}35 \cdot 64{,}5}{0{,}877} = 61 \text{ мм};$$

$$b_2 = 82 + 0{,}35\,(77 - 61) \approx 87 \text{ мм}.$$

Определим уширение в калибре *II*

$$\Delta b_2 = \frac{2 \cdot 84{,}5 \cdot 16 \cdot 0{,}8}{(77 + 61)\left[1 + (1 + 0{,}317)\left(\frac{84{,}5}{159{,}5 \cdot 0{,}317}\right)^2\right]} \simeq 4 \text{ мм}.$$

Поэтому ширина полосы в калибре *II* будет равна

$$b_2 = 82 + 4 = 86 \text{ мм}.$$

Окончательно принимаем

$$h_2 \cdot b_2 = 61 \cdot 86 \text{ мм}.$$

По дну калибра ширину принимаем меньше примерно на 6 *мм*, т. е. $b_2' = 80$ *мм*.

Проверим уширение в калибре *III*:

$$\Delta b_з = \frac{2 \cdot 65 \cdot 21{,}5}{(86 + 64{,}5)\left[1 + (1 + 0{,}358)\left(\frac{65}{157{,}3 \cdot 0{,}358}\right)^2\right]} = 7 \text{ мм}.$$

Следовательно:

$$b_з = 61 + 7{,}0 = 68 \text{ мм}$$

В нашем случае ширина $b_з = 69$ *мм*, поэтому оставляем размеры полосы после калибра *III* без изменения. Принимаем $b_з' = 60$ *мм* и $b_з = 69$ *мм*.

Таким образом определили размеры полосы во всех семи калибрах черновой группы. Полученные результаты заносим в табл. 40.

При определении размеров калибров исходим из условия, что ширина калибра у зазора должна быть на 1—3 *мм* больше ширины полосы во избежание образования заусенцев.

На основе практических данных устанавливаем зазор, необходимые регулировки валков по высоте.

В табл. 40 приведены также начальные диаметры $D$, определяемые как расстояние между осями валков.

Следует отметить, что для непрерывных станов, в том числе для черновых групп, можно пользоваться также диаметром по бочке. В этом случае для получения начального диаметра следует прибавить величину зазора

$$D = D_б + s,$$

после чего средний катающий диаметр будет найден, если отнять среднюю высоту калибра:

$$D_{к.ср} = D - \frac{Q}{b} = D_б + s - \frac{Q}{b}.$$

Поэтому диаметр валка по буртам является более постоянной величиной, а начальный диаметр зависит от величины зазора, который регулируется на непрерывных станах, особенно в черновой группе, в значительных пределах.

Как видно из табл. 40, в клети 1 диаметр по буртам равен 380 *мм*, а при большом зазоре $s = 45$ *мм* начальный диаметр получился

$$D + D_б + s = 380 + 45 = 425 \text{ мм}.$$

В остальных клетях (клети 2, 3, 5 и 7) начальный диаметр принят равным 380 *мм* с учетом нормального зазора между клетями. В клетях 4 и 5, где применена гладкая бочка, начальный диаметр (диаметр бочки) совпадает с катающим диаметром, как это принято на листовых станах.

Таблица 40

## Калибровка черновой группы непрерывного стана 250

| Номер клети | Форма калибра | Размеры калибров, *мм* | | | | Размеры полосы | | | Коэффициент вытяжки $\mu$ | Обжатие $\Delta h$, *мм* | Уширение $\Delta b$, *мм* | Диаметр, *мм* | | *n*, *об/мин* | Скорость прокатки *v*, *м/сек* | Максимальный угол захвата $\alpha$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | высота *h* | ширина *b* | глубина врезa *f* | зазор *s* | высота *h*, *мм* | ширина *b*, *мм* | площадь сечения *q*, *мм*$^2$ | | | | начальный *D* | средний катающий $D_{к.ср}$ | | | |
| | Исходная заготовка | | | | | 81 | 81 | 6400 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 1 | Прямоугольник | 77 | 80/85 | 16 | 45 | 77 | 80/82 | 6100 | 1,05 | 4 | 1 | 425 | 350 | 26,9 | 0,49 | 8° |
| 2 | То же | 61 | 80/89 | 27 | 7 | 61 | 80/86 | 4900 | 1,25 | 16 | 4 | 380 | 323 | 36,3 | 0,62 | 19° 30′ |
| 3 | Ящичный квадрат | 64,5 | 60/74 | 29 | 6,5 | 64,5 | 60/69 | 4100 | 1,20 | 21,5 | 8 | 380 | 325 | 43,1 | 0,74 | 21° |
| 4 | Гладкая бочка | — | — | — | 38 | 38 | 84 | 3090 | 1,33 | 26,5 | 15 | 380 | 380 | 49,0 | 0,95 | 21° 30′ |
| 5 | Ящичный квадрат | 49 | 44/55 | 20,5 | 8 | 49 | 44/52 | 2330 | 1,33 | 35 | 14 | 380 | 335 | 73,6 | 1,29 | 26° 30′ |
| 6 | Гладкая бочка | — | — | — | 29 | 29 | 66 | 1860 | 1,25 | 20 | 14 | 380 | 380 | 81,4 | 1,62 | 18° 40′ |
| 7 | Ребровый овал | 44 | 39 | 19,5 | 5 | 44 | 38 | 1280 | 1,40 | 22 | 9 | 380 | 346,3 | 130 | 2,36 | 19° 45′ |

Примечание. Ширина калибров *b* дана по дну—в числителе и у зазора—в знаменателе.

Таблица 41

## Калибровка круглой стали диаметром 16 *мм*

| Группы клетей | Номер клети | Форма калибра | Размеры калибров, *мм* | | | Размеры полосы | | | Коэффициент вытяжки μ | Обжатие $\Delta h$, *мм* | Уширение $\Delta b$, *мм* | Диаметр валка, *мм* | | *n*, *об/мин* | Скорость прокатки *v*, *м/сек* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | ширина $b_к$ | глубина вреза *f* | зазор *s* | высота *h*, *мм* | ширина *b*, *мм* | площадь сечения *q*, *мм* | | | | начальный *D* | катающий $D_к$ | | |
| Черновая | 1 | Прямоугольный | 90 | 16 | 45 | 77 | 82 | 6400<br>6150 | 1,04 | 4 | 1 | 380 | 350 | 27,3 | 0,5 |
| | 2 | » | 90 | 27,5 | 7 | 62 | 85 | 5060 | 1,22 | 15 | 3 | 380 | 327 | 35,6 | — |
| | 3 | » | 73 | 28,5 | 6 | 63 | 70 | 4050 | 1,25 | 22 | 8 | 380 | 329 | 44,1 | — |
| | 4 | Гладкая бочка | — | — | 38 | 38 | 83 | 3080 | 1,32 | 25 | 13 | 380 | 380 | 50,2 | — |
| | 5 | Прямоугольный | 56 | 21 | 8 | 50 | 50 | 2350 | 1,31 | 33 | 12 | 380 | 342 | 73,3 | — |
| | 6 | Гладкая бочка | — | — | 28 | 28 | 70 | 1900 | 1,24 | 22 | 20 | 380 | 380 | 81,3 | — |
| | 7 | Ребровый овал | 39 | 19,5 | 5 | 44 | 38 | 1280 | 1,48 | 26 | 10 | 380 | 340,5 | 135 | 2,42 |
| Чистовая | 8 | Овал | 55 | 7,85 | 6,3 | 53,0 | 22,0 | 918 | 1,39 | 16,0 | 9 | 330 | 319 | 200 | — |
| | 9 | Ребровый овал | 26,5 | 13,95 | 8,1 | 36,0 | 26 | 700 | 1,31 | 17,0 | 4,0 | 330 | 310 | 270 | — |
| | 10 | Овал | 47 | 5,55 | 4,9 | 43,5 | 16 | 550 | 1,27 | 10 | 7,5 | 330 | 322 | 331 | — |
| | 11 | Ребровый овал | 22,0 | 11 | 4,5 | 26,5 | 21 | 405 | 1,36 | 17,0 | 5,0 | 330 | 315 | 461 | — |
| | 12 | Овал | 31 | 5,8 | 2,9 | 31,0 | 14,5 | 336 | 1,21 | 6,5 | 4,5 | 330 | 323 | 544 | — |
| | 13 | Ребровый овал | 16,5 | 8,25 | 6,0 | 22,5 | 16,5 | 273 | 1,23 | 8,5 | 2,0 | 280 | 268 | 805 | — |
| | 14 | Овал | 25,2 | 4,2 | 4,8 | 24,0 | 13,2 | 254 | 1,08 | 3,3 | 1,5 | 330 | 322 | 715 | — |
| | 15 | Круг | 16,5 | 7,35 | 1,5 | 16,2 | 16,2 | 206 | 1,23 | 8,5 | 3,0 | 280 | 268 | 1065 | 15,0 |

В табл. 40 приведен максимальный угол захвата соответственно максимальному обжатию и диаметру валка посредине калибра.

Уширение в калибрах клетей 2, 3 и 5 определено без ограничения во избежание переполнения калибров.

При дальнейшей корректировке калибровок необходимо исходить из условий равномерной загрузки клетей по мощности во времени.

В табл. 41 приведена заводская калибровка круглой стали диаметром 16 *мм*, прокатываемой на стане 250.

На зигзагообразных и полунепрерывных станах обычно применяют смешанную систему калибровок, т. е. чередование овальных, квадратных, ромбических и ящичных черновых калибров.

С целью уменьшения перевалок при переходе с одного размера на другой применяют универсальные калибры, размеры которых можно регулировать подъемом или опусканием верхнего валка, т. е. величиной зазора между валками.

## 4. ПРОКАТКА И КАЛИБРОВКА КРУГЛОЙ СТАЛИ НА ЛИНЕЙНЫХ СТАНАХ

На линейных станах старого типа — мелкосортных и среднесортных — прокатывают круглую сталь различных марок в широком диапазоне размеров.

На станах с валками диаметром 280—380 *мм* при прокатке круглой стали, как правило, применяют систему черновых калибров овал—квадрат, в отдельных случаях применяют и смешанную калибровку с черновыми калибрами по системе овал—квадрат и ромб—квадрат.

Исходную заготовку сначала прокатывают в обжимной линии, состоящей из одной или двух клетей, после чего квадратный или овальный раскат поступает в черновую и чистовую линии или только в чистовую линию, если черновая линия отсутствует.

На среднесортных линейных станах, состоящих обычно из обжимной клети и чистовой линии, круглую сталь прокатывают, как правило, по системе ромб—квадрат.

Ниже приведен примерный расчет калибровки круглой стали на линейном стане.

### Примерный расчет калибровки круглой стали диаметром 20 *мм* при прокатке на линейном мелкосортном стане

Рассчитаем калибровку круглой стали диаметром 20 *мм* при прокатке на мелкосортном стане 325. Этот стан состоит из одной обжимной клети 500 *мм* ($n$ = 100 *об/мин*) и чистовой линии из шести клетей с валками диаметром 325 *мм* ($n$ = 300 *об/мин*).

На стане прокатывают качественные стали, в том числе низколегированные конструкционные.

Из обжимной клети получаем квадрат 45×45 *мм*, который примем за исходную заготовку.

Черновые калибры от квадрата 45×45 *мм* до готового профиля примем по системе овал—квадрат.

Определяем размеры холодного круглого профиля с учетом принятых допусков.

Если исходить из минусовых допусков, которые применяют для сталей обыкновенного качества, то диаметр холодного круга составляет

$$d_x = d - \frac{\Delta_2}{2},$$

где $d$ — номинальный диаметр круга;

$\Delta_2$ — минусовое отклонение по диаметру.

При прокатке качественной стали пользуются плюсовым отклонением $\Delta_1$, в этом случае диаметр холодного круга

$$d_x = d + \frac{\Delta_1}{2}.$$

Для качественных сталей можно пользоваться средним отклонением с учетом минусовых и плюсовых допусков

$$d_x = d + \frac{\Delta_1 + \Delta_2}{2}.$$

Определяем диаметр горячего круга с учетом линейного расширения

$$d_г = (1{,}012 \div 1{,}015)\, d_x.$$

Чем больше диаметр круга и выше температура конца прокатки, тем выше коэффициент линейного расширения.

Для круга диаметром 20 *мм* в соответствии с ГОСТ 2590—57 отклонение по диаметру составляет +0,4 ÷ (—0,5) *мм* при обычной точности и +0,2 ÷ (—0,4) *мм* — при повышенной точности. Средний диаметр в холодном состоянии с учетом повышенной точности равен

$$d_x = 20 + \frac{+0{,}2 - 0{,}4}{2} = 19{,}9 \text{ мм}.$$

Горячие размеры чистового круга

$$d_1 = d_г = 1{,}013 \cdot 19{,}9 \approx 20{,}2 \text{ мм}.$$

Площадь чистового круга

$$q_1 = \frac{\pi d_1^2}{4} = \frac{3{,}14 \cdot 20{,}2^2}{4} = 321 \text{ мм}^2.$$

Принимаем коэффициент вытяжки в чистовом круге $\mu_1 = 1{,}12$, пользуясь графиком, приведенном на рис. 74.

Площадь предчистового овала равна

$$q_2 = \mu_1 q_1 = 1{,}12 \cdot 321 = 360 \text{ мм}^2.$$

Чтобы определить размеры предчистового овала, определим уширение в чистовом круге по графикам, приведенным на рис. 76 и 77. В нашем случае диаметр валков чистовой линии $D = 325$ мм, диаметр круга составляет примерно 20 мм. Пользуясь интерполяцией, находим уширение $\Delta b_1 = 2$ мм. Размеры калибров округляем до десятых долей миллиметра. Тогда толщина (высота) овала будет равна

$$h_2 = d_1 - \Delta b_1 = 20{,}2 - 2 = 18{,}2 \text{ мм}$$

Площадь предчистового овала (см. рис. 19) приближенно можно определить по формуле

$$q_{ов} \approx b_{ов} s + \frac{2}{3} b_{ов} (h_{ов} - s),$$

где $b_{ов}$ и $h_{ов}$ — ширина и высота овала;

$s$ — зазор между валками.

Зазор $s$ между валками чистовой линии составляет

$$s = (0{,}005 \div 0{,}012)\, D.$$

Площадь овала можно определить более точно, что рассмотрено выше.

Имея площадь овала $q_{ов}$ и толщину его $h_{ов}$, находим ширину

$$b_{ов} = \frac{3 q_{ов}}{2 h_{ов} + s}.$$

В нашем случае при зазоре $s = 2$ мм ширина предчистового овала

$$b_2 = \frac{3 \cdot 360}{2 \cdot 18{,}2 + 2} = 28{,}1 \text{ мм}.$$

Радиус очертания однорадиусного овала (вывод дан выше) равен

$$R = \frac{b_{ов}^2 + h_{ов}'^2}{4 h_{ов}'} = \frac{28{,}1^2 + 16{,}2^2}{4 \cdot 16{,}2} = 16{,}1 \text{ мм}.$$

$$h_{ов}' = h_{ов} - s = 18{,}2 - 2 = 16{,}2 \text{ мм}.$$

Определяем площадь предчистового квадрата, для чего по графику, приведенному на рис. 74, находим коэффициент вытяжки в предчистовом овале $\mu_2 = 1{,}22$. Тогда

$$q_3 = \mu_2 q_2 = 1{,}22 \cdot 360 = 438 \text{ мм}^2.$$

Сторона предчистового квадрата с учетом закруглений

$$c_з \sqrt{1{,}03 q_з} = \sqrt{1{,}03 \cdot 438} = 21{,}2 \text{ мм}.$$

Проверим уширение в предчистовом овале по формуле, приведенной в работе [5]:

$$\Delta b = 0{,}4 \sqrt{(c_з - h_{ов.\,ср}) R_{к.\,ср}} \frac{c_з - h_{ов.\,ср}}{c_з};$$

$$h_{ов.\,ср} = \frac{360}{28{,}1} = 12{,}8 \text{ мм};$$

$$R_{к.\,ср} = 0{,}5\,(325 - 12{,}8) = 156{,}1 \text{ мм}; \; c_з = 21{,}2 \text{ мм};$$

$$\Delta b_2 = 0{,}4 \sqrt{(21{,}2 - 12{,}8)\,156{,}1} \frac{21{,}2 - 12{,}8}{21{,}2} = 5{,}7 \text{ мм}.$$

Необходимая ширина овала

$$b_2 = 21{,}2 + 5{,}7 = 26{,}9 \text{ мм}.$$

У нас получился овал шириной 28,1 *мм*, т. е. шире на 1,2 *мм*. Оставляем размер овала без изменений, считая, что полученный простор на уширение 28,1—21,2 = 6,9 *мм* обеспечит заполнение овала без заусенцев.

Определяем ширину и высоту предчистового квадрата с учетом закруглений.

Ширина квадратного калибра

$$b_з = 1{,}41 c_з - s_з = 1{,}41 \cdot 21{,}2 - 2 = 28 \text{ мм}.$$

Высота квадрата при

$$r \approx 0{,}1 \cdot c = 0{,}1 \cdot 21{,}2 = 2 \text{ мм}$$

равна

$$h_з = 1{,}41 c - 0{,}82 \cdot r = 30 - 0{,}82 \cdot 2 = 28{,}4 \text{ мм}.$$

Находим размеры квадратов, пользуясь графиками зависимости углов захвата от скорости прокатки.

Средняя скорость прокатки в чистовой линии для среднего катающего диаметра валков около 300 *мм* при $n \approx 300$ *об/мин* равна

$$v = \frac{\pi D_{к.\,ср} n}{60} = \frac{3{,}14 \cdot 0{,}3 \cdot 300}{60} = 4{,}7 \text{ м/сек}.$$

По графику (рис. 45) допустимый угол захвата для стальных валков при $v = 4{,}7$ *м* равен около 22°. Чтобы найти по углу захвата коэффициенты вытяжки при известной стороне квадрата, пользуемся графиками, построенными А. П. Чекмаревым на основании расчетных данных (рис. 81—84).

По этим графикам (рис. 83, 84) находим коэффициент вытяжки, допускаемый в квадрате $c_з = 21{,}2$ *мм* и $\alpha = 22°$. По графикам

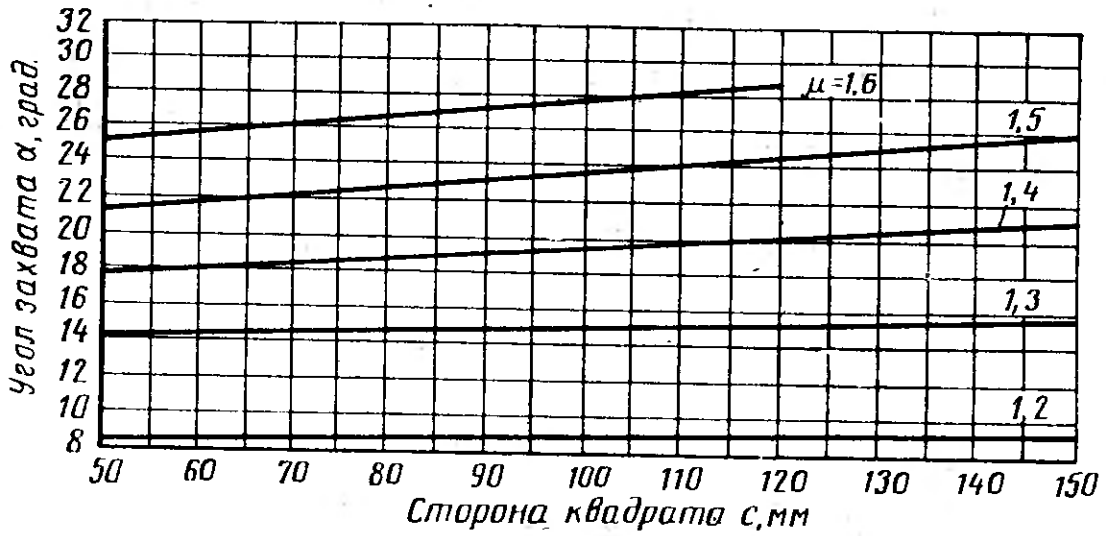



Рис. 81. Зависимость коэффициента вытяжки от угла захвата и стороны квадрата при прокатке по системе овал—квадрат в валках диаметром 800 *мм*

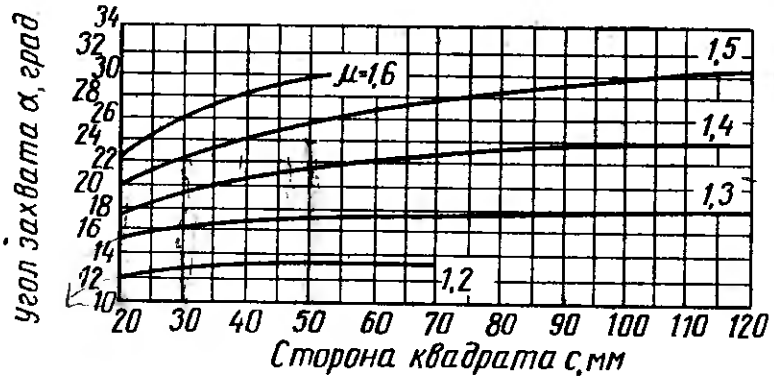



Рис. 82. Зависимость коэффициента вытяжки от угла захвата и стороны квадрата при прокатке по системе овал — квадрат в валках диаметром 500 *мм*

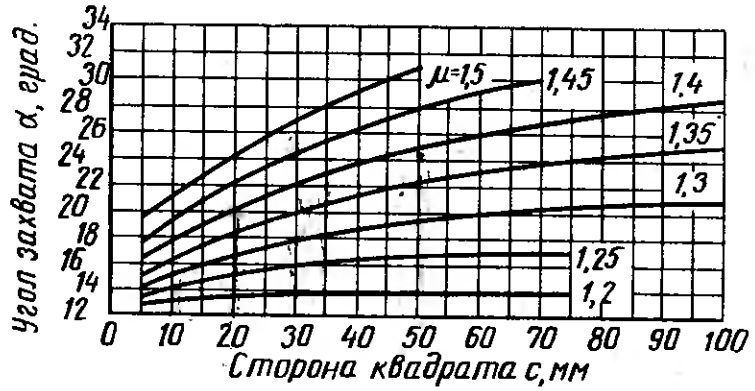



Рис. 83. Зависимость коэффициента вытяжки от угла захвата и стороны квадрата при прокатке по системе овал — квадрат в валках диаметром 350 *мм*

(рис. 83, 84) определяем $\mu = 1{,}42$ при $D = 350$ *мм* и $\mu = 1{,}30$ при $D = 250$ *мм*. Интерполяцией находим коэффициент вытяжки $\mu_3 \approx 1{,}39$.

В следующем овальном калибре коэффициент вытяжки может быть больше, чем в квадратном, т. е.

$$\mu_4 \approx 1 + 1{,}5\,(\mu_3 - 1) = 1 + 1{,}5\,(1{,}39 - 1) = 1{,}58.$$

Площадь следующего большего квадрата равна

$$q_5 = \mu_4\mu_3 q_3 = 1{,}58 \cdot 1{,}39 \cdot 438 = 963 \text{ мм}^2.$$

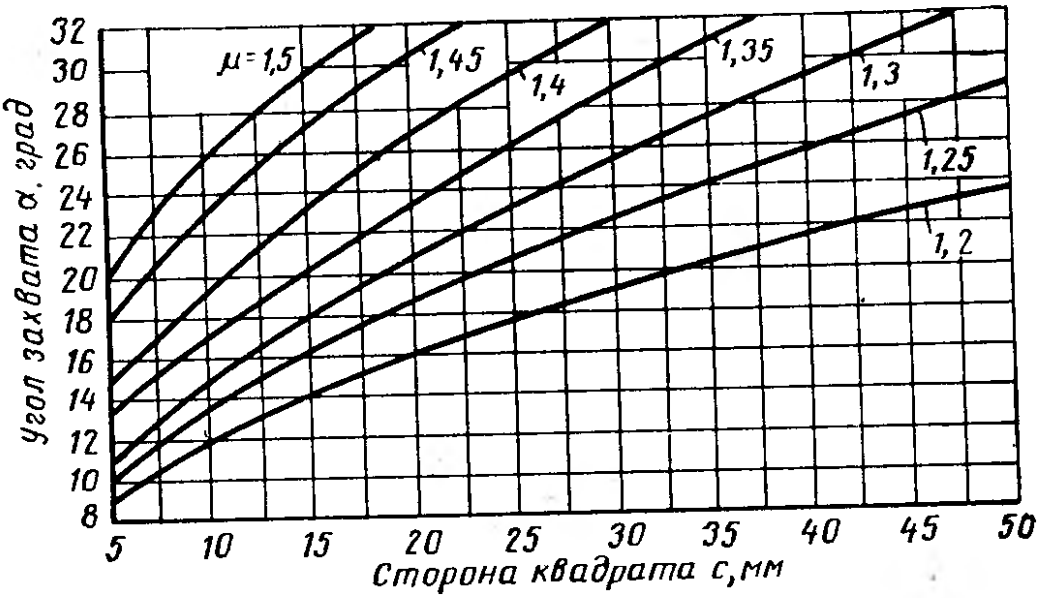



Рис. 84. Зависимость коэффициента вытяжки от угла захвата и стороны квадрата при прокатке по системе овал — квадрат в валках диаметром 250 *мм*

Сторона квадрата калибра *V* (против хода прокатки)

$$c_5 = \sqrt{1{,}03 q_5} = \sqrt{1{,}03 \cdot 963} = 31{,}4 \text{ мм}.$$

По графикам (рис. 83 и 84) находим коэффициенты вытяжки в квадрате $c_5 = 31{,}4$ *мм* при $\alpha = 22°$. Интерполяцией находим $\mu_5 = 1{,}36$ при $D = 325$ *мм*.

В овальном калибре *VI*

$$\mu_6 \approx 1 + 1{,}5\,(\mu_5 - 1) = 1 + 1{,}5\,(1{,}36 - 1) \approx 1{,}54.$$

Тогда площадь следующего большого квадрата будет равна

$$q_7 = \mu_6\mu_5 q_5 = 1{,}54 \cdot 1{,}36 \cdot 963 = 2020 \text{ мм}^2.$$

Сторона квадратной полосы равна

$$c_7 = c_0 = \sqrt{1{,}03 \cdot q_7} = \sqrt{1{,}03 \cdot 2020} = 45{,}6 \text{ мм}.$$

Нам задана исходная заготовка $c_0 = 45$ *мм*, следовательно, можно принять $c_0 = c_7 = 45$ *мм*. Квадрат в калибре *V* принимаем $c_5 = 31$ *мм*.

Итак, получили две пары черновых калибров:
калибр *VI* — черновой овал;
калибр *V* — черновой квадрат ($c_5 = 31$ *мм*);
калибр *IV* — черновой овал;
калибр *III* — черновой (предчистовой) квадрат ($c_3 = 21{,}2$ *мм*);
калибр *II* — предчистовой овал ($28{,}1 \times 18{,}2$ *мм*);
калибр *I* — чистовой круг ($d = 20{,}2$ *мм*).

Следует иметь в виду, что в чистовой линии можно иметь нечетное число проходов, а именно пять проходов в пяти клетях при петлевой схеме прокатки. Поэтому в обжимной клети, кроме квадрата $45 \times 45$ *мм*, необходимо разместить и овальный калибр или соответственно по площади шестигранный калибр. Таким образом, из обжима будет выходить овальная (шестигранная) полоса, поступающая в чистовую линию стана 325.

Перейдем к определению размеров черновых промежуточных овалов.

Определим размеры чернового овала калибра *IV* (нумерацию ведем против хода прокатки).

Общая вытяжка между двумя квадратами третьего и пятого калибров равна

$$M = \mu_{ов}\mu_{кв} = \frac{c_5^2}{c_3^2} = \frac{31^2}{21{,}2^2} = 2{,}14.$$

Можно записать

$$M = \mu_{кв}\mu_{ов} = \mu_{кв}\left[1 + 1{,}5\left(\mu_{кв} - 1\right)\right] = 1{,}5\mu_{кв}^2 - 0{,}5\mu_{кв}.$$

Решая это квадратное уравнение, находим

$$\mu_{кв} = \frac{0{,}5 + \sqrt{0{,}25 + 6M}}{3}. \qquad (63)$$

В нашем случае

$$\mu_3 = \mu_{кв} = \frac{0{,}5 + \sqrt{0{,}25 + 6 \cdot 2{,}14}}{3} = 1{,}37.$$

Коэффициент вытяжки в овальном калибре

$$\mu_4 = \frac{2{,}14}{1{,}37} = 1{,}56.$$

Площадь овала равна

$$q_4 = \mu_3 q_3 = 1{,}37 \cdot 438 = 600 \text{ мм}^2.$$

Площадь квадрата

$$q_5 = \mu_4 q_4 = 1{,}56 \cdot 600 = 935 \text{ мм}^2.$$

Сторона квадрата

$$c_5 = \sqrt{1{,}03 \cdot 935} = 31 \text{ мм}.$$

Для определения размеров овала определим уширение при прокатке овала в третьем квадратном калибре со стороной $c_3 = 21{,}2$ *мм*. Для этого воспользуемся графиками уширения

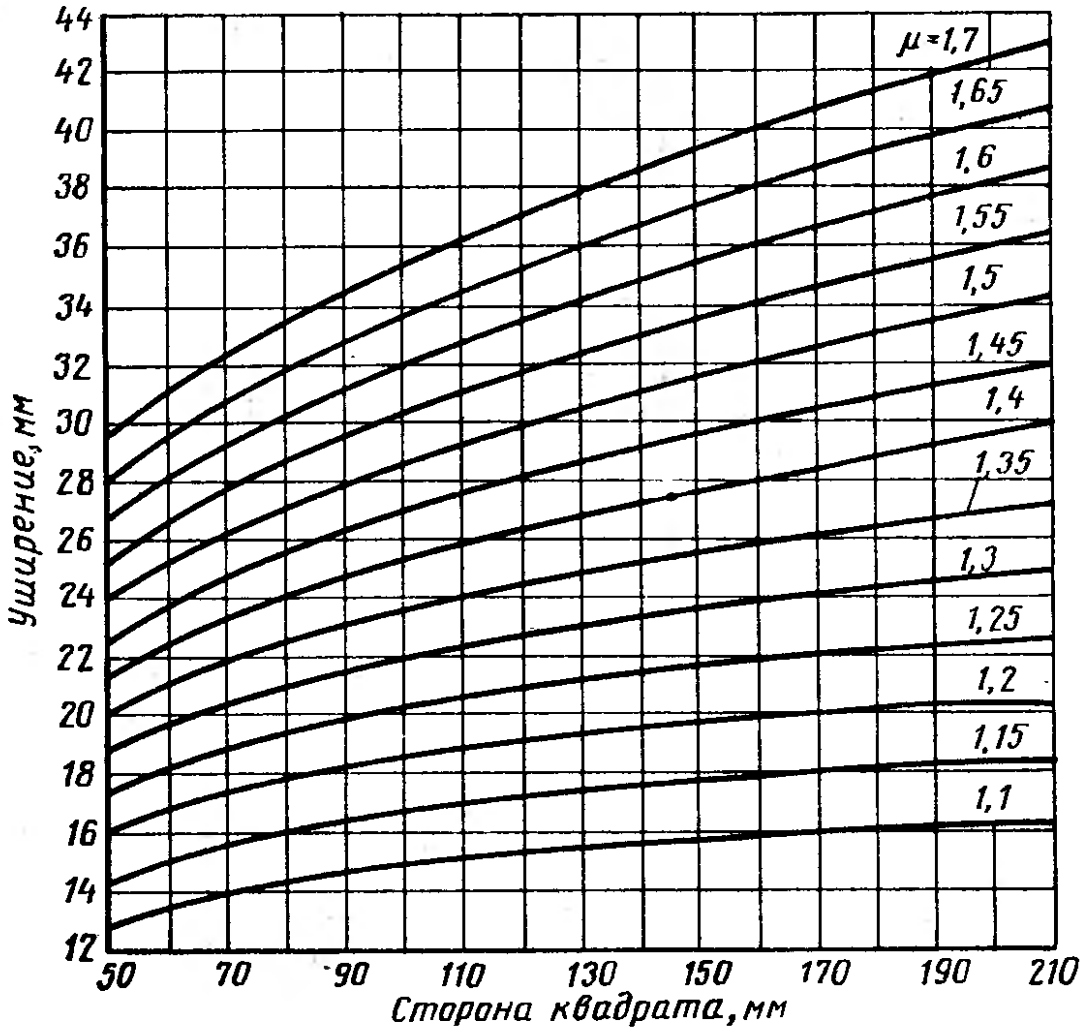



Рис. 85. Уширение при прокатке овальной полосы в квадратном калибре в валках диаметром 800 *мм*

А. П. Чекмарева (рис. 85—88). При $c_3 = 21{,}2$ *мм* интерполяцией находим $\Delta b_3 = 7{,}5$ *мм*.

Высота овала

$$h_4 = 1{,}41c_3 - s - \Delta b_3 = 1{,}41 \cdot 21{,}2 - 2 - 7{,}5 = 20{,}5 \text{ мм}.$$

Ширина овала

$$b_4 = \frac{3q_4}{2h_4 + s} = \frac{3 \cdot 600}{2 \cdot 20{,}5 + 2} = 42 \text{ мм}.$$

Определим уширение в овальном калибре по формуле

$$\Delta b = 0{,}4 \sqrt{\Delta h_{ср} R_{к.ср}} \frac{\Delta h_{ср}}{c}.$$

В нашем случае

$$\Delta h_{ср} = c_б - \frac{q_4}{b_4} = 31 - \frac{600}{42} = 16{,}7 \text{ мм};$$

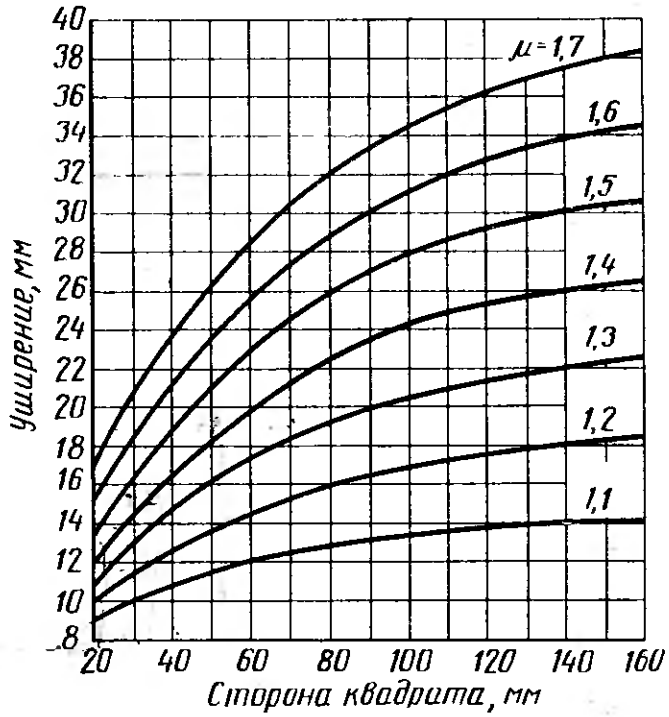



Рис. 86. Уширение при прокатке овальной полосы в квадратном калибре в валках диаметром 500 *мм*

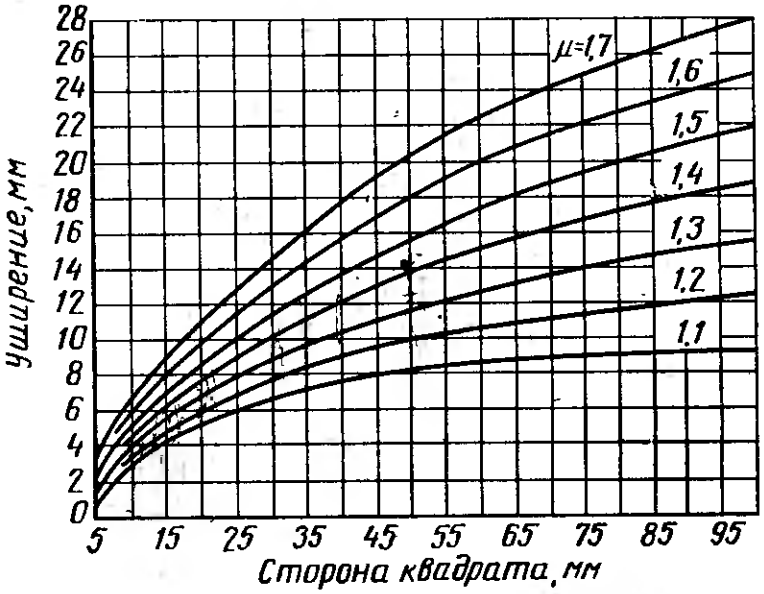



Рис. 87. Уширение при прокатке овальной полосы в квадратном калибре в валках диаметром 350 *мм*

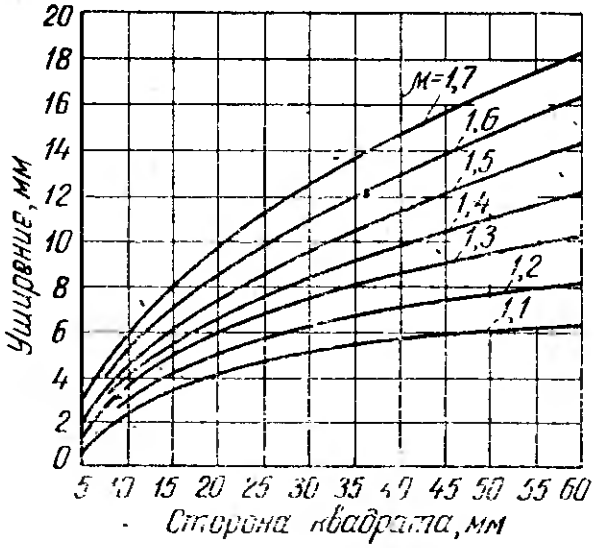



Рис. 88. Уширение при прокатке овальной полосы в квадратном калибре в валках диаметром 250 *мм*

$$R_{к.ср} = 0{,}5\,(325 - h_{ов.ср}) = 0{,}5\left(325 - \frac{600}{42}\right) = 155{,}4 \text{ мм};$$

$$\Delta b_4 = 0{,}4\sqrt{16{,}7 \cdot 155{,}4}\,\frac{16{,}7}{31} = 11 \text{ мм}.$$

Следовательно, ширина овала должна быть

$$b_4 = c_5 + \Delta b_4 = 31 + 11 = 42 \text{ мм}.$$

В нашем случае ширина овала составляет $b_4 = 42$ *мм*, следовательно, полученные размеры овала $h_4 \cdot b_4 = 20{,}5 \cdot 42$ *мм* оставляем без изменений.

Радиус очертания овала калибра *IV*

$$R_4 = \frac{42^2 + 18{,}5^2}{4 \cdot 18{,}5} = 28{,}5 \text{ мм};$$

$$h_4' = h_4 - s = 20{,}5 - 2 = 18{,}5 \text{ мм}.$$

Определим размеры чернового овала калибра *VI*, находящегося в обжимной клети ($D = 500$ *мм*).

Общая вытяжка между квадратами $c_0 = 45$ и 31 *мм* равна

$$\text{M} = \mu_6\mu_5 = \frac{45^2}{31^2} = 2{,}1.$$

Коэффициент вытяжки в квадратном калибре при $c_5 = 31$ *мм* равен

$$\mu_5 = \frac{0{,}5 + \sqrt{0{,}25 + 6 \cdot 2{,}1}}{3} = 1{,}36.$$

Коэффициент вытяжки в овальном калибре

$$\mu_6 = \frac{2{,}1}{1{,}36} = 1{,}54.$$

Площадь овала равна

$$q_6 = \mu_5 q_5 = 1{,}36 \cdot 935 = 1270 \text{ мм}^2.$$

Высоту овала определяем, найдя уширение овальной полосы в квадратном калибре $c_5 = 31$ *мм*.

По графикам (рис. 87 и 88) уширение при $\mu_5 = 1{,}36$ и $c_5 = 31$ равно $\Delta b_5 = 9{,}5$ *мм*.

Высота овала равна

$$h_6 = 1{,}41 \cdot c_5 - s - \Delta b_5 = 1{,}41 \cdot 31 - 3 - 9{,}5 = 31 \text{ мм}.$$

Ширина овала

$$b_6 = \frac{3 \cdot 1270}{2 \cdot 31 + 4} \approx 58 \text{ мм}.$$

Проверим уширение квадратной заготовки в овальном шестом калибре

$$\Delta b_6 = 0{,}4\sqrt{(45-21{,}9)\,239}\,\frac{45-21{,}9}{45} = 15 \text{ мм};$$

$$h_{ср} = \frac{1270}{58} = 21{,}9 \text{ мм};$$

$$R_{к.\,ср} = 0{,}5\,(500 - 21{,}9) = 15 \text{ мм}.$$

Необходимая ширина овала с учетом рассчитанного уширения должна быть равна

$$b_6 = c_5 + \Delta b_6 = 45 + 15 = 60 \text{ мм}.$$

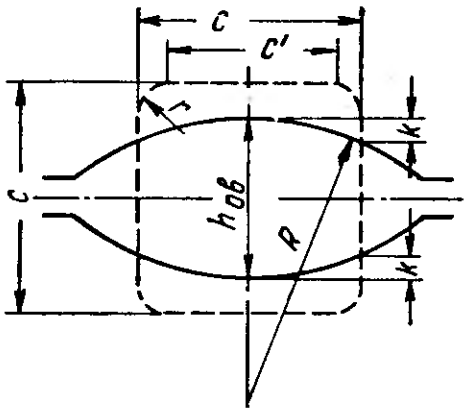



Рис. 89. К определению максимального обжатия при прокатке квадратной полосы в овальном калибре

Ширина овала, полученная по вытяжкам, равна $b_6 = 58$ *мм*. Принимаем окончательно размеры овала

$$h_6 \cdot b_6 = 31 \cdot 60 \text{ мм}.$$

Радиус очертания овала

$$R_6 = \frac{60^2 + (31-4)^2}{4\,(31-4)} = 40{,}2 \text{ мм}.$$

Определим углы захвата при прокатке квадрата в овальном калибре. Угол захвата определяем по максимальному обжатию (рис. 89)

$$\Delta h_{max} = c - h_{ов} + 2k,$$

где

$$2k = 2R - 2\sqrt{R^2 - 0{,}25c^2} = 2R\left(1 - \sqrt{1 - \frac{c^2}{4R^2}}\right) = mR. \quad (64)$$

Величину $m$ определяем по графику, приведенному на рис. 90.

При наличии закругления в квадрате можно принять в расчетах не значение стороны квадрата $c$, а величину

$$c' \approx c - r,$$

где $r \approx 0{,}15c$ — радиус закругления в квадратном калибре.

Определяем угол захвата при прокатке квадратной заготовки $45 \times 45$ *мм* в овале $31 \times 60$ *мм*.

Учитывая закругления, находим

$$c' \approx c - 0{,}15c = 0{,}85 \cdot c = 38 \text{ мм}.$$

Максимальное обжатие равно

$$\Delta h_{max} = c - h_{ов} + 2R - 2\sqrt{R^2 - 0{,}25c^2} =$$

$$= 45 - 31 + 2 \cdot 40{,}2 - 2\sqrt{40{,}2^2 - 0{,}25 \cdot 38^2} = 23{,}8 \text{ мм}.$$

Катающий диаметр равен

$$D_к = D - h_{ов} + 2R - 2\sqrt{R^2 - 0{,}25\,(c')^2} = 500 - 31 + 80{,}4 - 70{,}6 = 478{,}8 \text{ мм}.$$

Угол захвата в овальном калибре

$$\alpha_в = \arccos\left(1 - \frac{\Delta h_{max}}{D_к}\right) = \arccos\left(1 - \frac{23{,}8}{478{,}8}\right) = 18°.$$

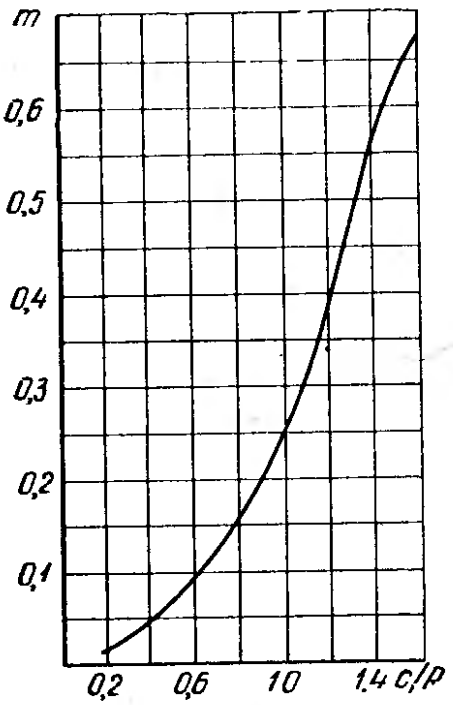



Рис. 90. Зависимость величины $m$ от отношения $c/R$

Угол захвата при прокатке квадрата 31×31 *мм* в овале 20,5×42 *мм*:

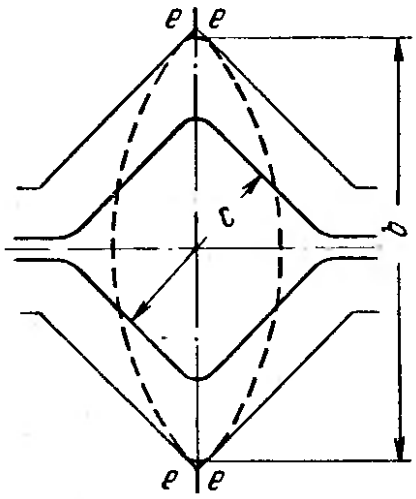



Рис. 91. Захват полосы при прокатке овала в квадрате

$$\Delta h_{max} = 31 - 20{,}5 + 2 \cdot 28{,}5 - 2\sqrt{28{,}5^2 - 0{,}25 \cdot 26{,}4^2} = 17{,}1 \text{ мм};$$

$$D_к = 325 - 20{,}5 + 2 \cdot 28{,}5 - 2\sqrt{28{,}5^2 - 0{,}25 \cdot 26{,}4^2} = 311{,}1 \text{ мм};$$

$$\alpha = \arccos\left(1 - \frac{\Delta h_{max}}{D_к}\right) = \arccos\left(1 - \frac{17{,}1}{311{,}1}\right) = 19°.$$

Угол захвата при прокатке квадрата 21,2×21,2 *мм* в овале 18,2×28,1 *мм*:

$$\Delta h_{max} = 21{,}2 - 18{,}2 + 2 \cdot 16{,}1 - 2\sqrt{16{,}1^2 - 0{,}25 \cdot 18^2} = 8{,}4 \text{ мм};$$

$$D_к = 325 - 18{,}2 + 2 \cdot 16{,}1 - 2\sqrt{16{,}1^2 - 0{,}25 \cdot 18^2} = 312{,}2 \text{ мм}.$$

$$\alpha = \arccos\left(1 - \frac{8{,}4}{312{,}2}\right) = 13°.$$

Определим углы захвата при прокатке овала в квадратном калибре. Как видно из рис. 91, овальная полоса в момент захвата соприкасается со стенками квадратного калибра не по оси, а в точках $e$.

Величину обжатия можно определить графически построением калибров. Приближенно можно принять максимальное обжатие по вертикальной оси калибра и соответственно этому обжатию определить угол захвата.

Определим угол захвата для калибра $V$ — чернового квадрата ($c_5 = 31$ *мм*), в который поступает овальная полоса $60 \times 31$ *мм*. Принимаем в квадратном калибре радиус закругления

$$r_5 \approx 0{,}15 c_5 = 0{,}15 \cdot 31 \approx 4{,}5 \text{ мм}.$$

Тогда высота квадратного калибра равна

$$h_5 = 1{,}41 \cdot c_5 - 0{,}82 r_5 = 1{,}41 \cdot 31 - 0{,}82 \cdot 4{,}5 = 40{,}1 \text{ мм}.$$

Максимальное обжатие равно

$$\Delta h_5 = b_6 - h_5 = 60 - 40{,}1 = 19{,}9 \text{ мм}.$$

Катающий диаметр по оси калибра

$$D_к = 325 - 40{,}1 = 284{,}9 \text{ мм}.$$

Угол захвата равен

$$\alpha = \arccos\left(1 - \frac{\Delta h_5}{D_к}\right) = \arccos\left(1 - \frac{19{,}9}{284{,}9}\right) = 21°30'.$$

Определим угол захвата в третьем калибре — квадрате ($c_3 = 21{,}2$ *мм*) при задаче овала $42 \times 20{,}5$ *мм*. Радиус закругления в квадрате

$$r_3 = 0{,}15 \cdot 21{,}2 = 3 \text{ мм}.$$

Высота калибра

$$h_3 = 1{,}41 c_3 - 0{,}82 \cdot r_3 = 1{,}41 \cdot 21{,}2 - 0{,}82 \cdot 3 = 27{,}5 \text{ мм}.$$

Обжатие равно

$$\Delta h_3 = b_4 - h_3 = 42 - 27{,}5 = 14{,}5 \text{ мм}.$$

Катающий диаметр

$$D = 325 - 27{,}5 = 297{,}5 \text{ мм}.$$

Угол захвата в третьем калибре

$$\alpha_3 = \arccos\left(1 - \frac{14{,}5}{297{,}5}\right) = 18°.$$

Определим угол захвата в чистовом круге.
Обжатие равно

$$\Delta h_1 = b_2 - d_1 = 28{,}1 - 20{,}2 = 7{,}9 \text{ мм}.$$

Катающий диаметр

$$D_к = 325 - 20{,}2 = 304{,}8 \text{ мм}.$$

Угол захвата равен

$$\alpha = \arccos\left(1 - \frac{7{,}9}{304{,}8}\right) = 13°.$$

При расчете площадей овальных и квадратных калибров пользовались приближенными формулами, а именно:

площадь квадратного калибра с закруглениями равна

$$q_{кв} \approx 0{,}97 \cdot c^2;$$

площадь овального калибра

$$q_{ов} = b_{ов}s + \frac{2}{3} b_{ов} (h_{ов} - s).$$

Для точного определения площади квадратных и овальных калибров необходимо пользоваться следующими формулами.

Для квадратного калибра с закруглениями

$$q_{кв} = c^2 - 0{,}43 \cdot r^2 - 0{,}5 \cdot s^2$$

или

$$q_{кв} = c^2 - 0{,}858 \cdot r^2.$$

При $r = 0{,}15c$ площадь квадрата равна

$$q_{кв} = c^2 - 0{,}858 \cdot 0{,}15^2 \cdot c^2 = 0{,}98c^2.$$

При $r = 0{,}2c$

$$q_{кв} = c^2 - 0{,}858 \cdot 0{,}2^2 c^2 = 0{,}96 \cdot c^2.$$

Таким образом, принимаемая площадь

$$q_{кв} = 0{,}97 \cdot c^2$$

отвечает среднему радиусу закругления $r \approx 0{,}18 \cdot c$.

Площадь овала равна

$$q_{ов} = bs + k_c b (h - s),$$

где $bs$ — площадь прямоугольника;

$k_c b (h - s)$ — площадь двух сегментов.

Коэффициент $k_c$ можно определить по графику, приведенному на рис. 20. Коэффициент $k_{сегм}$ изменяется в пределах 0,698 — 0,675. По приближенной формуле площадь овала равна

$$q_{ов} = bs + \frac{2}{3} b (h - s),$$

т. е. меньшее значение $k_{сегм}$. Например, площадь овала пятого калибра $60 \cdot 31$ *мм* по упрощенной формуле равна

$$q_б = 60 \cdot 4 + \frac{2}{3} 60 (31 - 4) = 1320 \text{ мм}^2,$$

а по точной формуле

$$q_б = 60 \cdot 4 + 0{,}693 \cdot 60 (31 - 4) = 1360 \text{ мм}^2$$

Однако упрощенная формула более удобна для определения размеров овального калибра, причем ширина овала получается несколько больше, что создает некоторый простор на уширение.

При малом отношении $\frac{b}{h-s}$ лучше пользоваться точной формулой для определения площади овала.

Результаты расчетов калибровки круглой стали диаметром 20 *мм* приведены в табл. 42.

**Калибровка круглої**

| Номер прохода | Номер калибра | Форма калибра | Размеры полосы, *мм* | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | *h* | *b* | *c* |
| | | Квадратная заготовка . . . | — | — | 45,0 |
| 1 | *VI* | Овал . . . . . | 31,0 | 60,0 | — |
| 2 | *V* | Квадрат . . . . . | 40,1 | 40,7 | 31,0 |
| 3 | *IV* | Овал . . . . . | 20,5 | 42,0 | — |
| 4 | *III* | Квадрат . . . . . | 27,5 | 27,9 | 21,2 |
| 5 | *II* | Овал . . . . . | 18,2 | 28,1 | — |
| 6 | *I* | Круг . . . . . | 20,2 | 20,2 | — |

Как уже указывалось, в чистовой линии ($D = 325$ *мм*) имеется пять проходов, овал $31 \times 60$ *мм* выходит из обжимной клети 500.

Коэффициенты вытяжки в первых по ходу прокатки калибрах изменились в связи с корректировкой размеров.

В графе уширения приводят простор на уширение, равный разнице между шириной калибра и шириной задаваемой полосы.

В большинстве случаев простор на уширение совпадает по величине с физическим уширением, т. е. предусматривают 100%-ное заполнение калибра металлом.

Зазоры принимают равными: 4 *мм*—в обжимной клети, 3 и 2 *мм* в чистовой линии. Все углы захвата не превышают допустимого ($\angle$ 22°).

## Построение чистового круга

Существуют разные способы построения чистового круга. Ниже приведен способ построения, который учитывает принятые допуски при прокатке [7, 9].

Определяем размеры круглого калибра для горячего профиля с учетом плюсового и минусового допусков и термического расширения металла:

$$d_г = (1{,}012 \div 1{,}015)\left(d + \frac{\Delta_1 - \Delta_2}{2}\right).$$

Строим правильный круг диаметром $d_г$ и на горизонтальной оси откладываем величину диаметра, отвечающую размеру с плюсовым допуском (рис. 92):

$$B_к = (d + \Delta_1)\,(1{,}012 \div 1{,}015).$$

Проводим касательные и наносим зазор

$$s = \left(\frac{1}{8} \div \frac{1}{25}\right) D,$$

Таблица 42

**стали диаметром 20 *мм***

| Максимальное обжатие $\Delta h$, *мм* | Простор на уширение $\Delta b$, *мм* | Площадь поперечного сечения $q$, *мм*$^2$ | Коэффициент вытяжки $\mu$ | Катающий диаметр $D_к$, *мм* | Угол захвата $\alpha$ |
|---|---|---|---|---|---|
| — | — | 1960 | — | — | — |
| 23,8 | 15,0 | 1320 | 1,49 | 478,8 | 18° |
| 19,9 | 9,7 | 930 | 1,42 | 284,9 | 21° 30′ |
| 17,1 | 11,0 | 601 | 1,54 | 311,1 | 19° |
| 14,5 | 7,4 | 438 | 1,38 | 297,5 | 18° |
| 8,4 | 6,9 | 360 | 1,22 | 312,2 | 13° |
| 7,9 | 2,0 | 321 | 1,12 | 304,8 | 13° |

где $D$ — диаметр валков.

У буртов делаем закругления радиусом

$$r \approx 0{,}1d,$$

где $d$ — номинальный диаметр круга.

Для круглых профилей малого диаметра у зазора снимают фаски.

Для обеспечения хорошего профиля без заусенцев рекомендуется строить чистовой круг с развалом, т. е. с выпуском [7].

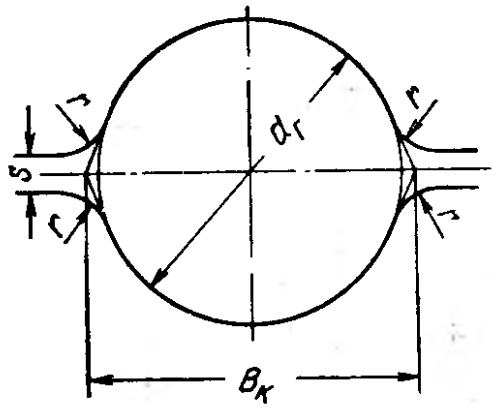



Рис. 92. Построение чистового калибра для прокатки круга

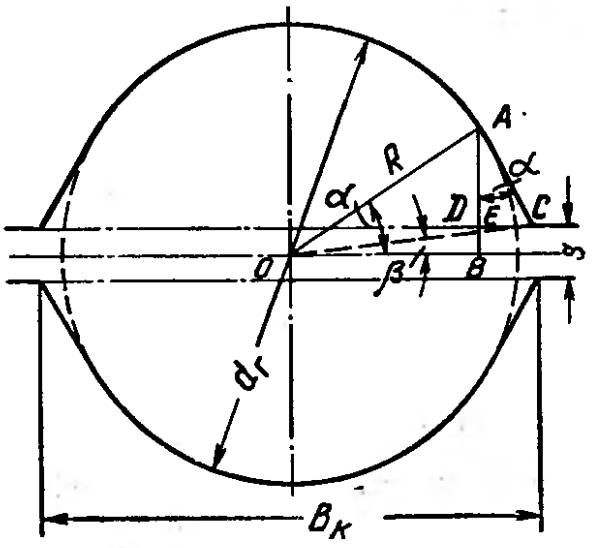



Рис. 93. Построение чистового калибра с выпуском для прокатки круга

В этом случае вычерчивают круг диаметром $d_г = 1{,}013d$ (рис. 93), а затем определяют горизонтальную ось в зависимости от задаваемого выпуска $k$. Как видно из рис. 93, выпуск на одну сторону калибра $k = \frac{AB}{OB} = \frac{DC}{AD}$ представляет собой тангенс угла наклона касательной $\alpha$.

Задаваясь выпуском $k$, находим значение $B_к$ по табл. 43.

Таблица 43

**Выпуски и значения горизонтального диаметра для чистового калибра**

| Диаметр чистового круга, *мм* | Выпуск $k$ | Угол наклона касательной $\alpha$ | Горизонтальный диаметр $B_к$ |
|---|---|---|---|
| 105—56 | 0,2 | 11° 20′ | $1{,}021 \cdot d_г - 0{,}2 \cdot s$ |
| 55—60 | 0,3 | 16° 40′ | $1{,}050 \cdot d_г - 0{,}3 \cdot s$ |
| 45—30 | 0,4 | 21° 50′ | $1{,}081 \cdot d_г - 0{,}4 \cdot s$ |
| 30—10 | 0,5 | 26° 35′ | $1{,}12 \cdot d_г - 0{,}5 \cdot s$ |

Радиус закругления у зазора принимают равным

$$r = (0{,}08 \div 0{,}1)\ d.$$

## Построение овалов и квадратов

Построение однорадиусного овала понятно из рис. 19.

Как было показано выше (см. гл. I), радиус очертания овала

$$R = \frac{b_{ов}^2 + h_{ов}'^2}{4h_{ов}'}.$$

Величину зазора $s$ принимают в пределах

$$s \approx (0{,}01 \div 0{,}05)\ D.$$

Черновые квадраты имеют закругления.

Геометрические размеры квадратного калибра равны (см. рис. 21)

$$h = b = 1{,}41 \cdot c,$$

где $c$ — сторона квадрата.

Фактические размеры квадрата следующие:

$$b_{кв}' = 1{,}41c - s;$$

$$h_{кв}' = 1{,}41c - 0{,}82\ r;$$

$$r = 0{,}15 \cdot c.$$

На рис. 94 приведена калибровка валков полунепрерывного стана 350 Череповецкого завода. Мелкие круги прокатываются в чистовой группе в калибрах овал—ребровый овал, крупные круги — по системе универсальной калибровки.

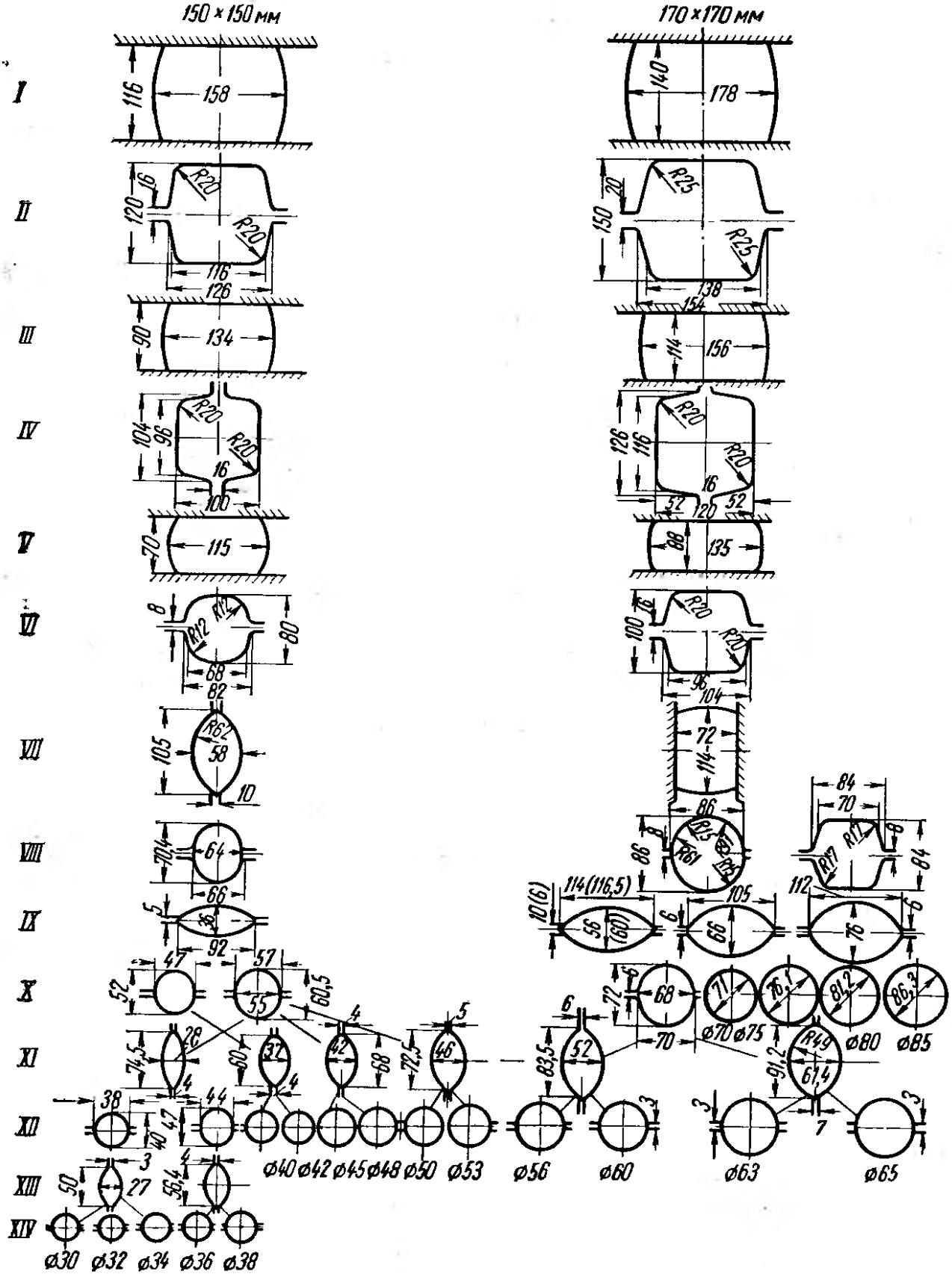



Рис. 94. Схема прокатки круглой стали на стане 350 Череповецкого металлургического завода

## 5. ПРОКАТКА И КАЛИБРОВКА КАТАНКИ НА ПРОВОЛОЧНЫХ СТАНАХ

Катанкой называют круглую сталь диаметром 5—9 *мм*, прокатываемую на проволочном стане и сматываемую в мотки. Согласно ГОСТ 2590—57, допускаемое отклонение по диаметру для катанки составляет ±0,5 *мм*.

Катанку прокатывают в основном на непрерывных проволочных станах [27, 29, 33] и, кроме того, на проволочных станах линейного типа.

На линейных станах заготовку сначала прокатывают в обжимной линии, состоящей из двух или трех клетей, после чего раскат задают в черновую и далее в первую и вторую чистовые линии. Обычно в первой клети обжимной линии применяют ящичные калибры, в остальных клетях обжимной линии, а также в черновой и чистовых линиях прокатку ведут в вытяжных калибрах системы овал-квадрат.

### Примерный расчет калибровки катанки диаметром 6,5 *мм* на непрерывном проволочном стане

Стан состоит из черновой группы (9 клетей), первой средней группы (4 клети), второй средней (4 клети) и двух чистовых групп (по 6 клетей).

На этом стане проволоку диаметром 5,5—6 *мм* можно прокатывать за 21 проход. Проволоку диаметром 6,5 *мм* катают за 19 проходов, для чего пропускают две клети (16 и 17) чистовой группы. Исходная заготовка имеет сечение 80×80 *мм* и длину 12 *м*.

На другом стане проволоку диаметром 6,5 *мм* прокатывают за 17 проходов из заготовки сечением 60×60 *мм*.

Основная деформация приходится на черновые группы, в которой обжатия выбирают, исходя из допускаемых углов захвата. В последних клетях (чистовая группа) коэффициенты вытяжки выбирают, исходя из требования получения точного профиля при минимальном износе калибров. В средних группах принимают коэффициенты вытяжки, отвечающие условию прокатки по системе овал—квадрат, обеспечивающей более интенсивные вытяжки.

При прокатке проволоки применяют в основном систему овал—квадрат.

Если номинальный диаметр проволоки равен 6,5 *мм*, то при допустимых отклонениях ±0,5 *мм* примем в основу расчета диаметр проволоки в холодном состоянии:

$$d_x = d - \frac{\Delta_1 - \Delta_2}{2} = 6{,}5 - \frac{0{,}5 - 0{,}5}{2} = 6{,}5 \text{ мм}.$$

Диаметр чистового круга в горячем состоянии

$$d_{19} = 1{,}014 \cdot d_x = 1{,}014 \cdot 6{,}5 = 6{,}6 \text{ мм}.$$

Площадь чистового круга

$$q_{19} = \frac{\pi d_{19}^2}{4} = \frac{\pi \cdot 6{,}6^2}{4} = 34{,}2 \text{ мм}^2.$$

Принимаем, что за 17 проходов можио прокатать проволоку диаметром 8 *мм*.

Для круга диаметром 8 *мм* в горячем состоянии

$$d_{17} = \left(8 - \frac{0{,}5 - 0{,}5}{2}\right) 1{,}014 = 8{,}1 \text{ мм}.$$

Тогда общая вытяжка между 17-м и 19-м проходами равна

$$M_{17-19} = \frac{8{,}1^2}{6{,}6^2} = 1{,}51.$$

Такая вытяжка за два последние прохода завышена, поэтому настройкой уменьшим размер раската в круглом калибре 17-го прохода так, чтобы иметь

$$M_{17-19} = 1{,}4 \div 1{,}45.$$

Принимая в чистовом 19-м проходе $\mu_{19} = 1{,}15$, получим в предчистовом овале

$$\mu_{18} = \frac{1{,}42}{1{,}15} \approx 1{,}23,$$

что отвечает вытяжке, определенной по графику (рис. 74).

Итак, площадь овала в 18-м проходе

$$q_{18} = 1{,}15 \cdot 34{,}2 = 39{,}3 \text{ мм}^2.$$

Площадь ребрового овала (круглый калибр) в 17-м проходе

$$q_{17} = 1{,}23 \cdot 39{,}2 = 48{,}5 \text{ мм}^2.$$

В клетях средних групп от 10-го до 17-го прохода прокатку ведут по системе овал—квадрат.

Основная деформация приходится на черновую группу, в которой вытяжки достигают 1,5 и более.

В средних группах общая вытяжка от квадрата к квадрату колеблется в пределах 1,7—1,5.

В трех парах калибров от 10-го до 17-го прохода устанавливаем следующие вытяжки от квадрата к квадрату.

$$M_{10-11} = 1{,}7; \quad M_{12-13} = 1{,}60; \quad M_{14-15} = 1{,}5.$$

Общий коэффициент вытяжки от 15-го до 17-го прохода (квадрат—овал—круг) примем $M_{15-17} = 1{,}45$, учитывая, что 17-й проход служит для получения проволоки диаметром 8 *мм*.

Размеры квадратных калибров приведены в табл. 44.

Таблица 44

**Размеры квадратных калибров средией и чистовой групп при прокатке катанки диаметром 6,5 *мм***

| Номер клети | Номер прохода | Площадь поперечиого сечения $q$, $мм^2$ | Коэффициеит вытяжки | Сторона квадрата $c$, $мм$ |
|---|---|---|---|---|
| 9 | 9 | 286 | — | 17 |
| 11 | 11 | 168 | 1,7 | 13,2 |
| 13 | 13 | 105,3 | 1,6 | 10,9 |
| 15 | 15 | 70,3 | 1,5 | 8,5 |
| 19 | 17 | 48,5 | 1,45 | — |

Таким образом, необходимо получить квадрат $c_{17} = 17$ *мм* в клети 9 черновой группы, $c_{11} = 13{,}2$ *мм* — в 11-м проходе (клеть 11), $c_{13} = 10{,}9$ *мм* — в 13-м проходе (клеть 13) и $c_{15} = 8{,}5$ *мм* — в 15-м проходе (клеть 15).

На основании размеров полученных квадратов определим размеры и площади промежуточных овалов и предчистового овала 18-го прохода (клеть 20 с вертикальными валками).

Уширение в чистовом круге можно определить по эмпирической формуле [5]

$$\Delta b_{19} = 0{,}03\sqrt{D}\sqrt{d} = 0{,}03\sqrt{270}\sqrt{6{,}6} \approx 1{,}3 \text{ мм}.$$

С некоторым резервом можно принять $\Delta b_{19} \approx 1{,}5$ *мм*. Тогда толщина предчистового овала

$$b_{18} = 6{,}6 - 1{,}5 = 5{,}1 \text{ мм}.$$

Высота предчистового овала

$$h_{18} = \frac{3q_{18}}{2b_{18} + s} = \frac{3 \cdot 39{,}3}{2 \cdot 5{,}1 + 1} = 10{,}5 \text{ мм}.$$

*Ребровый овал 17-го прохода*

Выше указывалось, что 17-й проход представляет собой круглый калибр для прокатки круга диаметром 8 *мм*, однако при прокатке катанки диаметром 6,5 *мм* этот калибр настраиваем на меньшее сечение площадью $q_{17} = 48{,}5$ $мм^2$. Если принять в этом калибре $\frac{h_{17}}{b_{17}} \approx 1{,}15$, то получим (см. рис. 20):

$$q_{17} = 0{,}75 \cdot h_{17} \cdot b_{17} = 0{,}75 \cdot 1{,}15 b_{17}^2 = 0{,}86 \cdot b_{17}^2 = 48{,}5 \text{ мм}^2,$$

откуда

$$b_{17} = \sqrt{\frac{48{,}5}{0{,}86}} \approx 7{,}5 \text{ мм};$$

$$h_{17} = 1{,}15 \cdot 7{,}5 = 8{,}6 \text{ мм}.$$

*Промежуточный овал 16-го прохода*

Общая вытяжка $M_{16-17} = 1{,}45$. Необходимо учитывать, что овал 16-го прохода является предчистовым овалом при прокатке круга диаметром 8 *мм*.

Можно принять в 16-м и 17-м проходах одинаковые вытяжки

$$\mu_{16} = \mu_{17} = \sqrt{1{,}45} \approx 1{,}21.$$

Тогда площадь овала после 16-го прохода равна

$$q_{16} = \mu_{17} \cdot q_{17} = 1{,}21 \cdot 48{,}5 \approx 58{,}5 \ мм^2.$$

При вытяжке $\mu = 1{,}21$ и ширине ребрового овала $b_{17} = 7{,}5$ *мм* уширение согласно графику (см. рис. 79) составляет 1,8 *мм*. Следовательно, толщина овала будет

$$b_{16} - b_{17} - \Delta b_{17} = 7{,}5 - 1{,}8 = 5{,}7 \ мм.$$

Высота овала (клеть с вертикальными валками)

$$h_{16} = \frac{3q_{16}}{2b_{16} + s} = \frac{3 \cdot 58{,}5}{2 \cdot 5{,}7 + 2} = 13{,}1 \ мм.$$

*Промежуточный овал 14-го прохода (клеть 14)*

Общая вытяжка $M_{14-15} = 1{,}5$. Примем коэффициент вытяжки в овале больше, чем в квадрате, однако при малых М отношение между вытяжками в овале и квадрате выравнивается [5], поэтому можно принять

$$\mu_{кв} = 1 + 1{,}25\,(\mu_{кв} - 1);$$

$$M = \mu_{кв}\mu_{ов} = \mu_{кв}\,[1 + 1{,}25\,(\mu_{кв} - 1)],$$

откуда

$$\mu_{кв} = \frac{0{,}25 + \sqrt{0{,}063 + 5M}}{2{,}5};$$

$$\mu_{кв} = \frac{M}{\mu_{кв}}.$$

В нашем случае

$$\mu_{15} = \mu_{кв} = \frac{0{,}25 + \sqrt{0{,}063 + 5 \cdot 1{,}5}}{2{,}5} = 1{,}2;$$

$$\mu_{14} = \mu_{ов} = \frac{1{,}5}{1{,}2} = 1{,}25.$$

Следовательно, площадь овала

$$q_{14} = \mu_{15} q_{15} = 1{,}2 \cdot 70{,}3 = 84{,}5 \ мм.$$

Уширение в квадратном калибре $c_{15} = 8{,}5$ при $\mu_{15} = 1{,}2$ согласно графику (см. рис. 87 и 88) равно $\Delta b_{15} \approx 3$ *мм*. Тогда высота овала после 14-го прохода составляет

$$h_{14} = 1{,}41 \cdot c_{15} - s - \Delta b_{15} = 1{,}41 \cdot 8{,}5 - 2 - 3 = 7 \text{ мм}.$$

Ширина овала

$$b_{14} = \frac{3q_{14}}{2h_{14} - s} = \frac{3 \cdot 84{,}5}{2 \cdot 7 + 2} = 15{,}8 \text{ мм}.$$

*Промежуточный овал 12-го прохода*

Общая вытяжка $M_{12-13} = 1{,}6$, откуда

$$\mu_{13} = \frac{0{,}25 + \sqrt{0{,}063 + 5 \cdot 1{,}6}}{2{,}5} \approx 1{,}24;$$

$$\mu_{12} = \frac{1{,}6}{1{,}24} = 1{,}29.$$

Площадь овала

$$q_{12} = \mu_{13} q_{13} = 1{,}24 \cdot 105{,}3 = 130 \text{ мм}^2.$$

Уширение в квадратном калибре согласно графику (см. рис. 87 и 88) составляет $\Delta b_{13} = 3{,}8$ *мм*. Высота овала 12-го прохода равна

$$h_{12} = 1{,}41 \cdot 10{,}9 - 2{,}5 - 3{,}8 = 9{,}1 \text{ мм}.$$

Ширина овала

$$b_{12} = \frac{3 \cdot 130}{2 \cdot 9{,}1 + 2{,}5} = 18{,}6 \text{ мм}.$$

*Промежуточный овал 10-го прохода*

Общая вытяжка $M_{10-11} = 1{,}7$, тогда

$$\mu_{11} = \frac{0{,}25 + \sqrt{0{,}063 + 5 \cdot 17}}{2{,}5} = 1{,}27;$$

$$\mu_{10} = \frac{1{,}7}{1{,}27} = 1{,}34.$$

Площадь овала

$$q_{10} = \mu_{11} \cdot q_{11} = 1{,}27 \cdot 168 = 214 \text{ мм}^2.$$

Уширение в квадратном калибре согласно графику (см. рис. 87 и 88) составляет $\Delta b_{11} = 5$ *мм*. Высота овала после 10-го прохода равна

$$h_{10} = 1{,}41 \cdot 13{,}2 - 2{,}5 - 5 = 11{,}1 \text{ мм}.$$

Ширина овала

$$b_{10} = \frac{3 \cdot 214}{2 \cdot 11{,}1 + 2{,}5} = 26 \text{ мм}.$$

Необходимо также проверить, достаточен ли простор на уширение при прокатке квадратной полосы в овальном калибре, для чего определим уширение по формуле

$$\Delta b = 0{,}4\sqrt{\Delta h_{ср} R_{к.ср}}\,\frac{\Delta h_{ср}}{c}.$$

Для примера определим уширение в овале 10-го прохода при задаче в него квадратной полосы $c_9 = 17$ *мм*. Принимаем $D_{10} = 350$ *мм*, тогда

$$0{,}4\sqrt{(c - h_{ов.ср})\,R_{к.ср}}\,\frac{c - h_{ов.ср}}{c} = 0{,}4\sqrt{(17 - 8{,}2)\,171}\,\frac{17 - 8{,}2}{17} =$$

$$= 0{,}4\sqrt{8{,}8 \cdot 171}\,\frac{8{,}8}{17} = 8 \text{ мм}.$$

Простор на уширение составляет

$$\Delta b_{пр} = b_{10} - c_9 = 26 - 17 = 9 \text{ мм}.$$

Так как простор на уширение больше уширения металла, то оставляем размеры овального калибра без изменения, имея в виду увеличение уширения при большем диаметре валков. Аналогичным образом проверяем уширение в других овалах (16, 14 и 12-го проходов).

### *Расчет размеров калибров черновой группы, состоящей из девяти клетей*

В черновой группе непрерывного проволочного стана первые две-три клети имеют прямоугольные калибры, в остальных клетях применяют систему овал—квадрат.

Более рациональной следует признать систему шестигранник—квадрат. Шестигранные калибры обеспечивают надежную кантовку при задаче в следующую клеть. Такие калибры характеризуются простотой формы, а наличие зазоров позволяет регулировать размеры прокатываемого раската.

В нашем случае для девяти клетей черновой группы устанавливаем по клетям следующие калибры: 1) прямоугольник, 2) прямоугольник, 3) ящичный квадрат, 4) шестигранник, 5) квадрат, 6) шестигранник, 7) квадрат, 8) шестигранник, 9) квадрат. Сечение исходной заготовки имеет размеры $80 \times 80$ *мм*, а сторона квадрата девятой клети равна $c_9 = 17$ *мм*. Расчет по системе шестигранник—квадрат аналогичен расчету системы овал—квадрат. Сначала устанавливаем коэффициенты вытяжки от квадрата к квадрату, а затем определяем размеры промежуточных шестигранников.

Как показывает анализ системы шестигранник—квадрат, применяемой на непрерывных проволочных станах, можно принимать вытяжку от квадрата к квадрату:

$$M = \mu_ш \mu_{кв} = 2 \div 2{,}3.$$

Примем в нашем случае M = 2,25. Тогда получим следующие размеры квадратов в черновой группе.

В клети 9

$$c_9 = 17 \text{ мм}; \; q_9 = 275 \text{ мм}^2.$$

В клети 7

$$q_7 = 2{,}25 \cdot 285 = 640 \text{ мм}^2;$$

$$c_7 = \sqrt{1{,}03 \cdot 640} = 25{,}7 \text{ мм}.$$

В клети 5

$$q_5 = 2{,}25 \cdot 640 = 1440 \text{ мм}^2;$$

$$c_5 = \sqrt{1{,}03 \cdot 1440} = 38{,}5 \text{ мм}.$$

В клети 3

$$q_3 = 2{,}25 \cdot 1440 = 3250 \text{ мм}^2;$$

$$c_3 = \sqrt{1{,}03 \cdot 3250} \approx 58 \text{ мм}.$$

Определим коэффициенты вытяжки отдельно в шестигранных и квадратных калибрах. Для этого установим отношение между вытяжками в этих калибрах.

В шестигранных калибрах можно принять

$$\mu_ш = 1 + 1{,}5 \, (\mu_{кв} - 1),$$

т. е. такое же соотношение вытяжек, что и для системы овал—квадрат.

Следовательно:

$$M = \mu_ш \mu_{кв} = [1 + 1{,}5 \, (\mu_{кв} - 1)] \, \mu_{кв}.$$

Решая это уравнение, получим

$$\mu_{кв} = \frac{0{,}5 + \sqrt{0{,}25 + 6M}}{3}.$$

Подставляя M = 2,25, получим

$$\mu_{кв} = \frac{0{,}5 + \sqrt{0{,}25 + 6 \cdot 2{,}25}}{3} = 1{,}40.$$

В шестигранном калибре вытяжка равна

$$\mu_ш = \frac{M}{\mu_{кв}} = \frac{2{,}25}{1{,}40} = 1{,}61.$$

Зная коэффициенты вытяжки, определяем площади овальных и шестигранных калибров (см. табл. 44).

Зная площади шестигранных калибров, определим их размеры. Согласно рис. 95, принимаем ширину горизонтальной грани $b' \approx 0{,}4b$, тогда площадь шестигранного калибра равна

$$q_ш = bs + 0{,}7b\,(h - s) = (0{,}7h + 0{,}3s)\,b,$$

где $s$ — зазор между валками.

Если известна площадь и высота шестигранника, то ширина его будет равна

$$b = \frac{q_ш}{0{,}7h + 0{,}3s}.$$

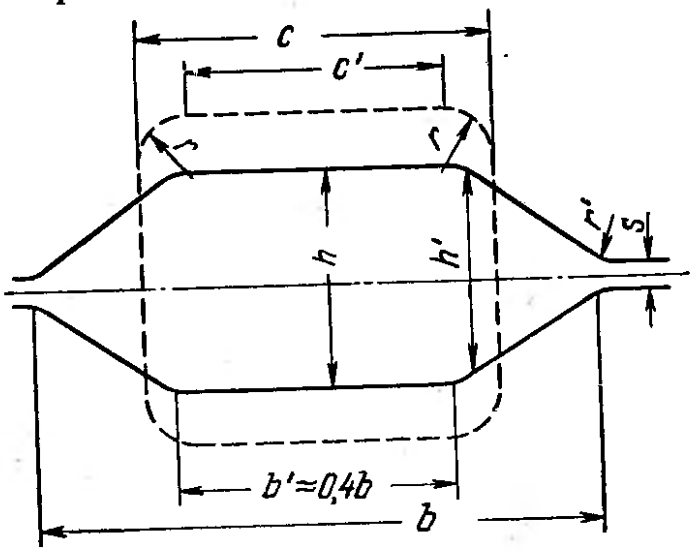


Рис. 95. Условия захвата квадратной полосы в шестигранном калибре

Для определения уширения при прокатке шестигранника в квадратном калибре будем пользоваться теми же графиками, что и для системы овал — квадрат. Следовательно, методика определения размеров шестигранных калибров такая же, как и для овальных калибров.

## *Калибр VIII — шестигранник*

Площадь этого калибра $q_8 = 410$ *мм*$^2$. По графику (см. рис. 87) находим уширение для валков диаметром $D = 350$ *мм*, $\mu_9 = 1{,}44$ и $c_9 = 17$ *мм*. Уширение равно $\Delta b_9 = 7$ *мм*. Зазор между валками для квадратного калибра клети 9 принимаем $s_9 = 4$ *мм*. Тогда толщина (высота) шестигранника будет равна

$$h_8 = 1{,}41 \cdot c_9 - s_9 - \Delta b_9 = 1{,}41 \cdot 17 - 4 - 7 = 13 \text{ мм}.$$

Ширина шестигранника

$$b_8 = \frac{400}{0{,}7 \cdot 13 + 0{,}3 \cdot 4} = 39 \text{ мм}.$$

Параллельная часть калибра

$$b'_8 = 0{,}4 \cdot 39 = 15{,}5 \text{ мм}.$$

Радиусы закругления по дну калибра и у буртов принимаем равными (0,7÷0,8) $h$. В нашем случае принимаем $r = 10$ *мм*. Проверим уширение при задаче квадратной полосы в шестигранный калибр, пользуясь формулой уширения

$$\Delta b = 0{,}4 \sqrt{\Delta h_{ср} R_{к.\,ср}}\,\frac{\Delta h_{ср}}{H_{ср}};$$

$$\Delta h_{ср} = c_7 - \frac{q_8}{b_8} = 25{,}7 - \frac{400}{39} = 25{,}7 - 10{,}3 = 15{,}4 \text{ мм};$$

$$R_{к.\,ср} = 0{,}5\,(D - h_{ср}) = 0{,}5\,(350 - 10{,}3) = 169{,}9\ мм;$$

$$\Delta b_8 = 0{,}4\sqrt{15{,}4 \cdot 169{,}9}\,\frac{15{,}4}{25{,}7} = 12{,}3\ мм.$$

Простор на уширение составляет

$$\Delta b_{пр} = 39 - 25{,}7 = 13{,}3\ мм.$$

Оставляем ширину

$$b_8 = 39\ мм.$$

*Калибр VI — шестигранник*

Площадь калибра $q_6 = 895\ мм^2$. Диаметр валков $D = 450\ мм$, вытяжка в квадратном калибре $\mu_7 = 1{,}44$, сторона квадрата $c_7 = 25{,}7\ мм$. Уширение по графику $\Delta b_7 = 12{,}5\ мм$. Размеры шестигранного калибра

$$h_6 = 1{,}41 \cdot 25{,}7 - 4 - 12{,}5 = 19{,}8\ мм;$$

$$b_6 = \frac{895}{0{,}7 \cdot 19{,}8 + 0{,}3 \cdot 6} = 57\ мм.$$

Ширина горизонтальной грани калибра

$$b_6' = 0{,}4 \cdot 57 = 23\ мм.$$

Радиус закругления

$$r = 15\ мм.$$

Проверим уширение при задаче квадратной полосы в шестигранный калибр:

$$\Delta h_{ср} = c_5 - \frac{q_6}{b_6} = 38{,}5 - \frac{895}{57} = 22{,}8\ мм;$$

$$R_{к.\,ср} = 0{,}5\,(450 - 15{,}7) = 217{,}2\ мм;$$

$$\Delta b_6 = 0{,}4\sqrt{22{,}8 \cdot 217{,}2}\,\frac{22{,}8}{38{,}5} = 16{,}7\ мм.$$

Простор на уширение составляет

$$\Delta b_{пр} = 57 - 38{,}5 = 18{,}5\ мм.$$

Ширину калибра $b_6 = 57\ мм$ оставляем без изменения.

*Калибр IV — шестигранник*

Площадь калибра $q_4 = 2020\ мм^2$. Диаметр валков $D = 450\ мм$, вытяжка $\mu_5 = 1{,}44$, сторона квадрата $c_5 = 38{,}5\ мм$. Уширение по графику $\Delta b_5 = 14{,}5\ мм$.

Размеры шестигранного калибра:

$$h_4 = 1{,}41 \cdot 38{,}5 - 6 - 14{,}5 = 33{,}8 \text{ мм};$$

$$b_4 = \frac{2020}{0{,}7 \cdot 33{,}8 + 0{,}3 \cdot 7} = 78{,}5 \text{ мм}.$$

Параллельная часть калибра

$$b_4' = 0{,}4 \cdot 78{,}5 \approx 32 \text{ мм}.$$

Радиус закругления принимаем

$$r = 25 \text{ мм}.$$

Определим уширение в шестигранном калибре:

$$\Delta h_{ср} = c_3 - \frac{q_4}{b_6} = 58{,}0 - \frac{2020}{78{,}5} = 32{,}2 \text{ мм};$$

$$R_{к.\,ср} = 0{,}5\,(450 - 25{,}8) = 212{,}1 \text{ мм};$$

$$\Delta b_4 = 0{,}4 \sqrt{32{,}2 \cdot 212{,}1}\,\frac{32{,}2}{58{,}0} = 18{,}4 \text{ мм}.$$

Простор на уширение составляет

$$\Delta b_{пр} = 78{,}5 - 58{,}0 = 20{,}5 \text{ мм}.$$

Ширину калибра $b_4 = 78{,}5$ *мм* оставляем без изменения, учитывая, что небольшая настройка калибра в сторону меньшего зазора может дать уширение больше рассчитанного.

### *Определение размеров прямоугольных калибров в клетях 1 и 2 черновой группы*

В первых трех клетях черновой группы принимаем прямоугольные калибры, которые требуют меньших врезов в валки и обеспечивают удобную регулировку валков.

В табл. 45 приведена схема прокатки, из которой видно, что заготовку в двух первых клетях обжимают в одном направлении, а затем раскат кантуют и задают в третью клеть, где имеется ящичный квадрат.

Примем предварительно уширение в клети 3 равным $\Delta b_3 \approx \approx 10$ *мм*. Тогда задаваемая высота $h_2$ будет равна

$$h_2 = b_3 - \Delta b_3 = 58{,}0 - 10 = 48{,}0 \text{ мм}.$$

Следовательно, за два прохода (клети 1 и 2) полоса будет обжата на

$$\Delta h_1 - \Delta h_2 = 80 - 48{,}0 = 32 \text{ мм}.$$

Примем обжатие в клети 1 равным $\Delta h_1 = 15$ *мм*, тогда

$$h_1 = h_0 - \Delta h_1 = 80 - 15 = 65 \text{ мм},$$

| Группа клетей | Номер клети | Номер прохода | Форма калибра | Размеры калибров, мм | | Размеры полосы | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | высота $h$ | ширина $b$ | высота $h$, мм | ширина $b$, мм | сторона квадрата $c$, мм | площадь сечения $q$, мм² |
| Черновая | | | | Заготовка | | 80 | 80 | 80 | 6250 |
| | 1 | 1 | Прямоугольник . . | 65 | 90 | 65 | 85 | — | 5400 |
| | 2 | 2 | » . . | 48 | 95 | 48 | 90 | — | 4230 |
| | 3 | 3 | » . . | 58 | 65 | 58 | 58 | 58 | 3250 |
| | 4 | 4 | Шестигранник . . | 33,8 | 79 | 33,8 | 78,5 | — | 2020 |
| | 5 | 5 | Квадрат . . . . . | 48,3 | 48,3 | 48,3 | 48,3 | 38,5 | 1440 |
| | 6 | 6 | Шестигранник . . . | 19,8 | 58 | 19,8 | 57,0 | — | 895 |
| | 7 | 7 | Квадрат . . . . . | 32,3 | 32,3 | 32,3 | 32,3 | 25,7 | 640 |
| | 8 | 8 | Шестигранник . . . | 13 | 40 | 13 | 39 | — | 400 |
| | 9 | 9 | Квадрат . . . . | 20 | 20 | 20 | 20 | 17 | 286 |
| Первая средняя | 10 | 10 | Овал . . . . . | 11,1 | 27 | 11,1 | 26 | — | 214 |
| | 11 | 11 | Квадрат . . . . | 16,1 | 16,1 | 16,1 | 16,1 | 13,2 | 168 |
| | 12 | 12 | Овал . . . . . | 9,1 | 19,5 | 9,1 | 18,6 | — | 130 |
| | 13 | 13 | Квадрат . . . . . | 13,9 | 13,9 | 13,9 | 13,9 | 10,9 | 105,3 |
| Вторая средняя | 14 | 14 | Овал . . . . . | 7 | 16,5 | 7 | 15,8 | — | 84,5 |
| | 15 | 15 | Квадрат . . . . . | 10 | 10 | 10 | 10 | 8,5 | 70,3 |
| Чистовая | 16 | 16 | Овал . . . . . | 13,5 | 5,7 | 13,1 | 5,7 | — | 58,5 |
| | 17 | 17 | Ребровый овал (круг) . . . . . | 8,6 | 8,1 | 8,6 | 7,5 | — | 48,5 |
| | 18 | 18 | Предчистовой овал | 12 | 5,1 | 10,5 | 5,1 | — | 39,3 |
| | 19 | 19 | Чистовой круг . . | 6,6 | 6,6 | 6,6 | 6,6 | — | 34,2 |

Таблица 45

диаметром 6,5 *мм*

| Коэффициент вытяжки μ | Обжатие $\Delta h$, *мм* | Уширение $\Delta b$, *мм* | Максимальный угол захвата α | Начальный диаметр $D$, *мм* | Средний катающий диаметр $D_{к.ср}$, *мм* | *n*, *об/мин* | Скорость прокатки *v*, *м/сек* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| — | — | — | — | — | — | — | — |
| 1,16 | 15 | 5 | 16° | 450 | 385 | 12,7 | 0,255 |
| 1,28 | 17 | 5 | 16°30′ | 450 | 402 | 15,6 | 0,330 |
| 1,30 | 32 | 10 | 23°18′ | 450 | 392 | 20,8 | 0,428 |
| 1,61 | 24,2 | 20,5 | 19° 48′ | 450 | 424,3 | 31,0 | 0,690 |
| 1,40 | 30,2 | 14,5 | 22° 18′ | 450 | 420,2 | 43,6 | 0,693 |
| 1,61 | 18,7 | 18,5 | 16° | 450 | 434,3 | 68,3 | 1,55 |
| 1,40 | 24,7 | 12,5 | 19° 48′ | 450 | 430,2 | 132,5 | 2,99 |
| 1,61 | 12,7 | 14,3 | 15° | 350 | 339,7 | 195,0 | 3,48 |
| 1,40 | 19 | 7 | 19° 30′ | 350 | 335,7 | 276,0 | 4,86 |
| 1,34 | 5,9 | 9 | — | 300 | 291,8 | 424,0 | 6,50 |
| 1,27 | 9,9 | 5 | — | 300 | 289,6 | 526,0 | 8,03 |
| 1,30 | 4,1 | 5,4 | — | 300 | 293,0 | 695,0 | 10,7 |
| 1,24 | 4,7 | 3,8 | — | 300 | 292,4 | 862 | 13,30 |
| 1,25 | 3,9 | 4,9 | — | 300 | 294,6 | 1068 | 16,57 |
| 1,20 | 5,8 | 3 | — | 300 | 293,0 | 1285 | 19,80 |
| 1,21 | 2,8 | 4,6 | — | 250 | 245,5 | 1840 | 24,70 |
| 1,21 | 4,5 | 1,8 | — | 250 | 243,5 | 2240 | 28,60 |
| 1,23 | 2,4 | 1,9 | — | 250 | 246,3 | 2740 | 35,40 |
| 1,15 | 3,9 | 1,5 | — | 250 | 244,8 | 3120 | 40,0 |

Уширение в клети 1 по формуле А. П. Чекмарева составляет $\Delta_1 \approx 5$ *мм*.

Ширина полосы

$$b_1 = b_0 + \Delta b_1 = 80 + 5 = 85 \text{ мм}.$$

В клети 2 при обжатии $\Delta h_2 = 17$ *мм* уширение также составляет $\Delta b_2 \approx 5$ *мм*, следовательно:

$$h_2 = h_1 - \Delta h_2 = 65 - 17 = 48 \text{ мм};$$

$$b_2 = b_1 + \Delta b_2 = 85 + 5 = 90 \text{ мм}.$$

Определим уширение в клети 3, в которую раскат задают после кантовки на 90° (размеры калибра $b_3 \cdot h_3 = 58 \times 58$ *мм*):

$$\Delta b_3 = \frac{2 \cdot 58{,}0 \cdot 32 \cdot 0{,}8}{(90 + 58{,}0)\left[1 + (1 + 0{,}4)\frac{58{,}0}{196 \cdot 0{,}40}\right]} \approx 10 \text{ мм}.$$

Следовательно, мы правильно выбрали уширение в клети 3 и корректировки не делаем, хотя такая корректировка не представляет трудностей.

Если бы расчетное уширение не совпало с заданным, то несколько изменились бы высота $h_2$ и обжатие в клетях 1 и 2. Учитывая, что уширение можно принимать с различной степенью ограничения, принятое уширение в клетях 1 и 2 ($\Delta b_1 = 5$ *мм* и $\Delta b_2 = 5$ *мм*) осталось бы без изменения.

Определив размеры прямоугольных и шестигранных калибров, рассчитываем углы захвата, уточняем площади калибров, коэффициенты вытяжки, находим числа оборотов по клетям, пользуясь константой непрерывной прокатки, и т. д. Все эти данные заносим в табл. 45.

При определении окружной скорости валков и чисел оборотов по клетям исходим из постоянства секундных объемов, пользуясь константой калибровки.

В табл. 45 скорость выхода проволоки из последней клети принята $v_{21} = 40$ *м/сек*, чему соответствует $n_{21} = 3120$ *об/мин*.

Константа калибровки равна

$$k = q_{21} D_{к21} n_{21} = 34{,}2 \cdot 244{,}8 \cdot 3120 = 26{,}5 \cdot 10^6.$$

Катающий диаметр определяем по средней высоте калибра

$$D_к = D - \frac{q}{b}.$$

Для черновой группы определили максимальные углы захвата, которые при задаче шестигранника в квадратный калибр отвечают обжатию посередине калибра. При задаче квадратной полосы в шестигранный калибр максимальный угол захвата получается по ребрам (углам) задаваемого квадрата (см. рис. 95).

Учитывая закругления, ширину квадратной полосы принимаем равной

$$c' = c - r,$$

где $r \approx 0{,}15 \cdot c$ — радиус закругления квадратного раската.

Следовательно, $c' \approx 0{,}85c$.

Если $c' < b'$, то угол захвата определяем посередине калибра. Если же $c' > b'$, то необходимо определить высоту $h'$, которая, согласно рис. 95, равна

$$h' = h - \frac{(h - s)\ (c' - b')}{b - b'}, \qquad (65)$$

где $\frac{h - s}{b - b'}$ — тангенс угла наклона граней шестигранного калибра.

Углы захвата для шестигранных калибров клетей 4, 6 и 8 определили по приведенной формуле, так как $c' > b'$, следовательно максимальные углы захвата приходятся на ребра задаваемого квадрата. Максимальный угол захвата составляет 23° 18′, т. е. меньше допускаемых углов захвата в черновой группе, составляющих 26÷28°.

При расчете шестигранных калибров ширину последних можно принять несколько больше ширины прокатываемого раската (на 1—3 *мм*). При расчете прямоугольных калибров можно руководствоваться указаниями, данными для случая расчета калибровки черновой группы мелкосортного стана [1].

При бесконечной прокатке часовая производительность для нашего случая составит на одну нитку

$$p' = 3600 \cdot q_{21} \cdot v_{21} = 3600 \cdot 34{,}2 \cdot 40 = 49\,000 \ кг/ч.$$

Следовательно, возможная часовая производительность стана при прокатке в четыре нитки будет равна

$$p = 49 \cdot 4 = 196 \ т/ч.$$

Если принять коэффициент использования стана $K \approx 0{,}85$, то годовая производительность такого стана при 7000 *ч* работы в год будет равна

$$P = 0{,}85 \cdot 7000 \cdot 196 \approx 1\,150\,000 \ т$$

или по годному

$$P_г = \frac{1\,150\,000}{1{,}05} = 1\,100\,000 \ т.$$

В табл. 46 приведена заводская калибровка катанки диаметром 6,5 *мм*, прокатываемой из заготовки 60×60 *мм* за 17 проходов.

[1] См. с. 193.

Таблица 46

## Калибровка катанки диаметром 6,5 *мм* из заготовки 60×60 *мм*

| Группа | Номер клети | Форма калибра | Размеры калибра, *мм* | | Размеры полосы | | | | Коэффициент вытяжки | Обжатие, *мм* | Угол захвата $\alpha$ | Диаметр валков, *мм* | | *n*, *об/мин* | Скорость прокатки, *м/сек* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | ширина | зазор | высота, *мм* | ширина, *мм* | сторона квадрата или круга, *мм* | площадь сечения, *мм²* | | | | номинальный | катающий | | |
| | | Заготовка | | | | | 60 | 3530 | | | | | | | |
| Черновая | 1 | Прямоугольник | 70 | 11 | 41 | 69 | — | 2530 | 1,4 | 19 | 17° 30′ | 470 | 445 | 15 | 0,36 |
| | 2 | Шестиугольник | 84 | 5,5 | 25,5 | 80 | — | 1800 | 1,41 | 15,5 | 15° 10′ | 470 | 454 | 21,2 | 0,5 |
| | 3 | Квадрат | 45,2 | 4,8 | 45 | 44 | 35,4 | 1220 | 1,47 | 35 | 25° 10′ | 430 | 410 | 33,6 | 0,745 |
| | 4 | Овал | 56,8 | 4,9 | 18,2 | 56,8 | — | 790 | 1,55 | 17,2 | 18° | 430 | 421 | 52,2 | 1,15 |
| | 5 | Ребровый овал | 26,7 | 3 | 29 | 24,6 | — | 540 | 1,46 | 27,8 | 23° | 380 | 361 | 88 | 1,68 |
| | 6 | Ромб | 41 | 2,7 | 15,2 | 39 | — | 362 | 1,48 | 9,4 | 13° 40′ | 370 | 363 | 132 | 2,5 |
| | 7 | Квадрат | 20,1 | 3,3 | 21,3 | 20 | 16,6 | 264 | 1,37 | 17,7 | 18° | 365 | 356 | 184,5 | 3,43 |
| Первая средняя | 8 | Шестиугольник | 27 | 3,5 | 9,2 | 25 | — | 204 | 1,3 | 7,4 | — | 335 | 330 | 259 | 4,45 |
| | 9 | Квадрат | 15,9 | 2,2 | 15,6 | 15,5 | 12,85 | 157 | 1,3 | 9,4 | — | 323 | 318 | 353 | 5,8 |
| | 10 | Овал | 20,3 | 3,1 | 7,9 | 20 | — | 127 | 1,24 | 4,95 | — | 335 | 332 | 413 | 7,15 |
| | 11 | Квадрат | 12,7 | 2,2 | 12,6 | 12,5 | 10,55 | 104 | 1,22 | 7,4 | — | 323 | 318 | 523 | 8,7 |
| Вторая средняя | 12 | Овал | 16,6 | 2,9 | 6,5 | 16 | — | 85 | 1,23 | 4,05 | — | 335 | 332 | 620 | 10,7 |
| | 13 | Квадрат | 10,2 | 2,0 | 10,5 | 10 | 8,6 | 70 | 1,21 | 5,5 | — | 335 | 331 | 750 | 13 |
| Чистовая | 16в | Овал | 13 | 2,8 | 5,5 | 12,8 | — | 59 | 1,19 | 3,1 | — | 277 | 275 | 1070 | 15,4 |
| | 17 | Круг | 8,5 | 1,7 | 8,3 | 7,6 | — | 49 | 1,2 | 4,5 | — | 265 | 260 | 1370 | 18,6 |
| | 18в | Овал | 11,2 | 1,6 | 4,8 | 10,4 | — | 40 | 1,22 | 2,8 | — | 277 | 275 | 1580 | 22,8 |
| | 19 | Круг | 7,2 | 1,5 | 6,6 | 6,6 | 6,6 | 34,2 | 1,17 | 3,8 | — | 280 | 276 | 1840 | 26,6 |

## 6. ПРОКАТКА И КАЛИБРОВКА ПЕРИОДИЧЕСКИХ ПРОФИЛЕЙ АРМАТУРНОЙ СТАЛИ

Периодический профиль для армирования железобетонных конструкций, согласно ГОСТ 5781—61, представляет собой круглый стержень с выступами, идущими по трехзаходной винтовой линии с двумя продольными ребрами (рис. 96).

Арматурную сталь прокатывают диаметром 6—90 *мм*, причем номинальный диаметр $d_н$ *мм* представляет собой примерно средний диаметр между наружным $d_1$ и внутренним $d$ диаметрами.

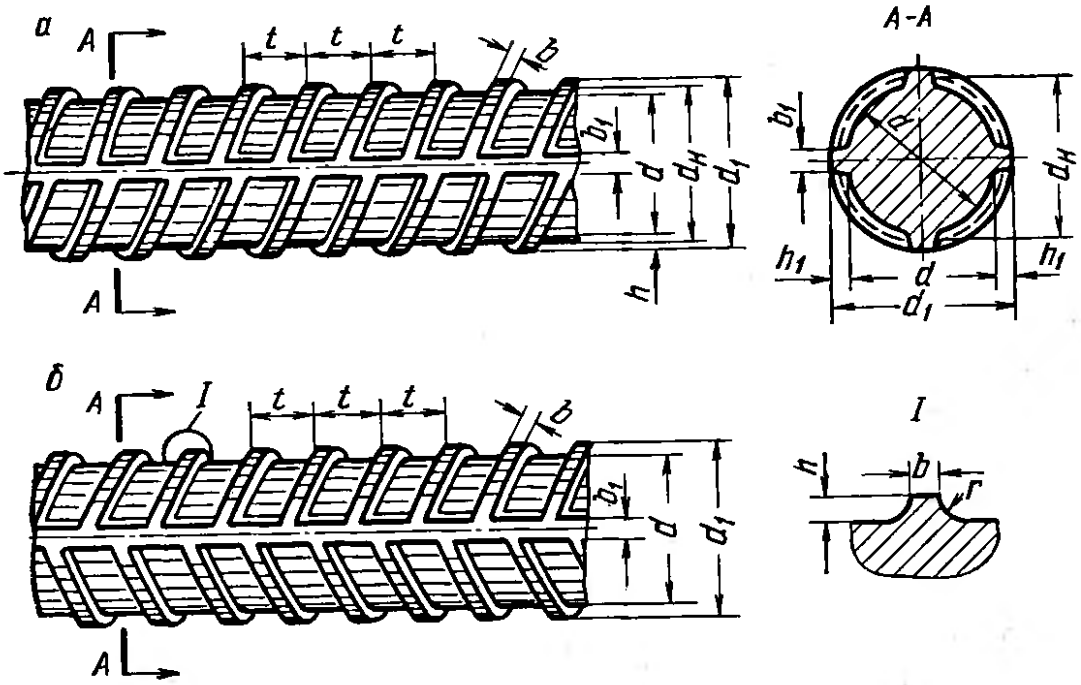



Рис. 96. Периодический профиль арматурной стали

В ГОСТе указаны высота $h$ и ширина $b$ спирали, расстояние между витками $t$ и другие размеры. Этот профиль изготовляют из стали Ст. 5 и низколегированной.

Арматурную сталь прокатывают на сортовых и проволочных станах, причем общая схема калибровки остается такой же, как и для круга соответствующего размера. Особенность калибровки заключается в форме чистового калибра и предчистового овала, а в отдельных случаях и предовального калибра. Все же остальные калибры до исходной заготовки остаются без изменения.

Чистовой калибр (рис. 97) для арматурной стали изготовляют в две операции: сначала растачивают круглый калибр определенного диаметра, после чего фрезеруют поверхность ручья для образования впадин [7].

Прокатку ведут с минусовыми допусками по диаметру, которые, согласно ГОСТ 5781—61, колеблются от +0,3 и —0,5 для профилей диаметром 6÷20 *мм* и до +0,5 и —1,3 *мм* для профилей диаметром 90 *мм*.

Важное значение при прокатке арматурной стали имеет правильный выбор формы и размеров предчистового овала. В работе

[7] рекомендуется применять предчистовой овал с плоскими и вогнутыми гранями (рис. 98).

При прокатке арматурной стали на непрерывных мелкосортных станах применяют обычные однорадиусные овалы, которые служат

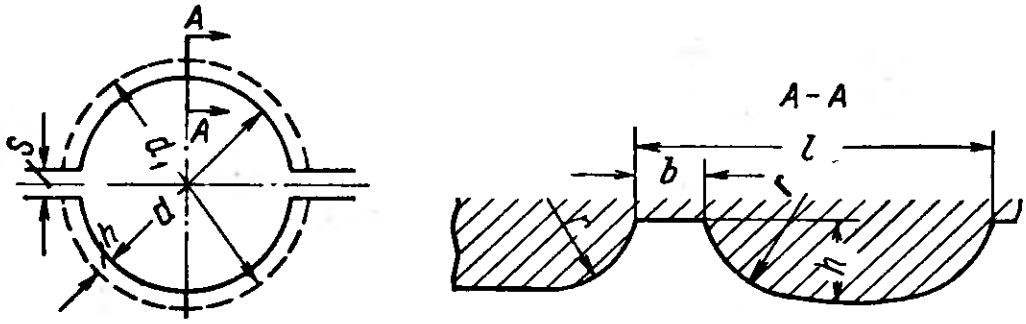



Рис. 97. Чистовой калибр для прокатки круглой арматурной стали

для прокатки кругов соответствующих размеров. Так, например, на Криворожском металлургическом заводе применяют одинаковые предчистовые овалы для прокатки круглой стали определенного диаметра и для прокатки арматурной стали соответствующего размера (например, арматурная сталь диаметром 10 *мм*).

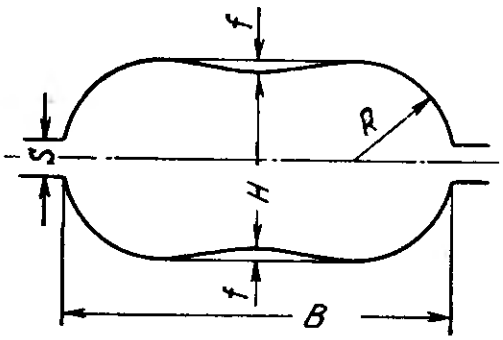



Рис. 98. Предчистовой овал для прокатки круглой арматурной стали

Практикой установлено, что в предчистовой овал можно задавать квадратную полосу (для кругов диаметром 10—18 *мм*), прямоугольную полосу (для средних размеров, т. е. кругов диаметром 20÷45 *мм*) и прямоугольник с сильно закругленными ребрами для остальных размеров.

Отношение стороны предчистового квадрата $c$ к номинальному диаметру составляет

$$\frac{c}{d_н} = 1{,}20 \div 1{,}25.$$

В остальных клетях калибровка такая же, как и при прокатке круглой стали диаметров, соответствующих номерам арматурной стали.

## 7. ПРОКАТКА И КАЛИБРОВКА КРУГЛЫХ ПРОФИЛЕЙ ИЗ ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

Прокатка легированных сталей и сплавов характеризуется особенностями, усложняющими технологический процесс производства этих сталей.

Ниже перечислены следующие особенности прокатки легированных сталей [34—36].

1. Повышенное сопротивление деформации, что связано с химическим составом и структурой металла. Легирующие элементы (вольфрам, молибден, ванадий и др.), находящиеся в сталях при температуре прокатки в виде карбидов, увеличивают сопротивление деформации.

Следует также иметь в виду, что легированные стали прокатывают при температурах, более низких, чем обыкновенные углеродистые стали, что также увеличивает сопротивление деформации.

2. Многие легированные стали характеризуются пониженной пластичностью. Поэтому при прокатке или ковке их необходимо создавать наиболее благоприятные температурно-скоростные условия деформации для обеспечения наибольшей пластичности металла. Большое значение при этом имеет правильный выбор температур прокатки во избежание дефектов в виде рванин и трещин, удаление которых требует специальной зачистки металла.

3. При прокатке легированных сталей нередко требуется узкий температурный интервал деформации, который в отдельных случаях достигает 80—100 *град*. Поэтому отдельные марки этих сталей целесообразно прокатывать на непрерывных станах, на которых температура прокатки снижается очень мало.

4. Важное значение при прокатке легированных сталей имеет нагрев металла с устранением обезуглероживания стали при минимальном окалинообразовании.

5. Многие легированные стали обладают высокой чувствительностью к термическим напряжениям, поэтому такие стали требуют осторожного нагрева во избежание образования трещин при прокатке.

6. В связи с тем, что многие легированные стали наряду с высокой чувствительностью к напряжениям обладают также и флокеночувствительностью, большое значение имеет специально разрабатываемый в каждом случае режим охлаждения для обеспечения необходимого качества продукции.

7. При прокатке и калибровке легированных сталей необходимо учитывать условия захвата металла валками, принимая во внимание снижение коэффициента внешнего трения для ряда сталей. Поэтому при разработке калибровок приходится снижать обжатия и коэффициенты вытяжки, что усложняет и удлиняет технологический процесс прокатки.

8. Следует также иметь в виду, что некоторые стали имеют склонность к повышенному уширению. По данным Ю. М. Чижикова [35], уширение при прокатке легированных сталей в 1,1—1,5 раза больше, чем при прокатке углеродистых сталей.

9. К готовому прокату из легированных сталей предъявляются высокие требования к чистоте поверхности продукции. Поэтому требуется тщательная зачистка металла на отдельных стадиях технологического процесса, а также выбор таких систем калибровок,

которые сводили бы к минимуму образование поверхностных дефектов (морщин, складок, трещин и др.).

При прокатке легированных сталей применяют различные системы черновых калибровок. Ранее часто применяли систему ромбических калибров, преимущество которой заключалось в том, что в этих калибрах можно было получать квадраты различных сечений. Однако ромбические калибры имеют следующие недостатки: 1) сильный износ поверхности ромбических калибров приводит к ухудшению качества поверхности металла; 2) в ромбических калибрах окалина плохо удаляется с полосы и закатывается в металл, частицы металла навариваются на поверхность калибра — все это ухудшает поверхность проката; 3) при пониженной пластичности металла (например, для высоколегированных сталей) в результате неравномерной деформации ромбические калибры способствуют образованию рванин на металле.

После замены ромбических калибров трапецеидальными или овальными с применением значительных вытяжек улучшилось качество проката и сократился брак по рванинам.

*Систему овал—квадрат* также применяют при прокатке легированных сталей, например шарикоподшипниковой стали ШХ15. Однако при прокатке по этой системе, несмотря на хорошую настройку, трудно обеспечить хорошую поверхность профиля, так как овалы и квадраты с невыполненными углами являются причиной образования на готовом прокате морщин и складок.

*Система овал—круг* получила широкое применение при прокатке легированных сталей, так как наличие плавных очертаний обеспечивает чистую поверхность проката. Основным недостатком этой системы является недостаточная устойчивость раската в круглых калибрах, что приводит к скручиванию полосы.

На линейных станах, снабженных обводными аппаратами, внедрение системы овал—круг вызывает большие затруднения.

*Универсальную систему квадрат—полоса—ребро—овал—круг* также широко применяют для прокатки кругов средних и крупных размеров. Эта система имеет ряд преимуществ, о которых говорилось выше (см. гл. I).

Однако универсальная система имеет тот недостаток, что при прокатке широкого сортамента ее трудно применять в условиях работы механизированных станов с использованием роликовой арматуры.

За последнее время начинают широко применять *систему овал—ребровый овал*, которая обеспечивает хорошее качество при прокатке легированных сталей, что подтверждает практика работы прокатных станов завода «Днепроспецсталь». Преимущество этой системы заключается в том, что раскат имеет плавное очертание профиля и металл не защемляется в вершине. Правда, коэффициенты вытяжки в системе овал—ребровый овал несколько ниже, чем в системе овал—квадрат.

Размеры калибров по системе овал—ребровый овал, обеспечивающие хорошее качество при прокатке легированных и высоколегированных сталей, приведены в табл. 47.

Следует, однако, отметить, что, например, на стане 280 при прокатке круга диаметром 18 *мм* пришлось сохранить систему овал — квадрат, чтобы не увеличивать числа проходов [1].

## 8. ПРОКАТКА И КАЛИБРОВКА КРУГЛОЙ СТАЛИ НА ТРУБОЗАГОТОВОЧНЫХ СТАНАХ

В общем балансе производства труб значительную долю (около 50%) составляют бесшовные трубы, изготовляемые из обычных углеродистых и различных легированных сталей.

Трубозаготовочные станы предназначены для обеспечения трубопрокатных станов круглой катаной заготовкой. К трубной заготовке предъявляются высокие требования по качеству наружной поверхности, на которой не допускаются мелкие складки, морщины и другие дефекты.

Трубную заготовку из углеродистой стали, как правило, прокатывают в системе калибров прямоугольник — овал — круг (рис. 99). При прокатке малопластичных легированных сталей и сплавов вместо прямоугольных

Таблица 47

**Размеры (*мм*) калибров для прокатки круглых профилей**

| Квадрат обжимной клети | Калибры чистовой линии | | | | | Диаметр круга, *мм* |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Овал черновой линии | ребровый овал | овал | квадрат или ребровый овал | овал | круг | |
| Стан 280 (заготовка 110×110 *мм*) | | | | | | |
| 40 | 21,9 × 54,5 | 34,2 × 28,1 | 18 × 40,3 | 21 × 21 | 14,2 × 27,8 | 18,1 | 18 |
| 33 | 19,3 × 45,5 | 28,6 × 24,3 | 15,2 × 34,3 | 17,5 × 17,5 | 13,7 × 24,6 | 16,1 | 16 |
| Стан 325 (заготовки 120 × 120 и 105 × 105 *мм*) | | | | | | | |
| 50,5 | 26,5 × 72 * | 37 × 37 | 23,9 × 44,9 | 33,2 × 26,8 | 21,3 × 36,2 | 25,2 | 25 |
| 50,0 | 25,9 × 69,3 * | 40,2 × 33,2 | 20,1 × 48,1 | 28,4 × 24,9 | 18,5 × 32,5 | 22,2 | 22 |

* Размеры овала, выходящего из обжимной клети.

[1] В. С. Берковский, А. Н. Осадчий, П. М. Аврунин. Металлург, 1965, № 3, с. 24.

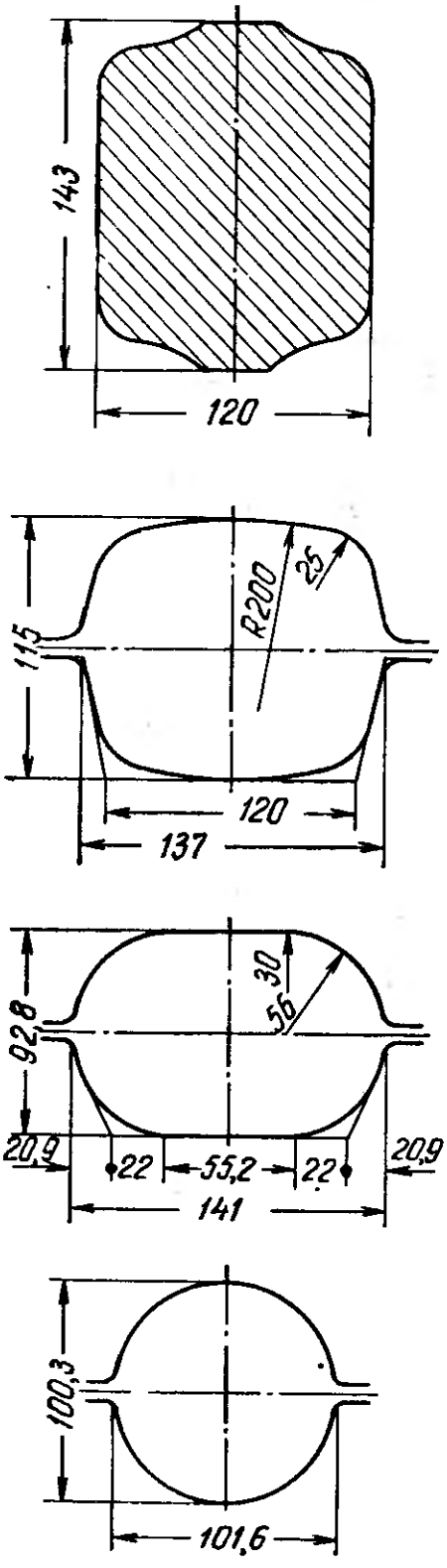



Рис. 99. Система калибров прямоугольник — овал — круг

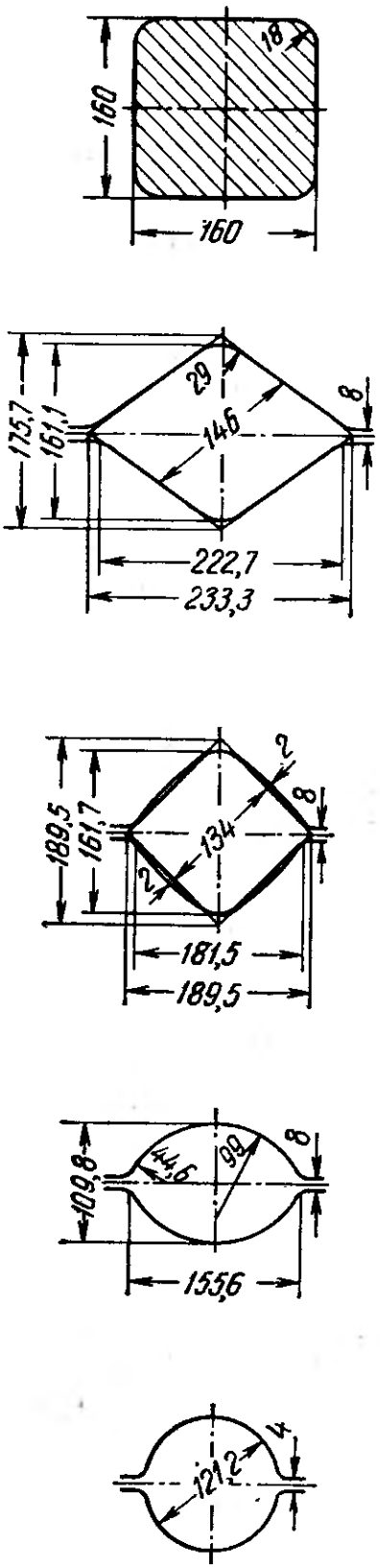



Рис. 100. Система калибров прямоугольник — ромб — квадрат — овал — круг

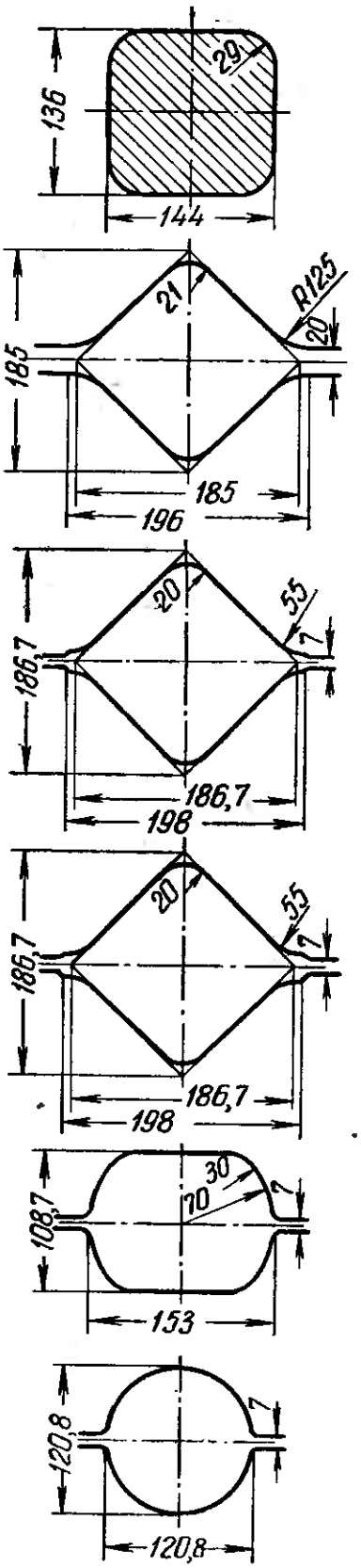



Рис. 101. Система квадратных калибров с развалом — плоский овал — круг

калибров применяют ромбические и квадратные калибры (рис. 100). Иногда вместо ромбических калибров применяют квадратные калибры с развалом (рис. 101).

При расчете прямоугольных калибров следует обращать внимание на устойчивость раската в валках. Для хорошей устойчивости и меньшего износа боковых стенок калибра необходимо, чтобы раскат в момент входа в калибр касался его дна и боковых стенок. Уклон боковых стенок выбирают с учетом заполнения ка-

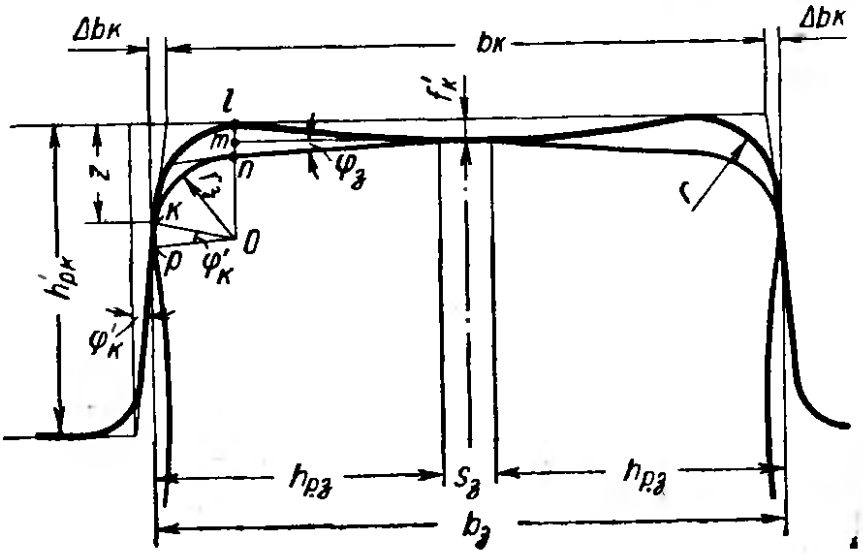



Рис. 102. К определению ширины заготовки при прокатке в прямоугольном калибре

либра без выхода металла в зазоры. Ширину раскатов рекомендуется определять по формулам, полученным исходя из геометрических размеров калибра и раската в момент захвата.

Ширина заготовки равна

$$b_з = b_к + 2\Delta b_к.$$

Значение $\Delta b_к$ можно определить из рис. 102 как разницу между шириной заготовки в точках контакта ее со стенками калибра и шириной по дну калибра $b_к$ (без закруглений). Расстояние по вертикали от дна калибра до точки соприкосновения раската с боковой стенкой калибра равно

$$z = on + nm + ml - kp. \qquad (66)$$

С другой стороны:

$$z = \frac{\Delta b_к - r_з\left(1 - \cos\varphi'_к\right)}{\operatorname{tg}\varphi'_к}, \qquad (67)$$

где $r_з$ — радиус закругления раската, определяемого конструкцией предшествующего калибра;

$\varphi'_к$ — угол наклона боковой стенки калибра в плоскости захвата, который отличается от угла наклона калибра $\varphi_к$ (в плоскости выхода).

Приравнивая правые части уравнений (66) и (67), подставляя значения отрезков $on$, $nm$, $ml$, $кр$ и решая относительно $\Delta b_к$, получим [1] для случая прокатки в калибрах с изменяющимся зазором между валками (обжимная клеть):

$$\Delta b_к = \delta \cos \alpha \left( r_з \nu + h_{р.з} \delta_з + \frac{f}{\cos \alpha} \right), \qquad (68)$$

где $\nu = 1 - \delta_з - \frac{\delta}{2} \cos \alpha$ — величина, зависящая от выпуска калибра и угла наклона верхней и нижней граней раската;

$\delta$ — тангенс угла наклона боковой стенки калибра;

$\alpha$ — угол захвата;

$\delta_з$ — тангенс угла наклона верхней и нижней граней раската, определяемого конструкцией предшествующего калибра;

$h_{р.з}$ — глубина ручья предшествующего калибра;

$f$ — выпуклость дна калибра.

Если предшествующий проход был произведен на гладкой бочке, то $\delta_з = 0$ и

$$\Delta b_к = \delta \cos \alpha \left[ r_з \left( 1 - \frac{\delta}{2} \cos \alpha \right) + \frac{f}{\cos \alpha} \right]. \qquad (69)$$

Закругления углов выполнены радиусом, примерно равным $r_з = 15 \div 20$ *мм*.

При прокатке в заготовочных и сортовых станах с постоянным зазором между валками и кантовкой после каждого прохода глубина ручья предшествующих калибров определяется калибровкой валков. В уравнении (68) принимаем

$$h_{р.з} = \frac{b_к + 2\Delta b_к - s_з}{2},$$

где $s_з$ — участок верхней или нижней граней раската, соответствующий разъему предшествующего калибра.

Тогда

$$\Delta b_к = \frac{\delta \cos \alpha}{1 - \delta \delta_з \cos \alpha} \left( r_з \nu + \frac{b_к - s_з}{2} \delta_з + \frac{f}{\cos \alpha} \right). \qquad (70)$$

После прокатки в прямоугольных калибрах раскаты поступают в предчистовой овальный и чистовой круглый калибры.

Наибольшая неравномерность деформации происходит при прокатке прямоугольных раскатов в овальном калибре. Для ее уменьшения на многих заводах применяют подготовительные калибры, предшествующие предчистовым овалам. По своей кон-

[1] А. П. Чекмарев, Р. А. Машковцев, О. П. Носенко, С. Я. Зазулин, А. Я. Тертычко. Сталь, 1968, № 9, с. 804.

струкции эти калибры являются промежуточными между прямоугольными и предчистовыми овалами.

Подготовительные калибры имеют вид прямоугольника с плоским или вогнутым дном и увеличенными радиусами закругления. Плоское или вогнутое дно ручьев предусматривают для лучшего заполнения предчистового овального калибра. Увеличенный радиус закругления способствует улучшению условий захвата.

Подготовительные калибры по своим геометрическим очертаниям имеют четыре разновидности (рис. 103). После прокатки в двухрадиусных овальных калибрах полосу перед задачей в предчистовой овальный калибр не кантуют.

На рис. 104 приведены предчистовые овальные калибры, применяемые на разных металлургических заводах для прокатки трубной заготовки диаметром 100 *мм*. Чаще других используют плоские овальные калибры. По конструкции их можно разделить на две группы. К первой относятся овалы, дуги которых описаны из центров, расположенных на горизонтальной оси симметрии (рис. 104, *а*); ко второй — овалы с центрами дуг, расположенными за горизонтальной осью (рис. 104, *б*). Более предпочтительна последняя форма плоского овального калибра. При повышенных требованиях к геометрическим размерам круглой заготовки применяют коробовидные двухрадиусные овалы (рис. 104, *в*), реже — однорадиусные (рис. 104, *г*).

На рис. 105 приведена конструкция чистового круглого калибра, применяемого на многих металлургических заводах для прокатки углеродистой стали. Горизонтальный диаметр калибра $d_{гор}$ принимают больше номинального размера горячей круглой заготовки $d_г$, т. е.

$$d_{гор} = (1{,}01 \div 1{,}02)\, d_г.$$

Вертикальный диаметр круглого калибра обычно принимают

$$d_{верт} \approx d_г.$$

Строят чистовой круглый калибр с небольшим расширением по горизонтальной оси («развалом») проведением от точки $M$ дуги радиусом, несколько большим радиуса круга. Положение точки $M$ видно из рис. 105.

В отдельных случаях чистовой круглый калибр строится одним радиусом, т. е.

$$d_{гор} = d_{верт} \approx 1{,}01 d_г.$$

Размеры подготовительных и предчистовых овалов определяют следующим образом. По заданному углу захвата находят обжатие и уширение металла, а затем основные размеры поперечного сечения раската: высоту $H$ и ширину $B$. Однако конфигурация подготовительных и предчистовых овальных калибров при этом может быть различной (см. рис. 103, 104). Размеры этих калибров рас-

считывают по эмпирическим формулам или графическим методом, который особенно распространен в заводской практике. Во всех этих случаях рассматривают сечение калибра в плоскости выхода

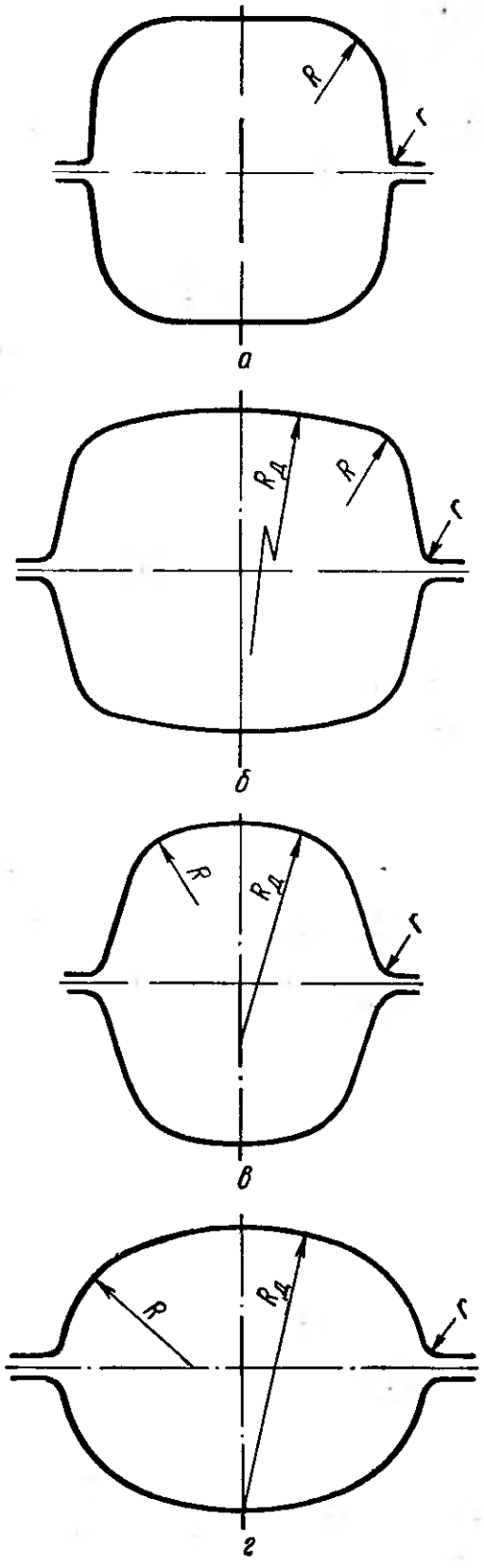



Рис. 103. Подготовительные овальные калибры:

*а* — с плоским дном; *б* — с вогнутым дном; *в* — ребровые; *г* — двухрадиусные

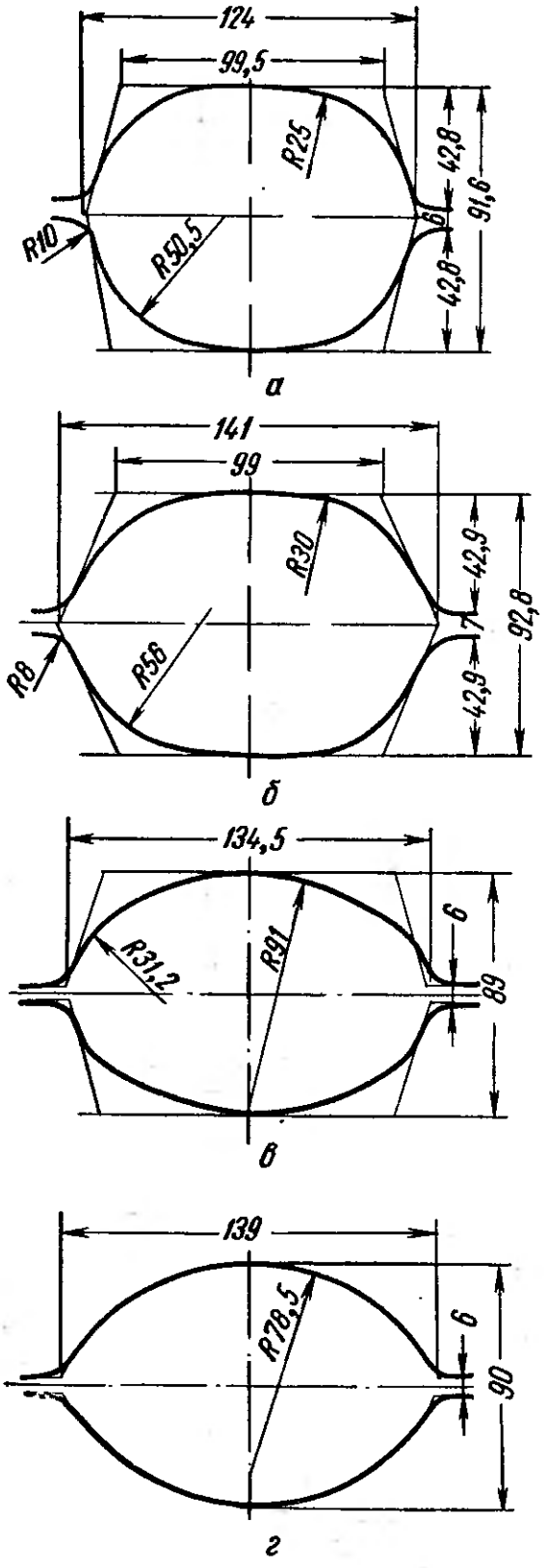



Рис. 104. Предчистовые овальные калибры

раската из валков, что не полностью отражает условия прокатки металла в этих калибрах, и поэтому не всегда удается обеспечить устойчивый процесс прокатки и необходимое качество поверхности заготовки.

Поскольку указанные методы построения калибров основаны на эмпирических зависимостях, полученных при прокатке тех или иных размеров, то они пригодны для расчета только отдельных калибров и не являются общими для расчета калибров, предназначенных для прокатки кругов диаметром 90—270 *мм*.

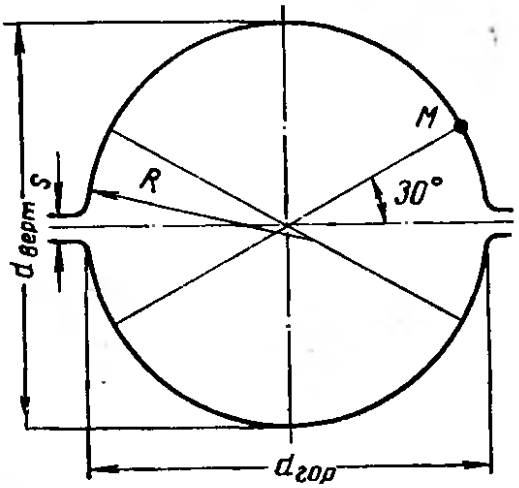



Рис. 105. Конструкция чистового круглого калибра для прокатки трубной заготовки

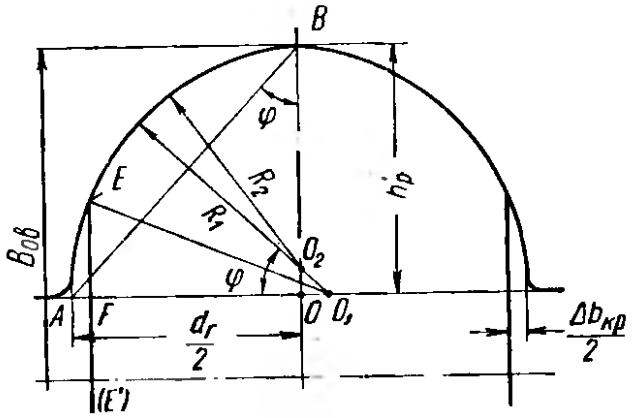



Рис. 106. Построение предчистового овального калибра $\left(h'_р = \frac{d_г}{2\cos\alpha_{кр}}\right)$

Ниже приведена методика расчета подготовительных и предчистовых овальных калибров [1].

Устойчивость полосы при прокатке в круглом калибре тем надежнее, чем лучше поперечное сечение скантованного овального раската соответствует очертанию круглого калибра в плоскости захвата (рис. 106).

Круглый калибр в плоскости захвата, т. е. в вертикальном сечении, удаленном от плоскости выхода раската из валков на расстоянии, равном длине проекции дуги захвата ($l_д$), представляет собой часть тора, а очертания этого калибра — линию Персея. Эта линия описывается уравнением четвертого порядка. Ввиду сложности с достаточной степенью точности его можно заменить уравнением эллипса с вертикальной осью $\frac{d_г}{2\cos\alpha_{кр}}$ и горизонтальной осью $d_г/2$, где $d_г$ — диаметр горячей круглой заготовки.

Для значений углов захвата в круглом калибре, применяемых на практике ($\alpha_{кр} = 12 \div 22°$), разность осей эллипса невелика и последний можно заменить геометрическим овалом (рис. 106) с радиусами $R_1 = O_1A$ и $R_2 = O_2B$. Таким образом, предчистовой

[1] Методику разработали канд. техн. наук О. П. Носенко и инж. С. С. Зозулин.

овал, дуги закругления которого описаны радиусами $R_1$ и $R_2$, будет касаться калибра одновременно по всей ширине в плоскости захвата.

Согласно рис. 106, имеем

$$R_1 = \frac{AD}{\sin\varphi} \text{ и } R_2 = \frac{DB}{\cos\varphi},$$

Учитывая, что $\operatorname{tg}\varphi = \cos\alpha$, и подставляя значения $AD$ и $DB$, после преобразований получили:

$$\left.\begin{aligned} R_1 &= r\,\frac{1+\cos^2\alpha+(1-\cos\alpha)\sqrt{1+\cos^2\alpha}}{2\cos^2\alpha};\\ R_2 &= r\,\frac{1+\cos^2\alpha-(1-\cos\alpha)\sqrt{1+\cos^2\alpha}}{2\cos\alpha}, \end{aligned}\right\} \qquad (71)$$

т. е. $R_1 = rk_1$; $R_2 = rk_2$,
где

$$r = \frac{d_г}{2}; \quad k_1 = f_1(\alpha); \quad k_2 = f_2(\alpha).$$

Для определения значений $k_1$ и $k_2$ пользуемся графиком, приведенным на рис. 107. Для упрощения построения овалов и большего удобства при изготовлении шаблонов точки $B$ и $E$ можно соединить дугой одного радиуса $R$, величина которого — средневзвешенная между $R_1$ и $R_2$, т. е. $R = rk_{ср}$, где $k_{ср}$ определяется по графику (рис. 107).

Для определения месторасположения центра радиуса необходимо из точек $B$ и $E$ провести дуги радиусом $R$. Точка пересечения этих дуг является центром. Затем определяют размеры дна калибра (плоский участок $EE$) и ширину овального калибра по горизонтальной оси $BB$. Ширину дна калибра можно найти, пользуясь следующей зависимостью (см. рис. 106):

$$b_{ов} = B_{ов} - \frac{d_г}{2\cos\alpha_{кр}} + 2FE.$$

Определив значение $EE$ из треугольника $O_1FE$, получим:

$$b_{ов} = B_{ов} - \frac{d}{\cos\alpha_{кр}} + \Delta b\sqrt{\frac{2\cdot k_1 d_г}{\Delta b_{кр}} - 1}. \qquad (72)$$

Таким образом, ход расчета предчистового овального калибра следующий (рис. 108).

1. Задаемся углом захвата в круглом калибре в пределах $\alpha_{кр} = 12 \div 22°$.

Меньшие значения угла $\alpha_{кр}$ относятся к максимальным размерам прокатываемой круглой стали.

2. Определяем ширину предчистового овального калибра:

$$B_{ов} = (D - d_г)(1 - \cos \alpha_{кр}) + d_г,$$

где $D$ — начальный диаметр валков с учетом переточек.

3. Определяем уширение в круглом калибре и высоту овального калибра:

$$H_{ов} = d_г - \Delta b_{кр}.$$

4. Определяем ширину плоского участка овального калибра по формуле (70).

5. Пользуясь формулой $R = rk_{ср}$ и графиком (см. рис. 107), определяем величину радиуса $R$ дуг предчистового овала, положение центров которых определяется построением.

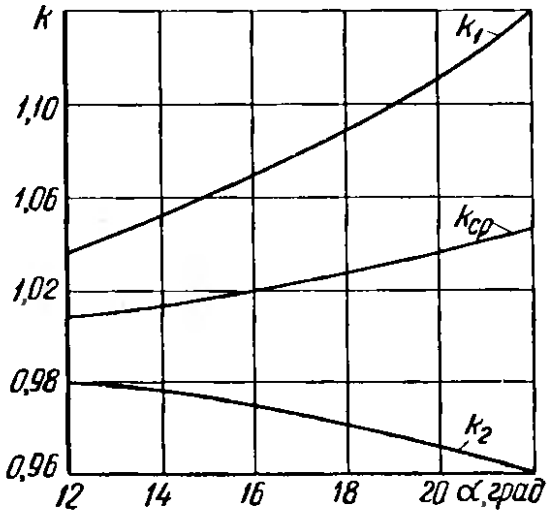



Рис. 107. График для определения коэффициентов $k_1$ и $k_2$

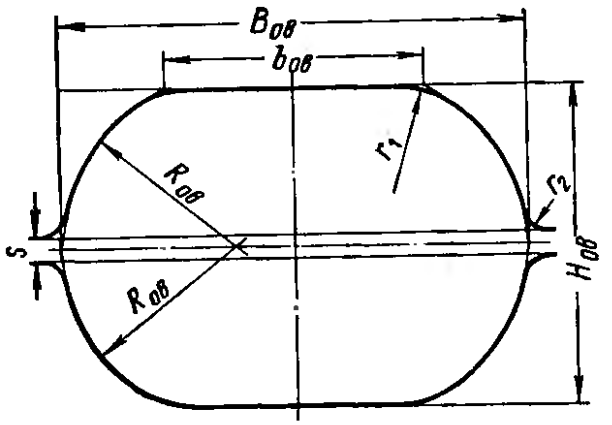



Рис. 108. Предчистовой плоский овальный калибр

6. Радиусы закруглений $r_1$ и $r_2$ принимаем конструктивно:

$$r_1 = 25 \div 30 \text{ мм} \text{ и } r_2 = 8 \div 10 \text{ мм}.$$

При определении размеров подготовительных овальных калибров необходимо так же, как и при расчете предчистовых овальных калибров, исходить из того положения, что раскат при прокатке в предчистовом овальном калибре в плоскости захвата должен касаться калибра одновременно по всей его ширине.

На рис. 109 показаны очертания ручья предчистового овального калибра в плоскости захвата (линия $BEE'B'$). Наложим на него очертание ручья в плоскости осей валков ($BCC'B'$), совместив горизонтальные отрезки $NB$ и $N'B'$ буртов. Как видно из рис. 109, для обеспечения одновременности захвата по всей ширине предчистового овала необходимо иметь в подготовительном овальном калибре закругление у дна калибра, соответствующее закруглению предчистового овального калибра в местах захвата ($\smile DE$).

Отрезок $OF$ равен $\frac{d_г}{2 \cos \alpha_{ов}}$ (рис. 106 и 109), где $\alpha_{ов}$ — угол захвата в предчистовом овальном калибре. Численные значения

углов захвата в овальном и круглом калибрах на практике незначительно отличаются друг от друга. В этом случае $OB \approx OF$, т. е. дуги $BEF$ и $B'E'F'$ являются дугами окружности радиуса

$$R_{\text{подг. ов}} = \frac{d_г}{2\cos\alpha_{кр}}.$$

Центр, из которого описываются дуги подготовительного овала, можно найти следующим образом. Из конца плоского участка подготовительного овального калибра (точка $D$) проводим дугу радиусом $R_{\text{подг. ов}}$. Пересечение дуги с прямой $x_{ов} - x_{ов}$ определяет

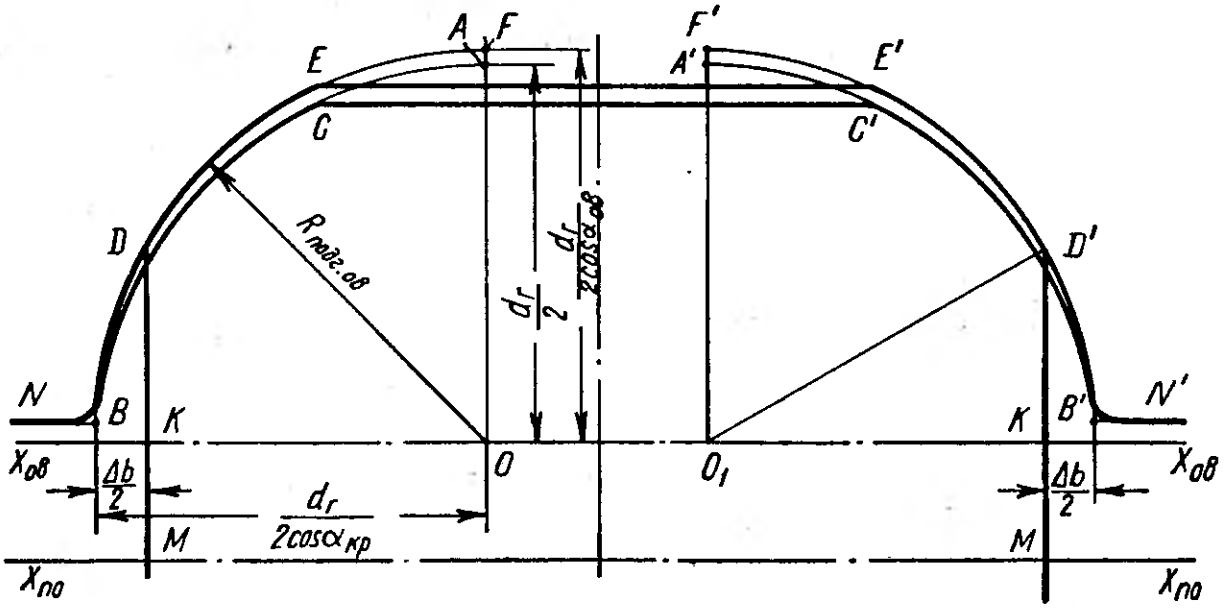



Рис. 109. Построение подготовительного овального калибра для прокатки круглой заготовки

место положения центра радиуса $R_{\text{подг. ов}}$. Прямая $x_{ов} - x_{ов}$ является горизонтальной осью симметрии предчистового овального калибра, а $x_{оп} - x_{оп}$ — горизонтальной осью симметрии задаваемого после кантовки раската, выходящего из подготовительного овала. Ширина дна подготовительного овального калибра (плоский участок) определяется следующим образом (рис. 109):

$$b_{п.\,о} = 2\,(KD + KM).$$

Подставляя значения отрезков $KD$ и $KM$, после небольших преобразований получим:

$$b_{\text{подг. ов}} = \Delta b_{ов} \sqrt{\frac{2d_г}{\cos\alpha_{кр}} \cdot \frac{1}{\Delta b_{ов}} - 1} + H_{\text{подг. ов}} - \frac{H_{ов}}{\cos\alpha_{ов}},$$

где $\Delta b_{ов}$ — уширение в предчистовом овальном калибре;

$H_{\text{подг. ов}}$ — высота подготовительного овала.

Исходя из вышеизложенного, можно предложить следующую методику расчета и построения подготовительного овального калибра для прокатки круглой заготовки диаметром 90—270 *мм*

(рис. 110; такой овал имеет форму квадрата с сильно закругленными углами).

Принимаем угол захвата в предчистовом овальном калибре равным или близким по своему значению углу захвата в круглом калибре ($\alpha_{ов} = 12 \div 22°$) и определяем обжатие $\Delta h_{ов}$ в предчистовом калибре в точках сопряжения дуги закругления с боковой стенкой подготовительного овального калибра. Меньшие значения $\alpha_{ов}$ принимают при прокатке круглой заготовки большего диаметра и наоборот.

2. Определяем уширение в предчистовом овальном калибре и высоту подготовительного овального калибра

$$H_{подг.\,ов} = B_{ов} - \Delta b_{ов}.$$

3. Определяем ширину плоского участка дна подготовительного овального калибра $b_{подг.\,ов}$.

4. Радиус закругления у дна калибра при $\alpha_{ов} \approx \alpha_{кр}$ принимаем

$$R_{подг.\,ов} = \frac{d}{2\cos\alpha_{кр}}.$$

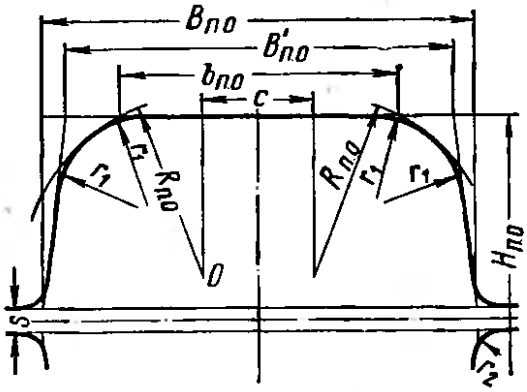



Рис. 110. Подготовительный овальный калибр

Сопряжение дуги радиуса $R_{подг.\,ов}$ с дном калибра и боковыми стенками производится радиусом $r$, который определяется конструктивно.

5. Ширина подготовительного овального калибра у разъема по точкам скелета равна

$$B_{подг.\,ов} = H_{ов} + \Delta h_{ов} + \delta\,(b_{ов} - s),$$

где $\Delta h_{ов} + \delta\,(b_{ов} - s)$ — максимальное обжатие, считая по ширине подготовительного овала у разъема при 100%-ном его заполнении;

$\delta$ — выпуск подготовительного овального калибра;

$b_{ов}$ — ширина плоского участка предчистового овального калибра;

$H_{ов}$ — высота предчистового овала;

$s$ — зазор между буртами (валками) подготовительного овального калибра.

6. Ширина дна подготовительного овального калибра по точкам скелета

$$B'_{подг.\,ов} = B_{подг.\,ов} - \delta\,(H_{подг.\,ов} - s).$$

### Примериый расчет круглой стали диаметром 100 *мм*

На стане 900/750 диаметр валков при переточках с 750 *мм* уменьшается до 640 *мм*.

Принимаем следующую схему калибров: чистовой круг, предчистовой овал, подготовительный овал, прямоугольник. После

каждого прохода предусматриваем кантовку раската. Прямоугольная заготовка выходит из обжимной клети 900. Чистовой круг, предчистовой овал и подготовительный овал располагаем в клетях 750.

### *Чистовой круглый калибр*

Номинальный размер круглой стали равен $d = 100$ *мм*.

Допуски, согласно ГОСТ 2590—57, составляют $\Delta_1 = +0{,}6$ *мм* и $\Delta_2 = -1{,}7$ *мм*. Диаметр круглой стали в холодном состоянии с учетом неполного минусового допуска равен

$$d_{\text{х}} = d - \Delta_2 = 100 - 1{,}5 = 98{,}5 \text{ мм}.$$

Диаметр круглой стали в горячем состоянии равен

$$d_{\text{г}} = 98{,}5 \cdot 1{,}012 = 99{,}5 \text{ мм}.$$

Вертикальный диаметр круглого калибра

$$d_{\text{верт}} = 99{,}5 \text{ мм}.$$

Горизонтальный диаметр круглого калибра

$$d_{\text{гор}} = 100 \cdot 1{,}012 = 101{,}2 \text{ мм}.$$

Развал круглого калибра у разъемов следует делать на участке ручья, соответствующем центральному углу 30° от горизонтальной оси симметрии калибра.

### *Предчистовой овальный калибр*

Принимаем угол захвата

$$\alpha = 20^\circ \text{ или } \cos\alpha = 0{,}94.$$

Ширина овала у разъемов

$$B_{\text{ов}} = (D - d)(1 - \cos\alpha_{\text{кр}}) + d_{\text{г}} =$$
$$= (640 - 99{,}5)(1 - 0{,}9397) + 99{,}5 = 132 \text{ мм}.$$

Обжатие в круглом калибре

$$\Delta h = B_{\text{ов}} - d_{\text{г}} = 132 - 99{,}5 = 32{,}5 \text{ мм}.$$

Уширение в круглом калибре с очертаниями, приближающимися к прямоугольнику, определяем по формуле А. П. Чекмарева с учетом коэффициента ограничения $k = 0{,}9$:

$$\Delta b_{\text{кр}} = \frac{2 b_{\text{ср}} \Delta h k}{(H + h)\left[1 + (1 + \alpha)\left(\frac{b_{\text{ср}}}{R_{\text{к}}\alpha}\right)^n\right]}.$$

В связи с тем, что $H_{ов}$ неизвестна, принимаем $b_{ср} \approx d_г$. Тогда уширение будет равно

$$\Delta b_{кр} = \frac{2 \cdot 99{,}5 \cdot 32{,}5 \cdot 0{,}9}{(132 + 99{,}5)\left[1 + (1 + 0{,}34)\left(\frac{99{,}5}{270{,}25 \cdot 0{,}34}\right)^2\right]} = 10{,}4 \text{ мм}.$$

Высота калибра составляет

$$H_{ов} = d_г - \Delta b_{кр} = 99{,}5 - 10{,}4 = 89{,}1 \text{ мм}.$$

Принимаем

$$H_{ов} = 89 \text{ мм}.$$

Ширина плоского участка калибра

$$b_{ов} = B_{ов} - \frac{d_г}{\cos \alpha_{кр}} + \Delta b_{кр} \sqrt{\frac{2 \cdot k_1 d_г}{\Delta b}};$$

$$b = 132 - \frac{99{,}5}{0{,}94} + 10{,}4 \sqrt{\frac{2 \cdot 1{,}113 \cdot 99{,}5}{10{,}4} - 1} = 73 \text{ мм}.$$

Коэффициент $k_1 = 1{,}113$ определяется по графику (см. рис. 107). Радиус закругления предчистового овального калибра

$$R = \frac{d_г}{2} k_{ср} = \frac{99{,}5}{2} \cdot 1{,}04 = 51{,}7 \text{ мм}.$$

По графику (см. рис. 107)

$$k_{ср} = 1{,}04.$$

Принимаем конструктивно

$$r_1 = 30 \text{ мм} \text{ и } r_2 = 8 \text{ мм}.$$

*Подготовительный овальный калибр*

Угол захвата принимаем

$$\alpha = 20^\circ \text{ или } \cos \alpha = 0{,}94.$$

Обжатие в предчистовом овальном калибре равно

$$\Delta h_{ов} = D_к (1 - \cos \alpha) = (640 - 89)(1 - 0{,}94) = 33{,}2 \text{ мм}.$$

Ширина подготовительного овального калибра (по заполнению его металлом)

$$B_{подг.\ ов} = H_{ов} + \Delta h_{ов} = 89 + 33{,}2 = 122{,}2 \approx 122 \text{ мм}.$$

Уширение в предчистовом овальном калибре

$$\Delta b_{ов} = \frac{2 \cdot 132 \cdot 33 \cdot 1{,}0}{(122 + 89)\left[1 + (1 + 0{,}34)\left(\frac{132}{175{,}5 \cdot 0{,}34}\right)^2\right]} = 12 \text{ мм}.$$

Высота подготовительного овального калибра

$$H_{подг.\ ов} = B_{ов} - \Delta b_{ов} = 132 - 12 = 120 \text{ мм},$$

Ширина плоского участка дна подготовительного овального калибра

$$b_{\text{подг. ов}} = \Delta b_{\text{ов}} \sqrt{\frac{2d_{\text{г}}}{\cos\alpha_{\text{кр}}} \cdot \frac{1}{\Delta b_{\text{ов}}}} - 1 + H_{\text{подг. ов}} - \frac{h_{\text{ов}}}{\cos\alpha_{\text{ов}}} =$$

$$= 12 \sqrt{\frac{2 \cdot 99{,}5}{12} \cdot \frac{1}{0{,}94}} - 1 + 120 - \frac{89}{0{,}94} = 74 \text{ мм}.$$

Радиус закруглений у дна калибра

$$R_{\text{подг. ов}} = \frac{d_{\text{г}}}{2\cos\alpha_{\text{кр}}} = \frac{99{,}5}{2 \cdot 0{,}94} = 52{,}9 \text{ мм}.$$

Ширина калибра у разъема по точкам скелета равна

$$B_{\text{подг. ов}} = H_{\text{ов}} + \Delta h_{\text{ов}} + \delta\,(b_{\text{ов}} - s) =$$

$$= 89 + 33{,}2 + 0{,}1\,(73 - 6) = 128{,}7 \text{ мм}.$$

Ширина калибра по дну по точкам скелета

$$B'_{\text{подг. ов}} = B_{\text{подг. ов}} - \delta\,(H_{\text{подг. ов}} - s) =$$

$$= 128{,}7 - 0{,}1\,(120 - 6) = 117{,}30 \text{ мм}.$$

## Определение размеров заготовки, поступающей в подготовительный овальный калибр

Угол захвата в подготовительном овальном калибре можно принять $\alpha = 22°$ или $\cos\alpha = 0{,}9272$.

Обжатие составляет

$$\Delta h = D_{\text{к}}\,(1 - \cos\alpha) = (640 - 120)\,(1 - 0{,}9272) = 38 \text{ мм}.$$

Высота заготовки

$$H_{\text{заг}} = H_{\text{подг. ов}} = 120 + 38 = 158{,}0 \text{ мм}.$$

Ширину заготовки определяем по формуле (70).

Выпуск в подготовительном овальном калибре равен $\delta = 0{,}1$, в прямоугольном калибре обжимной клети 900 принимаем $\delta_{\text{з}} = 0{,}2$.

Зазор между валками в обжимной клети 900 равен $s_{\text{з}} = 15$ мм.

$$\nu = 1 - \delta_{\text{з}} - \frac{\delta}{2}\cos\alpha = 1 - 0{,}2 - \frac{0{,}1}{2} \cdot 0{,}9272 = 0{,}7536,$$

$$B_{\text{заг}} = 117{,}3 + \frac{0{,}1}{1 - 0{,}1 \cdot 0{,}2 \cdot 0{,}9273} \times$$

$$\times \left(52{,}9 \cdot 0{,}7536 + \frac{117{,}30 - 15}{2}\,0{,}2\right) = 123 \text{ мм}.$$

Вогнутость боковых граней заготовки, а следовательно, выпуклость дна прямоугольного калибра должны быть такими, чтобы не было переполнения калибра.

Площади калибров определяют или по геометрическим размерам калибра с учетом их уклонов и закруглений, или планиметрированием. Затем определяют коэффициенты вытяжки.

Результаты расчета приведены в табл. 48.

Таблица 48

**Калибровка круглой стали диаметром 100 *мм* на трубозаготовочном стане 900/750**

| Номер клети | Форма калибра | Размеры полосы, *мм* | | Обжатие $\Delta h$, *мм* | Уширение $\Delta b$, *мм* | Площадь калибра, *мм*² | Коэффициент вытяжки $\mu$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | высота | ширина | | | | |
| | Заготовка . . . . | 158 | 123/112 | — | — | 17 490 | — |
| 750—I | Подготовительный овальный . . . | 120 | 122 | 38 | 10 | 13 600 | 1,28 |
| 750—II | Предчистовой овальный . . . | 89 | 132 | 33 | 12 | 9 800 | 1,38 |
| 750—III | Круглый . . . . | 99,5 | 99,5 | 32,5 | 10,4 | 7 850 | 1,24 |

Глава VI

# ПРОКАТКА И КАЛИБРОВКА КВАДРАТНОЙ СТАЛИ

## 1. СПОСОБЫ ПРОКАТКИ КВАДРАТНОЙ СТАЛИ

Квадратную сталь прокатывают в соответствии с ГОСТ 2591—57 со стороной квадрата 5—250 *мм*.

Квадратные профили со стороной до 100 *мм* включительно поставляют с острыми углами, а квадратные профили со стороной более 100 *мм* (по требованию заказчика более 50 *мм*) — с углами, закругленными радиусом $R \leqslant 0{,}15c$.

Для квадратной стали в ГОСТах установлены допускаемые отклонения по стороне при обычной и повышенной точности прокатки; например, для квадрата $c = 20$ *мм* отклонение составляет +0,4 и —0,5 *мм* при обычной точности и +0,2 и —0,4 *мм* — при повышенной точности, а для квадрата $c = 100$ *мм* — соответственно +0,6 и —1,7 *мм* и +0,5 и —1,5 *мм*.

Квадратную сталь со стороной до 14 *мм* можно поставлять в мотках.

Схема калибровки квадратной стали характеризуется тем, что сначала прокатку ведут в черновых калибрах той или иной системы (овал—квадрат, ромб—квадрат, овал—ребровый овал), после чего переходят последовательно в предчистовой квадрат, предчистовой ромб и чистовой квадрат.

Наиболее простая схема прокатки приведена на рис. 22. По этой схеме квадратную заготовку прокатывают в системе черновых калибров ромб—квадрат, после чего прокатку ведут в предчистовом квадрате, предчистовом ромбе и чистовом квадрате. Как уже указывалось, систему черновых калибров ромб—квадрат применяют при прокатке средних и крупных квадратов.

При прокатке мелких квадратов со стороной $c = 30$ *мм* часто применяются черновые калибры по системе овал—квадрат. Для крупных квадратов по всей линии станов применяют систему прямоугольных калибров.

## 2. ХОД РАСЧЕТА КАЛИБРОВКИ КВАДРАТНОЙ СТАЛИ

Ход расчета калибровки квадратной стали такой же, как и круглой стали.

1. В зависимости от типа стана, размеров квадратной стали устанавливают систему черновых калибров. Например, для малых

квадратов принимают систему овал—квадрат, для более крупных квадратов — систему ромб—квадрат и т. д.

2. Расчет ведут против хода прокатки, поэтому сначала определяют размеры последних трех калибров: чистового квадрата,

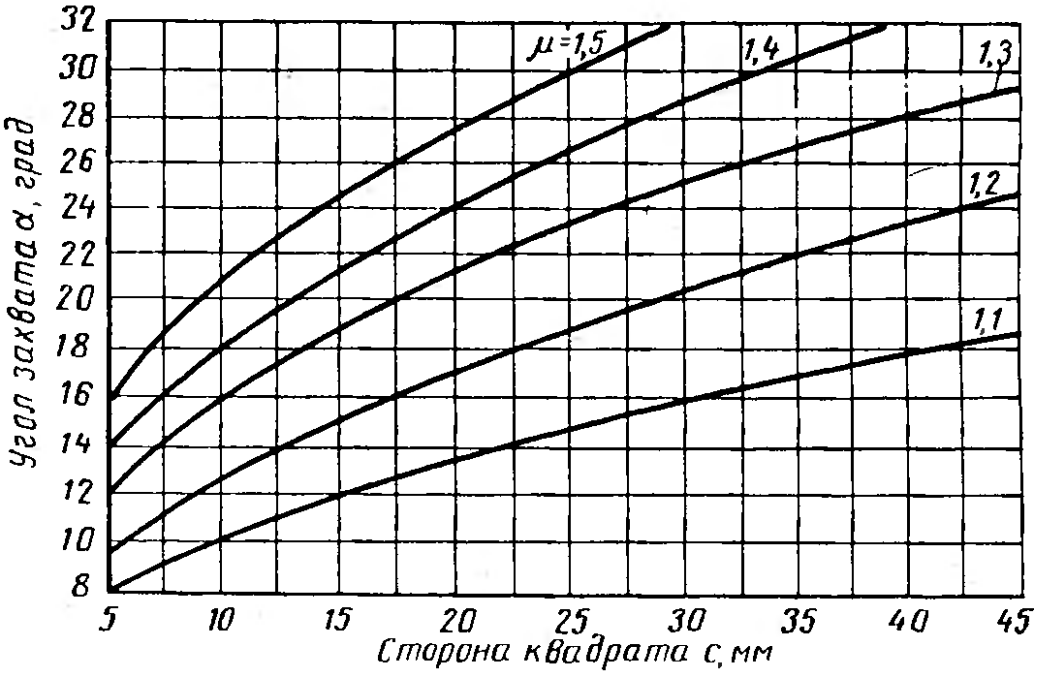



Рис. 111. Зависимость угла захвата от вытяжки и стороны квадрата для системы калибров ромб—квадрат в валках диаметром 250 *мм*

предчистового ромба и предчистового квадрата. Затем определяют размеры черновых калибров.

3. Определяют горячие размеры и площадь чистового квадрата с учетом допусков.

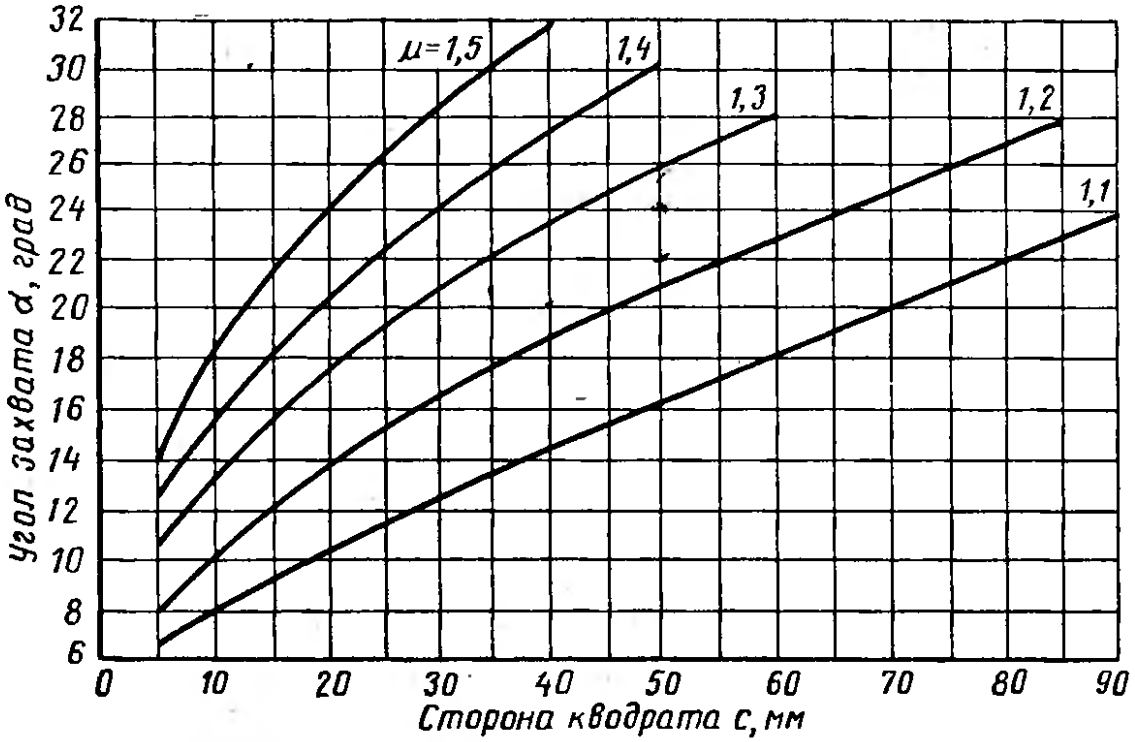



Рис. 112. Зависимость угла захвата от вытяжки и стороны квадрата для системы калибров ромб — квадрат в валках диаметром 350 *мм*

4. По выбранному коэффициенту вытяжки в чистовом калибре определяют площадь предчистового ромба. Для этого по графику (см. рис. 74) определяют коэффициенты вытяжек в чистовом квад-

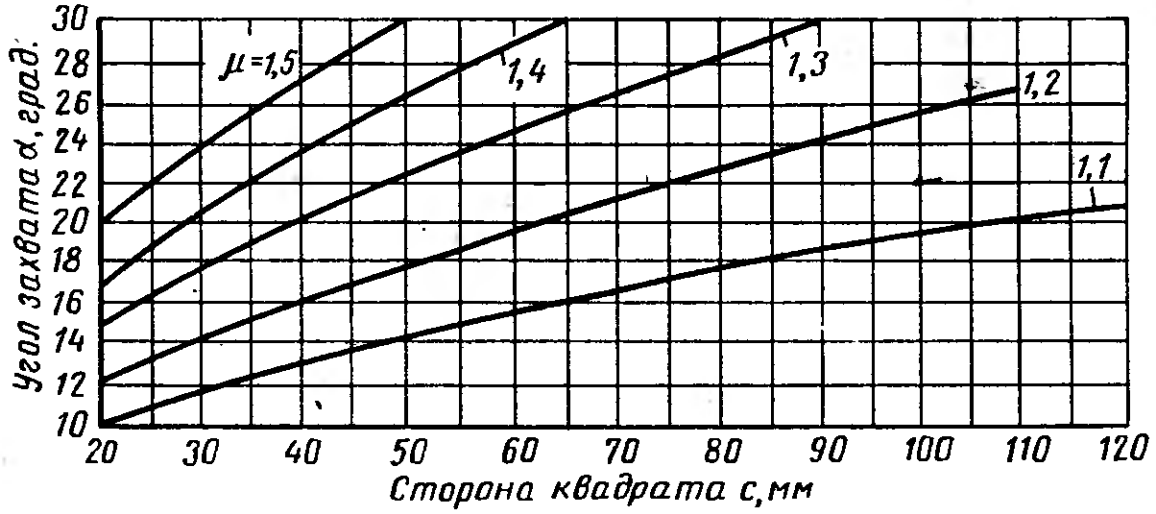



Рис. 113. Зависимость угла захвата от вытяжки и стороны квадрата для системы калибров ромб—квадрат в валках диаметром 500 *мм*

рате и предчистовом ромбе. Определив уширение в чистовом квадрате и зная площадь предчистового ромба, находят высоту и ширину последнего.

5. Исходя из вытяжки в предчистовом ромбе, определяют площадь и сторону предчистового квадрата.

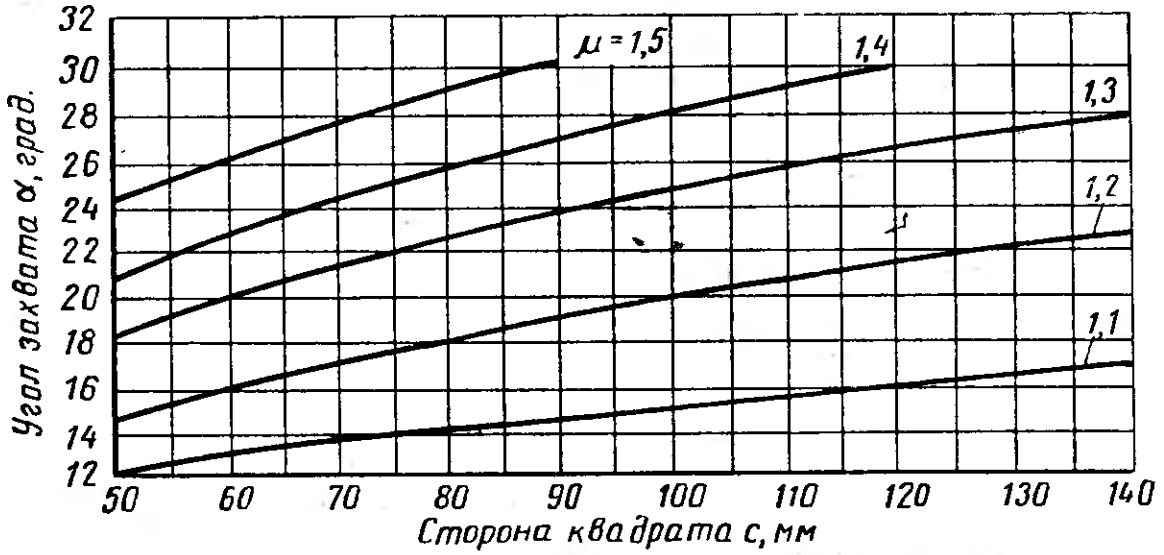



Рис. 114. Зависимость угла захвата от вытяжки и стороны квадрата для системы калибров ромб—квадрат в валках диаметром 800 *мм*

6. Далее рассчитывают размеры черновых калибров. Если выбрана система овал—квадрат, то расчет ведут аналогично расчету калибровки круглой стали (см. гл. V). Для системы ромб—квадрат расчет ведут так же, как и для системы овал—квадрат, а именно: по графикам рис. 111—114 находят коэффициенты вытяжек в зависимости от допускаемых углов захвата, определяют площади чер-

новых ромбов и квадратов. Найденное из графиков (см. рис. 54—57) уширение в квадратных калибрах позволяет найти высоту и ширину всех промежуточных ромбов.

7. Все данные калибровки заносят в таблицу и вычерчивают калибры.

### Примерный расчет калибровки квадратной стали ($c = 25$ *мм*) при прокатке на линейном мелкосортном стане 350

Линейный стан состоит из обжимной клети с валками диаметром 550 *мм* и чистовой линии из пяти клетей с валками диаметром 350 *мм* при $n = 270$ *об/мин*.

В примерном расчете дается калибровка квадрата $c = 25$ *мм* из начального квадрата $c_0 = 45$ *мм*, который прокатывают на этом стане из заготовки большего сечения.

По ГОСТ 2591—57 допускаемые отклонения при повышенной точности для квадрата $c = 25$ *мм* составляют $+0{,}2$ и $-0{,}4$ *мм*.

Если учитывать увеличение сечения от износа валков и принять минусовые допуски, то сторона квадрата в холодном состоянии равна

$$c_x = 25 - \frac{0{,}4}{2} = 24{,}8 \text{ мм}.$$

Сторона чистового квадрата в горячем состоянии

$$c_г = 1{,}013 \cdot c_x = 1{,}013 \cdot 24{,}8 = 25{,}2 \text{ мм}.$$

Площадь чистового квадрата

$$q_1 = c_г^2 = 25{,}2^2 = 635 \text{ мм}^2.$$

Закругления в чистовом квадрате не делают. Коэффициент вытяжки в чистовом квадрате по графику (см. рис. 74) принимаем $\mu_1 = 1{,}11$. Тогда площадь предчистового ромба равна

$$q_2 = \mu_1 q_1 = 1{,}11 \cdot 635 \approx 705 \text{ мм}.$$

Уширение ромбической полосы в чистовом квадрате по графику (см. рис. 56) получили равным $\Delta b_2 = 2 \div 3$ *мм*.

Высота ромба равна

$$h_2 = 1{,}41 \cdot c_1 - \Delta b_1 = 1{,}41 \cdot 25{,}2 - 3 = 32{,}5 \text{ мм};$$

ширина ромба

$$b_2 = \frac{2q_2}{h_2} = \frac{2 \cdot 705}{32{,}5} = 43{,}4 \text{ мм}.$$

Для ромбов и квадратов определяем геометрические размеры. В калибрах наносим закругления углов.

Коэффициент вытяжки в предчистовом ромбе, согласно графику (см. рис. 74), принимаем $\mu_2 = 1{,}2$.

Площадь предчистового квадрата

$$q_3 = \mu_2 q_2 = 1{,}2 \cdot 705 = 845 \text{ мм}^2.$$

Сторона предчистового квадрата

$$c_3 = \sqrt{q_2} = \sqrt{845} = 29{,}0 \text{ мм}.$$

Далее идут черновые калибры по системе ромб—квадрат.

Определяем допускаемые углы захвата при скорости прокатки примерно 5 *м/сек*. По графику (см. рис. 45) при такой скорости и температуре примерно 1000° С допускаемый угол захвата составляет $\alpha = 20°$.

Для квадрата $c_3 = 29$ *мм* при $\alpha = 20°$, согласно графику (см. рис. 112), коэффициент вытяжки можно принять $\mu_1 = 1{,}3$. Такую же вытяжку принимаем и в следующем большем ромбе. Тогда площадь чернового квадрата калибра V будет равна

$$q_5 = \mu_4 \mu_3 q_3 = 1{,}3 \cdot 1{,}3 \cdot 845 = 1430 \text{ мм}^2.$$

Сторона квадрата калибра V

$$c_5 = \sqrt{1430} = 37{,}8 \text{ мм}.$$

В калибре V по графику (см. рис. 112) для квадрата $c_5 = 37{,}8$ *мм* при $\alpha = 20°$ коэффициент вытяжки составляет $\mu_5 = 1{,}2$. Такой же коэффициент вытяжки принимаем и в следующем большем ромбе $\mu_6 = 1{,}2$.

Тогда площадь квадрата калибра *VII* будет равна

$$q_7 = \mu_6 \mu_5 q_5 = 1{,}2 \cdot 1{,}2 \cdot 1430 = 2060 \text{ мм}^2.$$

Сторона квадрата

$$c_7 = \sqrt{2060} = 45{,}5 \text{ мм}.$$

Принимаем окончательно:

$$c_0 = 45 \text{ мм}; \; c_5 = 37{,}5 \text{ мм}; \; c_2 = 29 \text{ мм}.$$

Определим размеры промежуточных ромбов.

Ромбический калибр предусматриваем между квадратами *V* и *III*. Общий коэффициент вытяжки в калибрах *IV* и *III* равен

$$\mu_4 \mu_3 = \frac{c_5^2}{c_3^2} = \frac{37{,}5^2}{29^2} = 1{,}67.$$

Принимая в ромбе и квадрате одинаковые вытяжки, получим

$$\mu_4 = \mu_3 = \sqrt{1{,}67} = 1{,}29.$$

Площадь ромбического калибра *IV*

$$q_4 = \mu_3 c_3^2 = 1{,}29 \cdot 29^2 = 1085 \text{ мм}^2.$$

По графику (см. рис. 56) для вытяжки $\mu_3 = 1{,}29$ и квадрата $c_3 = 29$ *мм* уширение $\Delta b_3 = 5$ *мм*.

Тогда высота ромба

$$h_4 = 1{,}41 \cdot c_3 - \Delta b_3 = 1{,}41 \cdot 29 - 5 \approx 36 \text{ мм}.$$

Ширина ромба

$$b_4 = \frac{2 \cdot q_4}{h_4} = \frac{2 \cdot 1085}{36} \approx 60{,}0 \text{ мм}.$$

Размеры квадратного калибра *V*

$$b_5 = h_5 = 1{,}41 c_5 = 1{,}41 \cdot 37{,}5 = 53 \text{ мм}.$$

Простор на уширение в ромбическом калибре *IV*

$$\Delta b_4 = b_4 - h_5 = 60 - 53 = 7 \text{ мм}.$$

Можно по графику (см. рис. 56) определить уширение в случае задачи квадрата в ромб при $\mu_4 = 1{,}29$ и условной стороне ромба, равной

$$\sqrt{q_4} = \sqrt{1085} = 33 \text{ мм}.$$

Соответственно этим данным уширение $\Delta b_4 = 5{,}5$ *мм*. Простор на уширение составляет 7 *мм*, поэтому размеры ромба калибра *IV* оставляем без изменения.

*Ромбический калибр VI*

Коэффициенты вытяжки в калибрах *VI* и *V* равны

$$\mu_6 \mu_5 = \frac{c_0^2}{c_5^2} = \frac{45^2}{37{,}5^2} = 1{,}44;$$

$$\mu_6 = \mu_5 = \sqrt{1{,}44} = 1{,}2.$$

Площадь ромбического калибра *VI*

$$q_6 = \mu_5 c_5^2 = 1{,}2 \cdot 37{,}5^2 = 1685 \text{ мм}^2.$$

Для вытяжки $\mu_5 = 1{,}2$ и квадрата $c_5 = 37{,}5$ *мм* уширение по графику (см. рис. 56) составляет $\Delta b_5 = 5$ *мм*.

Высота ромба

$$h_6 = 1{,}41 \cdot c_5 - \Delta b_5 = 48 \text{ мм}.$$

Ширина ромба

$$b_6 = \frac{2 q_6}{h_6} = \frac{2 \cdot 1685}{48} \approx 70 \text{ мм}.$$

Размеры задаваемой квадратной заготовки

$$b_7 = h_7 = 1{,}41 \cdot c_7 = 1{,}41 \cdot 45 = 63{,}5 \text{ мм}.$$

Простор на уширение составляет

$$\Delta b_6 = b_6 - b_7 = 70 - 63{,}5 = 6{,}5 \text{ мм}.$$

Таблица 49

**Калибровка квадратной стали 25×25 *мм* при $D = 350$ *мм* и $s = 3$ *мм***

| Номер прохода | Номер калибра | Форма калнбра | Размеры без закругления, *мм* | | | | Размеры с закруглениями, *мм* | | | Максимальное обжатие $\Delta h$, *мм* | Простор на уширение $\Delta b$, *мм* | Площадь поперечного сечения без закругления $q$, *мм*² | Коэффициент вытяжки $\mu$ | Катающий диаметр $D_к$, *мм* | Угол захвата $\alpha$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | $h$ | $b$ | сторона квадрата $c$ | $\frac{b}{h}$ | $h'$ | $b'$ | радиус закругления $r$ | | | | | | |
| 1 | *VII* | Квадрат . . . . | 63,5 | 63,5 | 45 | — | 57,8 | 57,8 | 7 | — | — | 2020 | — | — | — |
| 2 | *VI* | Ромб . . . . . | 48 | 70 | — | 1,46 | 45,0 | 65,7 | 7 | 15,5 | 6,5 | 1685 | 1,2 | 302 | 18° 30′ |
| 3 | *V* | Квадрат . . . . | 53 | 53 | 37,5 | — | 48,9 | 50 | 5 | 17,0 | 5 | 1410 | 1,2 | 297 | 19° 30′ |
| 4 | *IV* | Ромб . . . . . | 36 | 60 | — | 1,67 | 34,7 | 55 | 4 | 17,0 | 7 | 1085 | 1,3 | 314 | 19° |
| 5 | *III* | Квадрат . . . . | 41 | 41 | 29 | — | 37,7 | 38 | 4 | 19,0 | 5 | 845 | 1,29 | 309 | 20° |
| 6 | *II* | Ромб . . . . . | 32,5 | 43,4 | — | 1,34 | — | — | — | 8,5 | 2,4 | 705 | 1,2 | 317,5 | 13° |
| 7 | *I* | Квадрат . . . . | 35,6 | 35,6 | 25,2 | — | — | — | — | 7,8 | 3,1 | 635 | 1,11 | 314,4 | 12° 13′ |

По графику (см. рис. 56) необходимое уширение для условного квадрата со стороной, равной $\sqrt{1685} = 41$ *мм*, при $\mu_6 = 1{,}2$ равно $\Delta b_6 = 5$ *мм*. Следовательно, размеры ромбического калибра *VI* оставляем без изменения.

Результаты расчетов заносим в табл. 49, в которой приведены геометрические размеры квадратных и ромбических калибров и фактические размеры их с учетом закруглений [1]. Закругления несколько изменяют высоту и ширину калибров, соответственно чему меняется обжатие и уширение в каждом калибре. Однако эти изменения, во-первых, незначительные, а во-вторых, закругление у вершины примерно такое же, как и притупление у зазора, так что уширение (вернее, простор на уширение) останется примерно таким же; малый простор на уширение получился только во втором, предчистовом ромбе.

Однако если учитывать закругления квадратной полосы, задаваемой в предчистовой ромб ($b_3 = 38$ *мм*), то простор на уширение в нем составит около 4 *мм*, что вполне достаточно.

Катающие диаметры и углы захвата рассчитывают, исходя из размеров без учета закруглений. С учетом закруглений углы захвата будут несколько меньше.

Полученные углы захвата не выходят за пределы допустимых.

Зазор в черновых калибрах приняли $s = 3$ *мм*, в чистовом квадрате и предчистовом ромбе зазор можно брать равным 1,5—2 *мм*.

Следует также отметить, что выбором величины радиусов закруглений калибров у буртов можно регулировать простор на уширение в ромбических и квадратных калибрах, если он окажется недостаточным. При этом можно несколько увеличить коэффициенты вытяжки в ромбических и квадратных калибрах.

### 3. ПРОКАТКА КВАДРАТНОЙ СТАЛИ НА НЕПРЕРЫВНОМ СТАНЕ

На непрерывном мелкосортном стане Криворожского металлургического завода квадрат 16×16 *мм* прокатывают из квадратной заготовки сечением 80×80 *мм* и длиной 11—12 *м* (табл. 50).

В черновой группе применяют те же калибры, что и для других профилей (рис. 115), а в чистовой группе предусматривают общие калибры системы овал—ребровый овал до клети 11 включительно.

В последних четырех клетях (12, 13, 14 и 15) предусмотрены калибры для прокатки квадрата 16×16 *мм*, а именно: ромб, квадрат, предчистовой ромб и чистовой квадрат (рис. 116). Как показала практика работы на непрерывном стане, четырех указанных калибров вполне достаточно для получения квадратного профиля; остальные калибры являются общими и для круглых профилей.

[1] Фактические размеры калибров с закруглениями определены по формулам, приведенным в гл. I.

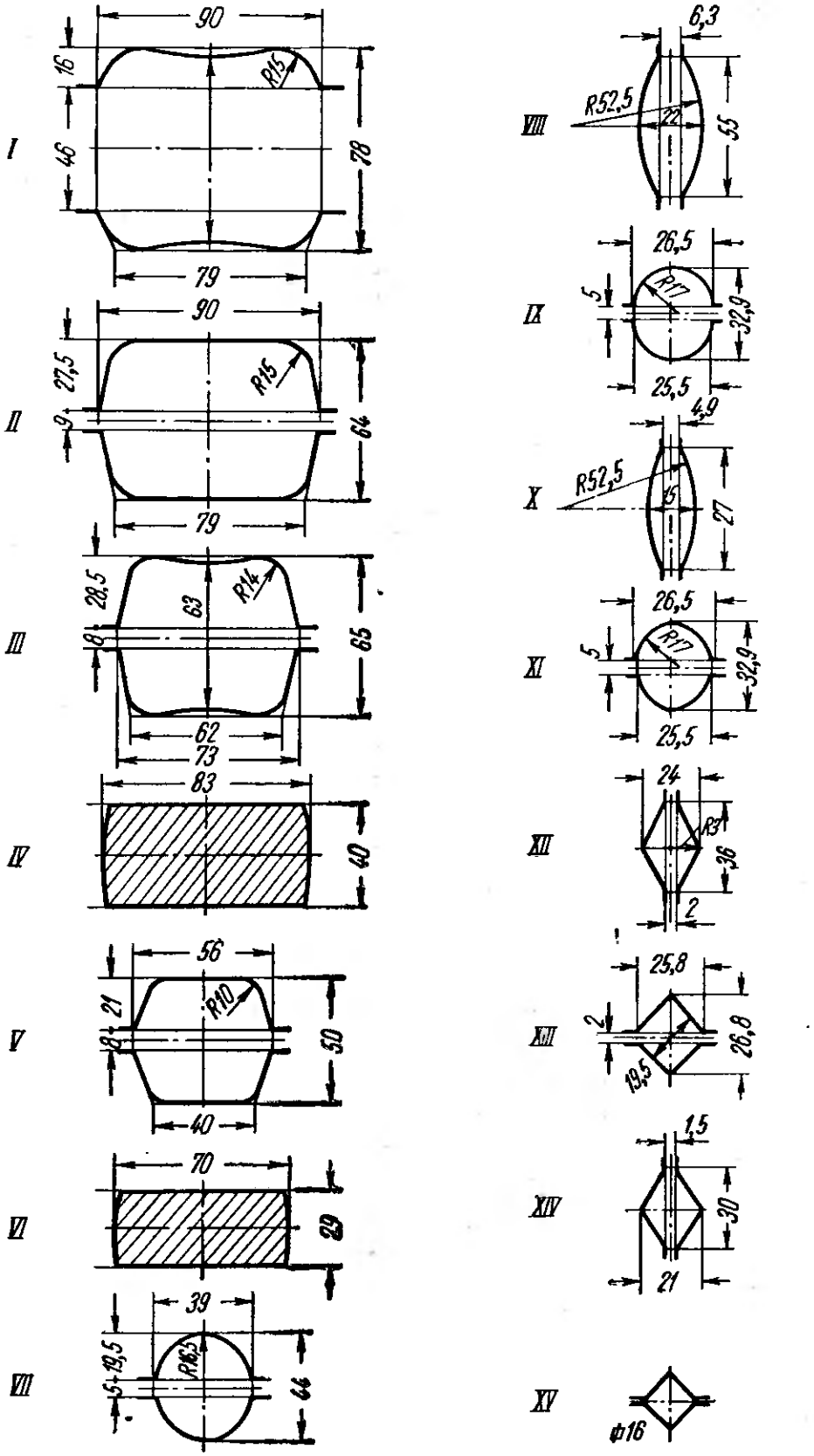



Рис. 115. Схема калибровки квадратной стали 16×16 *мм* на непрерывном мелкосортном стане 250

Для получения точных углов квадратного профиля предчистовой ромбический калибр имеет специальную форму с вогнутыми гранями. Для этой же цели при прокатке с натяжением на непрерывном стане 250 черновой квадрат клети 13 заменяют ромбом специальной формы с двойным уклоном боковых граней (см. рис. 116). В этом случае угол при вершине составляет 83°, а у места разъема $<90°$.

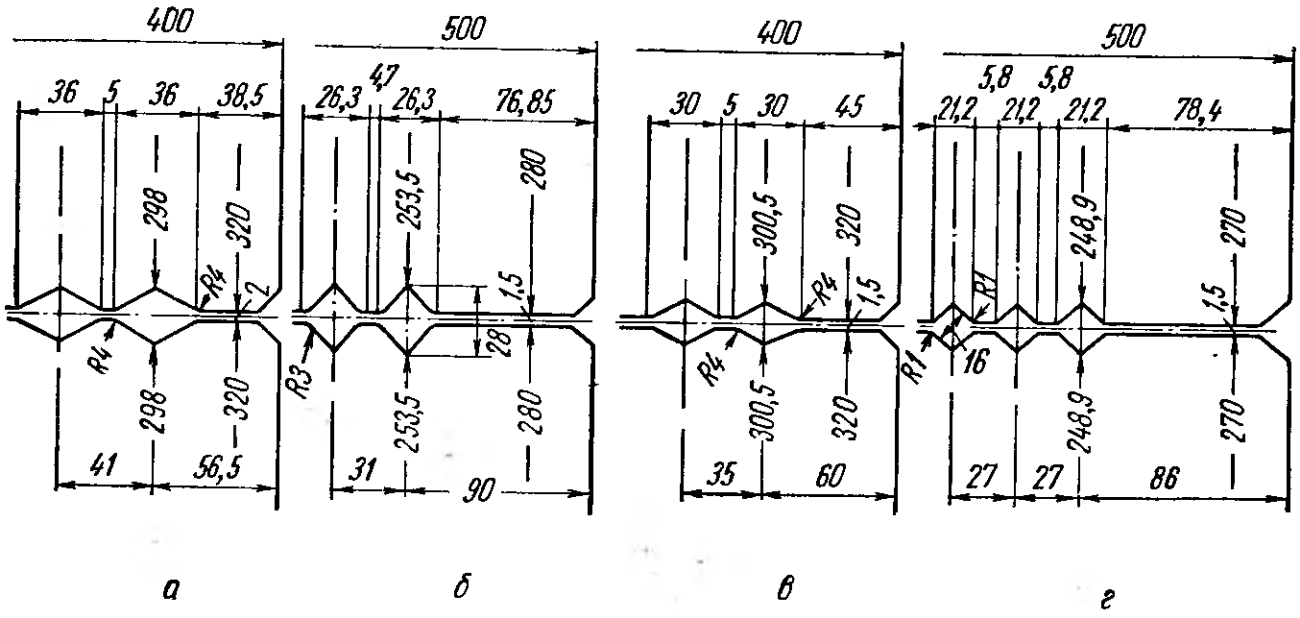
Таблица 50

**Калибровка квадратной стали 16×16 *мм* на непрерывном мелкосортном стане 250**

| Группа клетей | Номер клети | Вид калибра | Размеры полосы: высота $h$, *мм* | Размеры полосы: ширина $b$, *мм* | Размеры полосы: площадь сечения $Q$, *мм*² | Коэффициент вытяжки $\mu$ | Катающий диаметр $D_к$, *мм* | $n$, *об/мин* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Заготовка 80 × 80 = 6400 *мм*² | | | | | | |
| Черновая | 1 | Ящичный | 77 | 82 | 6150 | 1,04 | 350 | 30,3 |
| | 2 | » | 64 | 85 | 5230 | 1,18 | 327 | 38,2 |
| | 3 | » | 65 | 71 | 4200 | 1,24 | 229 | 47,1 |
| | 4 | » | 40 | 83 | 3240 | 1,30 | 380 | 52,8 |
| | 5 | » | 52 | 51 | 2460 | 1,32 | 342 | 77,8 |
| | 6 | Овал | 32 | 68 | 2130 | 1,15 | 380 | 80 |
| | 7 | Ребровый овал | 51,0 | 38 | 1550 | 1,37 | 340,5 | 126 |
| Чистовая | 8в | Овал | 56,0 | 27,0 | 1220 | 1,27 | 319 | 167 |
| | 9 | Ребровый овал | 40,5 | 31,5 | 945 | 1,29 | 305,5 | 226 |
| | 10в | Овал | 46 | 20,0 | 745 | 1,27 | 322 | 271 |
| | 11 | Ребровый овал | 31,5 | 25,0 | 597 | 1,26 | 310 | 351 |
| | 12в | Ромб | 36,0 | 23,7 | 473 | 1,26 | 318 | 431 |
| | 13 | Квадрат | 27,2 | 27,0 | 350 | 1,35 | 268 | 695 |
| | 14в | Ромб | 30 | 20,5 | 278 | 1,26 | 321 | 726 |
| | 15 | Квадрат | 22,8 | 22,8 | 261 | 1,08 | 269 | 926 |

Применение такой конструкции чернового квадрата в клети 13 позволило уменьшить примерно в два раза выработку предчистового ромба, повысить устойчивость ромбической полосы, задаваемой в клеть 13, а также применить натяжение между клетями без искажения чистового квадрата.

Заводская калибровка квадратной стали 16×16 *мм*, прокатываемой на непрерывном мелкосортном стане 250, приведена в табл. 50 с небольшими изменениями по сравнению с калибровкой, показанной на рис. 115.




*а* *б* *в* *г*

Рис. 116. Монтаж калибров на валках чистовой группы для прокатки квадратной стали 16×16 *мм* на непрерывном мелкосортном стане:

| Рис. | Номер клети | Вид калибра | Всего калибров, шт |
|---|---|---|---|
| *а* | 12 | Черновой ромб | 8 |
| *б* | 13 | Черновой квадрат | 6 |
| *в* | 14 | Предчистовой ромб | 9 |
| *г* | 15 | Чистовой квадрат | 13 |

Глава VII

# ПРОКАТКА И КАЛИБРОВКА ПОЛОСОВОЙ СТАЛИ

## 1. СПОСОБЫ ПРОКАТКИ ПОЛОСОВОЙ СТАЛИ

Полосовую сталь, согласно ГОСТ 103—57, прокатывают шириной 12—200 *мм* и толщиной 4—60 *мм*. Допускаемые отклонения по толщине составляют, например, +0,2 и —0,5 *мм* для полос толщиной 7—16 *мм* включительно и +0,2 и —1,2 *мм* для полос толщиной 28—32 *мм*.

Допускаемые отклонения по ширине составляют, например, +0,5 и —1,0 *мм* для полос шириной 12—50 *мм*.

В зависимости от назначения и размеров полосовая сталь может быть следующих видов:

1) обручное железо толщиной 1,5—3,5 *мм* и шириной 20—100 *мм*;

2) шинное железо шириной 40—65 *мм* и толщиной 5—12 *мм* с закругленными краями;

3) рессора гладкая или желобчатая;

4) штрипсы для изготовления сварных труб шириной 30—400 *мм* и толщиной 1,7—15 *мм*;

5) лента толщиной $\geqslant$1,5 *мм*, предназначенная для сварных труб и других нужд народного хозяйства;

6) сутунка шириной 150—400 *мм* и толщиной 5—20 *мм*, из которой прокатывают тонкие листы на станах старого типа.

Различают следующие способы прокатки полосовой стали.

*Прокатка в закрытых калибрах.* Этот способ применяют при прокатке сутунки и полосы шириной $>$80 *мм* на линейных станах. Недостатки этого способа — частые перевалки и необходимость иметь большой парк валков.

*Прокатка в ступенчатых валках.* Такую прокатку применяют при изготовлении полос шириной $<$80 *мм*. Для получения точных размеров по ширине применяют ребровые калибры. Обычно применяют ребровый предчистовой калибр, а в чистовой клети — гладкие валки. Для получения более точных размеров применяют два ребровых калибра, особенно при прокатке качественных сталей. Прокатку в ступенчатых валках ведут на линейных станах, обычно из заготовки квадратного сечения со свободным уширением.

*Прокатка на станах с последовательным расположением клетей и на мелкосортных станах*, когда в одной клети дают один проход. В этом случае прокатку ведут в клетях с калиброванными или

гладкими валками, а для уточнения размеров применяют один-два ребровых калибра, причем малые размеры прокатывают из квадратного сечения.

*Прокатка на непрерывных мелкосортных, полосовых и штрипсовых станах.* На таких станах имеются клети с вертикальными валками, которые служат для получения полосы необходимой ширины. На непрерывных мелкосортных станах применяют в первых клетях калиброванные валки, в последних — гладкие валки.

## 2. ПРОКАТКА ПОЛОСЫ В ЗАКРЫТЫХ КАЛИБРАХ НА ЛИНЕЙНЫХ СТАНАХ

Как указывалось выше, этот способ прокатки применяют на линейных станах для полос шириной >80 *мм*. Такой способ, как правило, применяют на линейных сутуночных, среднесортных и крупносортных станах. Сначала на стане получают исходный квадрат, который затем прокатывают в одном направлении в закрытых прямоугольных калибрах с ограниченным уширением.

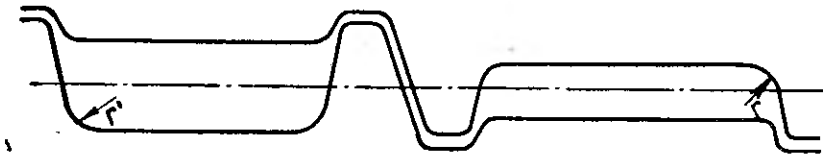


Рис. 117. Закрытые прямоугольные калибры для прокатки полосовой стали

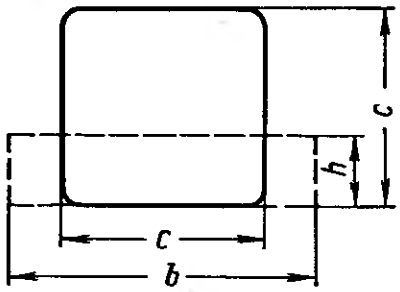



Рис. 118. К определению среднего показателя уширения

Такие прямоугольные калибры характеризуются тем, что боковые стенки их образуются только одним валком, так что разъем валков находится у нижних или верхних углов прокатываемой полосы (рис. 117).

*Общий ход расчета калибровки* при прокатке полосы в закрытых калибрах следующий.

1. Устанавливают размеры профиля в горячем состоянии с учетом допускаемых отклонений.

При минусовом допуске имеем, *мм*:

$$b_г = \left(b - \frac{\Delta}{2}\right)(1{,}012 \div 1{,}015);$$

$$h_г = \left(h - \frac{\Delta}{2}\right)(1{,}012 \div 1{,}015).$$

2. Определяют размеры начального квадрата, исходя из среднего показателя уширения.

Согласно рис. 118, имеем

$$b_г = c_г + k\,(c_г - h_г),$$

где $k = \dfrac{\sum \Delta b}{c - h_г}$ — средний показатель уширения.

Из последнего равенства определяют размер исходного квадрата

$$c = \frac{b_г + kh_г}{1 + k}. \qquad (73)$$

3. Находят суммарный коэффициент уменьшения высоты

$$P = \frac{c}{h_г},$$

где $c$ — начальная высота заготовки;

$h_г$ — толщина полосы в чистовом калибре.

4. Устанавливают коэффициенты уменьшения высоты по отдельным калибрам

$$P = p_1 p_2 p_3 p_4 \ldots p_n, \qquad (74)$$

где

$$p_1 = \frac{c}{h_1}; \quad p_2 = \frac{h_1}{h_2}; \quad p_3 = \frac{h_2}{h_3}; \quad \ldots \quad p_n = \frac{h_{n-1}}{h_n}.$$

При выборе коэффициентов уменьшения высоты можно использовать данные, приведенные в табл. 51.

Таблица 51

**Коэффициенты уменьшения толщины при прокатке полос в закрытых калибрах**

| Общее число проходов | Средний режим обжатий | | Интенсивный режим | |
|---|---|---|---|---|
| | $p = \frac{H}{h}$ | $P = \frac{c}{h_г}$ | $p = \frac{H}{h}$ | $P = \frac{c}{h_г}$ |
| 8 | 1,6 | 30,4 | — | — |
| 7 | 1,6 | 19,0 | 1,80 | 39,3 |
| 6 | 1,6 | 11,9 | 1,80 | 21,8 |
| 5 | 1,6 | 7,41 | 1,80 | 12,12 |
| 4 | 1,6 | 4,64 | 1,80 | 6,74 |
| 3 | 1,6 | 2,90 | 1,80 | 3,74 |
| 2 | 1,45 | 1,81 | 1,60 | 2,08 |
| 1 | 1,25 | 1,30 | 1,30 | 1,30 |

5. Рассчитывают высоту полосы и уширение в каждом калибре и результаты расчета записывают в таблицу предварительной калибровки.

6. Производят корректировку полученных данных, чтобы уточнить размеры исходного квадрата. Составляют таблицу окончательной калибровки полосы.

## Примерный расчет калибровки при прокатке полосы сечением 120×10 *мм* в закрытых калибрах

Прокатку ведут на линейном стане с валками диаметром 500 *мм* при $n = 120$ *об/мин*. Материал полосы — конструкционная сталь. Согласно ГОСТ 103—57, допускаемые отклонения для полосы 120×10 *мм* составляют +1,1 и —2,4 *мм* по ширине и +0,2 и —0,5 *мм* по толщине.

Определим размеры полосы в горячем состоянии:

$$b_г = 1{,}014\left(b - \frac{\Delta b}{2}\right) = 1{,}014\left(120 - \frac{2{,}4}{2}\right) = 121 \text{ мм};$$

$$h_г = 1{,}014\left(h - \frac{\Delta h}{2}\right) = 1{,}014\left(10 - \frac{0{,}5}{2}\right) = 9{,}9 \text{ мм}.$$

Для определения размеров исходного квадрата пользуемся средним показателем уширения, который выбираем в зависимости от размеров прокатываемой полосы. При прокатке в закрытых калибрах из-за ограниченного уширения показатель уширения будет меньше, чем при свободном уширении.

Можно принимать

$$k_{огр} = (0{,}5 \div 0{,}7)\, k_{св}.$$

В табл. 52 приведены значения среднего показателя уширения $k_{огр}$ и $k_{св}$.

Таблица 52

**Значение среднего показателя уширения**

| Ширина полосы, *мм* | $k_{огр}$ | $k_{св}$ |
|---|---|---|
| 20—80 | 0,45—0,35 | 0,9—0,7 |
| 80—150 | 0,35—0,25 | — |
| >150 | 0,25—0,15 | — |

В нашем случае для полосы шириной 120 *мм* примем $k_{огр} = 0{,}3$. Тогда предварительный размер исходного квадрата будет

$$c = \frac{b_г + k_{огр} h_г}{1 + k_{огр}} = \frac{121 + 0{,}3 \cdot 9{,}9}{1 + 0{,}3} = 95 \text{ мм}.$$

Суммарный коэффициент уменьшения высоты

$$P = \frac{c}{h_г} = \frac{95}{9{,}9} = 9{,}6.$$

Примем интенсивный режим обжатий (см. табл. 51), тогда общий коэффициент уменьшения высоты за пять проходов будет:

$$P_{табл} = p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \cdot p_4 \cdot p_5 = 1{,}8 \cdot 1{,}8 \cdot 1{,}8 \cdot 1{,}6 \cdot 1{,}3 = 12{,}12.$$

В нашем случае суммарный коэффициент уменьшения высоты равен $P = 9{,}6$.

Следовательно, частные коэффициенты нужно соответственно уменьшить, но сначала проверяем, можно ли в первом, а также во втором калибрах применить указанные коэффициенты уменьшения

высоты с учетом допускаемых углов захвата. В первом калибре толщина выходящего раската равна

$$h_1 = \frac{c}{p_1} = \frac{95}{1{,}8} = 52{,}8 \text{ мм}.$$

Следовательно, обжатие равно

$$\Delta h_1 = c - h_1 = 95 - 52{,}8 = 42{,}2 \text{ мм}.$$

Принимая минимальный диаметр после переточек

$$D_{\min} = 0{,}95D = 0{,}95 \cdot 500 = 475 \text{ мм},$$

находим угол захвата при обжатии $\Delta h_1 = 42{,}2$ *мм*:

$$\alpha_1 = \arccos\left(1 - \frac{\Delta h_1}{D_к}\right) = \arccos\left(1 - \frac{42{,}2}{475 - 52{,}8}\right) = 26°.$$

Такой угол захвата следует признать завышенным, что видно из следующего подсчета.

Окружная скорость валков в первом калибре составляет

$$v = \frac{\pi D_к n}{60} = \frac{3{,}14 \cdot 0{,}422 \cdot 120}{60} = 2{,}7 \text{ м/сек}.$$

Согласно графику (см. рис. 45), при скорости 2,7 *м/сек* и температуре 1100° С допускаемый угол захвата составляет $\alpha \approx 24°$.

При таком угле захвата обжатие и коэффициент уменьшения высоты в первом калибре равны

$$\frac{c - D_{\min}(1 - \cos\alpha)}{\cos\alpha} = \frac{95 - 475(1 - \cos 24°)}{24°} = 59 \text{ мм};$$

$$\Delta h_1 = 95 - 59 = 36 \text{ мм};$$

$$p_1 = \frac{95}{59} = 1{,}61.$$

Проверяем второй проход по углу захвата при табличном коэффициенте уменьшения толщины $p_2 = 1{,}80$:

$$h_2 = \frac{59}{1{,}8} = 32{,}8 \text{ мм};$$

$$\Delta h_2 = 59 - 32{,}8 = 26{,}2 \text{ мм};$$

$$\alpha_2 = \arccos\left(1 - \frac{26{,}2}{475 - 32{,}8}\right) \approx 20° < 24°.$$

Следовательно, во втором проходе допускаем коэффициент $p_2 = 1{,}8$.

Итак, необходимо скорректировать коэффициенты в четырех калибрах. Согласно таблице

$$P_{\text{табл}} = 1{,}8 \cdot 1{,}8 \cdot 1{,}6 \cdot 1{,}3 = 6{,}74.$$

По расчету

$$P_{\text{расч}} = \frac{P}{p_1} = \frac{9{,}6}{1{,}61} = 5{,}95.$$

Если в чистовом калибре оставить $p_5 = 1{,}3$, то в калибрах *II*, *III* и *IV* следует несколько уменьшить коэффициенты уменьшения высоты по сравнению с табличными данными. Пользуясь логарифмической линейкой, устанавливаем следующие коэффициенты:

$$p_2 p_3 p_4 p_5 = 1{,}7 \cdot 1{,}7 \cdot 1{,}58 \cdot 1{,}3 = 5{,}95.$$

Зная коэффициенты уменьшения высоты $p$ во всех проходах, определяем значения высоты калибров по проходам:

$$c = 95 \text{ мм};$$

$$h_1 = 95 : 1{,}61 = 59 \text{ мм};$$

$$h_2 = 59 : 1{,}7 = 34{,}7 \text{ мм};$$

$$h_3 = 34{,}7 : 1{,}7 = 20{,}4 \text{ мм};$$

$$h_4 = 20{,}4 : 1{,}58 = 12{,}9 \text{ мм};$$

$$h_5 = 12{,}9 : 1{,}3 = 9{,}9 \text{ мм}.$$

Можно значения высот по отдельным калибрам округлить, в результате чего несколько изменятся коэффициенты уменьшения высоты, что практически не имеет значения.

Поэтому окончательно принимаем:

$$c = 95 \text{ мм}; \quad h_3 = 20 \text{ мм};$$

$$h_1 = 60 \text{ мм}; \quad h_4 = 13 \text{ мм};$$

$$h_2 = 35 \text{ мм}; \quad h_5 = 9{,}9 \text{ мм}.$$

Необходимо определить уширение по отдельным калибрам с учетом коэффициента ограничения $k_{\text{огр}} = 0{,}6$.

Расчет уширения ведем от чистового калибра $b_5 = 121$ *мм*. Вместо $b_{\text{ср}}$ можно в формулу уширения подставлять ширину в данном калибре.

Полученные данные записываем в таблицу предварительной калибровки, в которую заносим также значения катающих диаметров и углов захвата (табл. 53).

Как видно из табл. 53, начальное сечение не получилось квадратным, как было заранее определено (95×95 *мм*), так как принятый средний показатель уширения $k_{\text{огр}}$ является приближенным и не может точно совпадать с результатами уширения, подсчитанными по формулам.

Таблица 53

**Предварительная калибровка полосовой стали 120×10 *мм***

| Номер прохода | Коэффициент уменьшения высоты $p$ | Толщина полосы $h$, *мм* | Обжатие $\Delta h$, *мм* | Ширина полосы $b$, *мм* | Уширение $\Delta b$, *мм* | Катающий диаметр $D_к$, *мм* | Угол захвата $\alpha°$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | — | 95 | — | 89,0 | — | — | — |
| 1 | 1,59 | 60 | 35 | 100,3 | 11,3 | 440 | 23 |
| 2 | 1,71 | 35 | 25 | 110,4 | 10,1 | 465 | 19 |
| 3 | 1,75 | 20 | 15 | 117,3 | 6,9 | 480 | 14,3 |
| 4 | 1,54 | 13 | 7 | 120,3 | 3,0 | 487 | 9,6 |
| 5 | 1,31 | 9,9 | 3,1 | 121,0 | 0,7 | 490,1 | 6,5 |

Можно оставить начальное сечение 95×90 *мм*, но если необходимо получить квадратное сечение, то можно принять 90×90 *мм*, в результате чего уменьшится обжатие в первом калибре.

Следует также иметь в виду, что ширину прокатываемой полосы можно регулировать за счет коэффициента ограничения, который колеблется в пределах 0,5—0,7.

После корректировки предварительной калибровки составляем окончательную калибровку (табл. 54).

Таблица 54

**Калибровка полосовой стали сечением 120×10 *мм***

| Номер прохода | Толщина $h$, *мм* | Ширина $b$, *мм* | Обжатие $\Delta h$, *мм* | Уширение $\Delta b$, *мм* | Коэффициент уменьшения высоты $p$ | Катающий диаметр $D_к$, *мм* | Угол захвата $\alpha$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 90 | 90 | | | | | |
| 1 | 60 | 100 | 30 | 10 | 1,5 | 440 | 21° 18′ |
| 2 | 35 | 110,4 | 25 | 10,4 | 1,71 | 465 | 19° |
| 3 | 20 | 117,3 | 15 | 6,9 | 1,75 | 480 | 14° 18′ |
| 4 | 13 | 120,3 | 7 | 3,0 | 1,54 | 487 | 9° 36′ |
| 5 | 9,9 | 121,0 | 3,1 | 0,7 | 1,31 | 490,1 | 6° 30′ |

*Построение закрытых полосовых калибров*

Для предупреждения образования заусенцев применяют закругления у дна калибров (см. рис. 117).

Радиус составляет $r = (0{,}25 \div 0{,}9)\ h$, где $h$ — высота калибра. Иногда вместо закруглений радиусами делают притупления углов

наклонными линиями под углом около 45°. Уклоны стенок принимают равными 3—5% для черновых калибров и 0,5—1,0% — для чистовых.

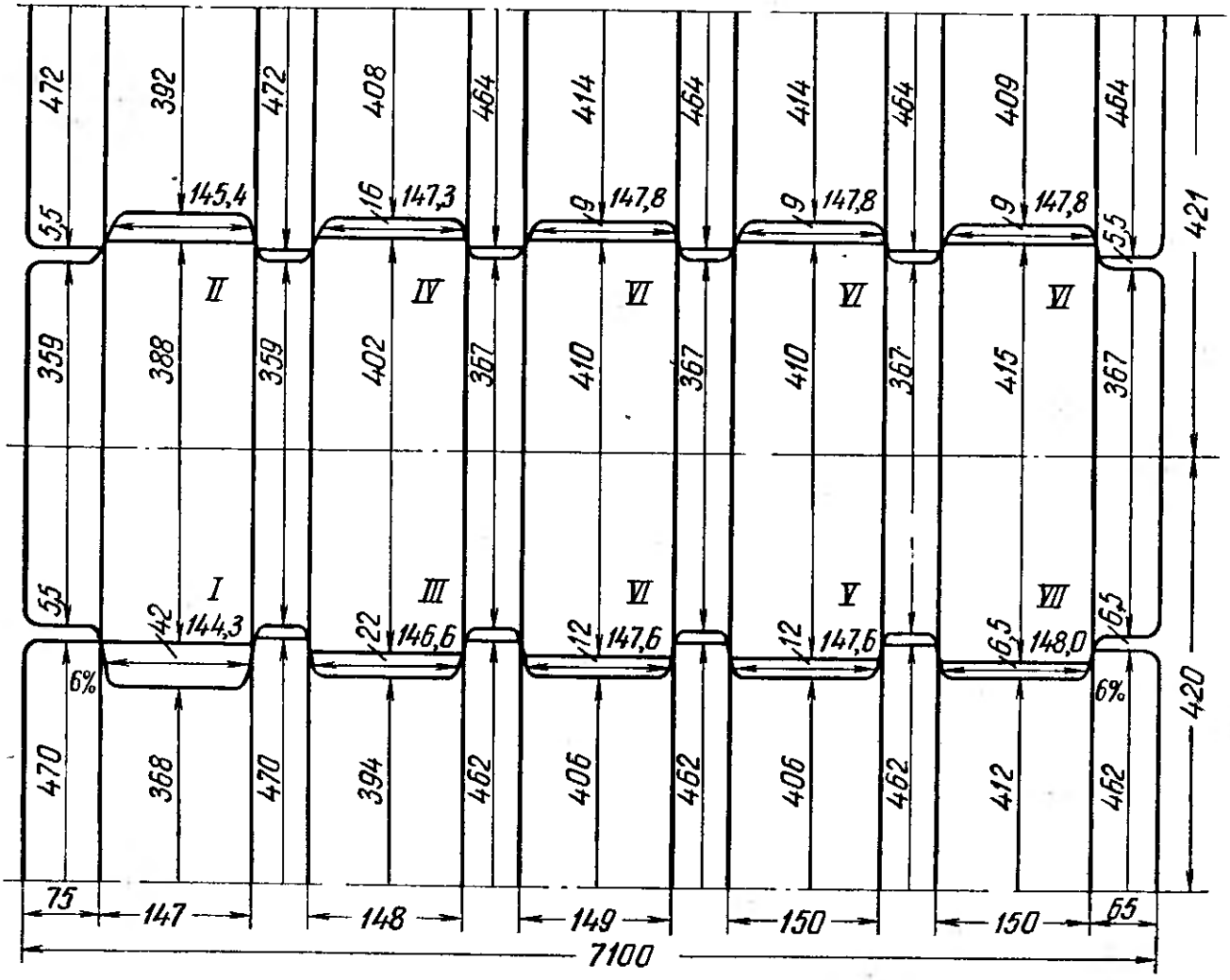



Рис. 119. Размещение закрытых полосовых калибров на валках стана 400

Во избежание кантовки полосы при прокатке места разъема калибров располагают поочередно сверху и снизу.

На рис. 119 показано размещение сопряженных закрытых полосовых калибров в клетях трио. Такое размещение калибров позволяет рационально использовать бочку валков. Правила размещения сопряженных калибров рассмотрены в главе III.

### 3. ПРОКАТКА ПОЛОСЫ НА ГЛАДКОЙ БОЧКЕ С РЕБРОВЫМ КАЛИБРОМ

Полосы шириной $<80$ *мм* прокатывают на гладких или ступенчатых валках. Для регулирования ширины полосы предчистовой калибр делают ребровым и после него дают чистовой проход на гладкой бочке.

Ступенчатые валки (рис. 120) применяют на линейных станах, когда в одной клети приходится делать несколько проходов. Регу-

лируя разъем валков, можно прокатывать полосы толщиной в широком диапазоне из различных заготовок.

В тех случаях, когда клетей достаточно, например на мелкосортных станах, прокатку ведут на валках с гладкой бочкой, причем для точности профиля применяют один или два ребровых калибра. На непрерывных станах при наличии клетей с вертикальными валками необходимость в кантовке полосы отпадает.

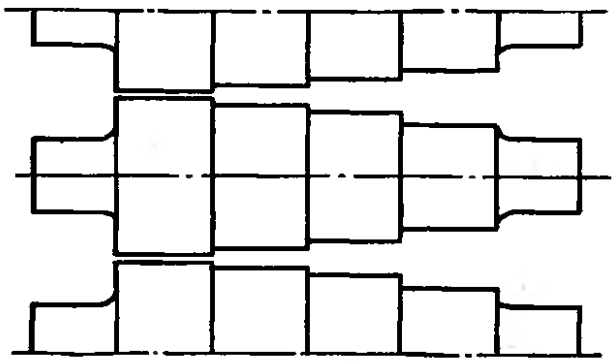


Рис. 120. Ступенчатые валки

Прокатку на гладких валках применяют также на станах с последовательным расположением клетей.

Ниже на примерном расчете показана методика расчета калибровки полосы при прокатке ее в гладких валках с ребровым калибром.

### *Примерный расчет*

Необходимо прокатать полосу 60×8 *мм* на стане с валками диаметром 320 *мм* при $n = 300$ *об/мин*. Материал полосы — пружинная сталь с содержанием углерода 0,7%.

Намечаем следующую схему прокатки (рис. 121). Так как число проходов пока неизвестно, то нумерацию калибров, как и расчет калибровки, будем вести против хода прокатки.

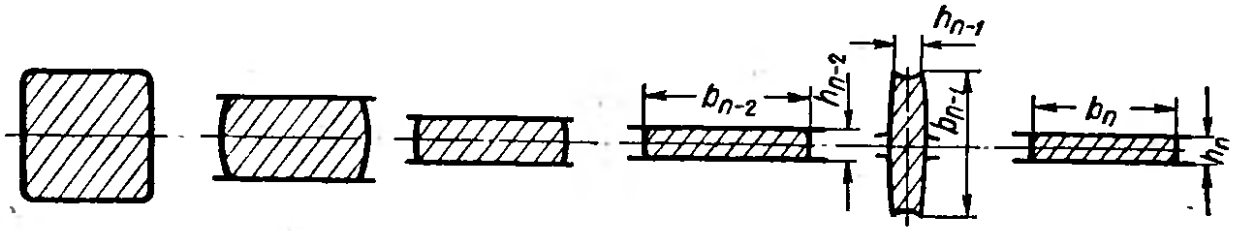



Рис. 121. Схема прокатки полосы на гладких валках с применением ребрового калибра

Допускаемые отклонения для полосы 60×8 *мм* составляют +0,5 и —1,3 *мм* по ширине и +0,2 и —0,5 *мм* по толщине.

Определяем размеры полосы в горячем состоянии:

$$b_1 = \left(60 - \frac{1{,}3}{2}\right) 1{,}013 = 60{,}3 \text{ мм};$$

$$h_1 = \left(8 - \frac{0{,}5}{2}\right) 1{,}013 = 7{,}9 \text{ мм}.$$

Выбираем средний режим обжатий. Согласно данным, приведенным в табл. 51, коэффициент уменьшения высоты равен $p_1 =$

= 1,25. Тогда толщина полосы, задаваемой в чистовой проход, равна

$$h_2 = 1{,}25 \cdot 7{,}9 = 9{,}9 \text{ мм}.$$

Обжатие в чистовом проходе

$$\Delta h_1 = 9{,}9 - 7{,}9 = 2 \text{ мм}.$$

Угол захвата

$$\alpha_1 = \arccos\left(1 - \frac{2}{320}\right) = 6{,}6^\circ \text{ или } \alpha = 0{,}113 \text{ рад}.$$

Определяем свободное уширение в чистовом проходе по формуле (1)

$$\Delta b_1 = \frac{2 \cdot 60{,}3 \cdot 2 \cdot}{(9{,}9 + 7{,}9)\left[1 + (1 + 0{,}113)\left(\frac{60{,}3}{160 \cdot 0{,}113}\right)^2\right]} = 1{,}0 \text{ мм}.$$

Ширина задаваемой полосы

$$b_2 = b_1 - \Delta b_1 = 60{,}3 - 1 = 59{,}3 \text{ мм}.$$

Обжатие в ребровом калибре допускается равным 0,5—0,8 от толщины. В нашем случае принимаем

$$\Delta h_2 = 0{,}5 \cdot 9{,}9 = 5 \text{ мм}.$$

Следовательно, высота полосы, задаваемой в ребровый калибр, равна (полоса кантуется)

$$b_3 = 59{,}3 + 5 = 64{,}3 \text{ мм}.$$

Катающий диаметр в ребровом калибре

$$D_к = D - b_2 = 320 - 59{,}3 = 260{,}7 \text{ мм}.$$

Угол захвата в ребровом калибре

$$\alpha = \arccos\left(1 - \frac{5}{260{,}7}\right) = 11^\circ 15' \text{ или } \alpha = 0{,}196 \text{ рад}.$$

Уширение в ребровом калибре

$$\Delta b_2 = \frac{2 \cdot 9{,}9 \cdot 5}{(64{,}3 + 59{,}3)\left[1 + (1 + 0{,}196)\frac{9{,}9}{130{,}4 \cdot 0{,}196}\right]} \approx 0{,}6 \text{ мм}.$$

Толщина полосы, задаваемой в ребровый калибр, равна

$$h_3 = 9{,}9 - 0{,}6 = 9{,}3 \text{ мм}.$$

Размеры полосы после третьего прохода на гладкой бочке перед задачей в ребровый калибр

$$b_3 \cdot h_3 = 64{,}3 \cdot 9{,}3 \text{ мм}.$$

Полосу таких размеров необходимо прокатать из квадратной заготовки, размеры которой определяем, задавшись средним пока-

зателем свободного уширения. В нашем случае можно принять $k_{св} = 0{,}7$.

Сторона квадрата

$$c = \frac{b_з + kh_з}{1 + k} = \frac{64{,}3 + 0{,}7 \cdot 9{,}3}{1 + 0{,}7} \approx 42 \text{ мм}.$$

Общий коэффициент уменьшения высоты

$$P = \frac{42}{9{,}3} = 4{,}5.$$

Коэффициенты уменьшения высоты по отдельным проходам определяем по данным, приведенным в табл. 55.

Таблица 55

**Коэффициенты уменьшения толщины при прокатке в гладких валках (без чистового прохода)**

| Общее число проходов | Средний режим | | Интенсивный режим | |
|---|---|---|---|---|
| | $p = \frac{H}{h}$ | $P = \frac{c}{h_з}$ | $p = \frac{H}{h}$ | $P = \frac{c}{h_з}$ |
| 7 | 1,6 | 24,30 | — | — |
| 6 | 1,6 | 15,20 | 1,8 | 30,2 |
| 5 | 1,6 | 9,50 | 1,8 | 16,78 |
| 4 | 1,6 | 5,94 | 1,8 | 9,32 |
| 3 | 1,6 | 3,71 | 1,8 | 5,18 |
| 2 | 1,6 | 2,32 | 1,8 | 2,88 |
| 1 | 1,45 | 1,45 | 1,6 | 1,6 |

Если принять средний режим прокатки, то общий коэффициент уменьшения высоты по таблице составляет

$$P_{табл} = 1{,}6 \cdot 1{,}6 \cdot 1{,}45 = 3{,}71.$$

Остановимся на трех проходах (без ребрового и чистового), но для этого необходимо несколько увеличить все коэффициенты вытяжки, умножив их на поправочный коэффициент:

$$m = \sqrt[3]{\frac{4{,}5}{3{,}71}} = 1{,}065,$$

после чего получим:

$$4{,}5 = 1{,}7 \times 1{,}7 \times 1{,}55.$$

Далее расчет ведем аналогично расчету в случае прокатки полосы в калибрах. При этом следует иметь в виду, что прокатка

происходит со свободным уширением. Результаты расчета приведены в табл. 56.

Таблица 56

**Калибровка полосы сечением 60×8 *мм***

| Номер прохода | Коэффициент уменьшения высоты | Толщина $h$, *мм* | Ширина $b$, *мм* | Обжатие $\Delta h$, *мм* | Уширение $\Delta b$ *мм* | Катающий диаметр, $D_к$ | Угол захвата $\alpha$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Заготовка | 42 | 41,8 | — | — | — | — |
| 1 | 1,7 | 24,5 | 53,8 | 17,5 | 12,0 | 320 | 19° 15′ |
| 2 | 1,7 | 14,4 | 60,8 | 10,1 | 7,0 | 320 | 14° 15′ |
| 3 | 1,55 | 9,3 | 64,3 | 5,1 | 3,5 | 320 | 10° 15′ |
| 4 (предчистовой ребровый) | — | 9,9 | 59,3 | 5,0 | 0,6 | 260,7 | 11° 15′ |
| 5 (чистовой) | 1,25 | 7,9 | 60,3 | 2,0 | 1 | 320 | 6° 30′ |

Примечание. В ребровом калибре ширина полосы является высотой, а толщина—шириной.

Как видно из табл. 56, расчеты уширения для каждого прохода дали исходную ширину 41,8 *мм*, т. е. получили требуемый размер заготовки 42×42 *мм*, поэтому калибровку не корректируем.

Если получается большая разница между заданными и расчетными размерами исходной заготовки, то корректировку нетрудно сделать, как это было показано в примерном расчете для случая прокатки полосы в закрытых калибрах.

### *Построение ребрового калибра*

На рис. 122 приведен ребровый калибр, для построения которого руководствуемся следующими данными [2, 7].

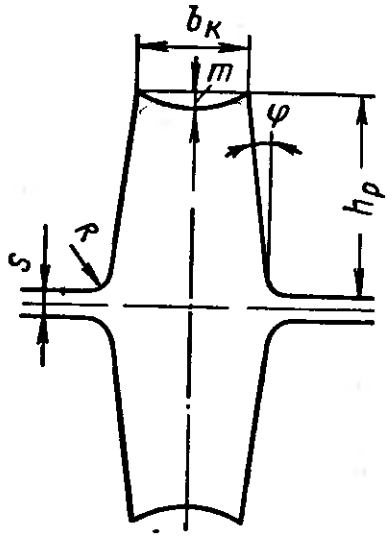



Рис. 122. Ребровый калибр для прокатки полосовой стали

Ширина у дна калибра

$$b_к = (0{,}98 \div 1{,}06)\, b_1,$$

где $b_1$ — толщина задаваемой полосы.

Уклон составляет 5—10% или

$$\operatorname{tg} \varphi = 0{,}05 \div 0{,}10.$$

Величина прогиба $m = 0{,}5 \div 1{,}0$ *мм*. Высоту ручья $h_р$ определяем, исходя из возможности прокатки наиболее узкой полосы. Зазор принимаем $s = 0{,}015D$. Радиус закругления у буртов $R = 2 \div 10$ *мм*. Изменением зазора между валками можно в ребровых калибрах прокатывать более широкие полосы, причем полосу максимальной ши-

рины можно прокатать, исходя из условия, что высота $h$ полосы в положении на ребре должна быть не более $\frac{3}{2} h_р$, т. е. зазор $s$ не должен быть больше $\frac{1}{3} h$.

## 4. КАЛИБРОВКА ДЛЯ НЕПРЕРЫВНОЙ ПРОКАТКИ ПОЛОСЫ И ШТРИПСОВ

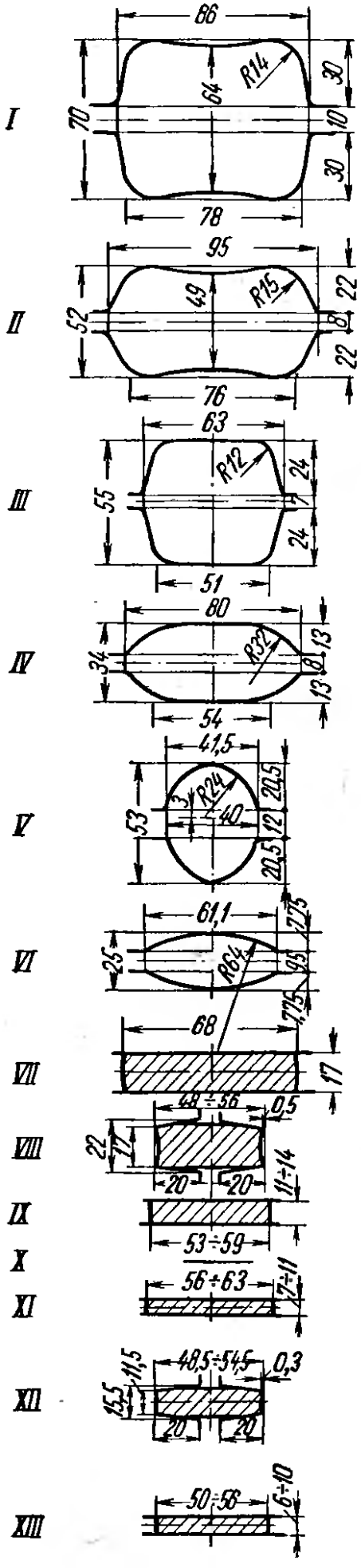
Рассмотрим калибровку полосовой стали 50×10 *мм*, прокатываемой на непрерывном стане 250 (рис. 123).

В черновой группе (клеть 7) получается полоса 68×17 *мм*, которую в чистовой группе за пять проходов (клети 11, 12в, и 13) прокатывают в готовую полосу 50×10 *мм*. Из заводской практики известно, что для получения полосы необходимой ширины достаточно иметь два ребровых калибра.[1]

Если исходная ширина полосы, выходящей из клети 7 черновой группы, равна 68 *мм*, а ее конечная ширина составляет 50 *мм*, то ребровое обжатие, равное 68 — 50 = 18 *мм* (без учета уширения в горизонтальных валках), можно получить в клетях с вертикальными валками (в клетях 8в и 12в). Для обжатия полосы на гладкой бочке используем три клети: 9, 11 и 13.

Общий коэффициент уменьшения толщины равен $P = \frac{17}{10} = 1{,}7$.

При распределении полученного общего коэффициента уменьшения толщины $P = 1{,}7$ в клетях 9, 11 и 13 получим коэффициенты уменьшения толщины, меньшие коэффициентов, при-




[1] Применение двух ребровых калибров важно не столько для получения необходимой ширины, сколько для выполнения углов полосы. (*Прим. ред.*).

Рис. 123. Калибровка для прокатки полосы на непрерывном стане 250

веденных в табл. 51 (ниже среднего режима). Это объясняется тем, что на непрерывных станах в отличие от линейных необходимо учитывать следующие факторы.

1. Необходимо иметь максимальные вытяжки и обжатия в черновой группе, чтобы коэффициенты вытяжки в чистовой группе получились небольшие во избежание сильного износа валков.

2. Следует учитывать размеры сечений полосы, получаемых в черновой группе, поскольку калибровка черновой группы остается общей для всего сортамента. Размеры сечений раската в клетях следует регулировать только за счет изменения зазора между валками.

3. В чистовой группе в качестве отделочной необходимо предусматривать клеть с горизонтальными валками при максимально возможной скорости прокатки. В нашем случае (см. рис. 123), учитывая малый суммарный коэффициент уменьшения толщины $P = 1{,}7$. Выпускающей клетью принята клеть 13.

В клети 13 (чистовой калибр) принимаем обжатие равным 2 *мм*, которому соответствует коэффициент уменьшения толщины $p_{13} = \frac{12}{10} = 1{,}2$.

На остальные две клети — 9 и 11 приходится общий коэффициент без учета уширения в ребровых калибрах

$$p_9 p_{11} = \frac{1{,}7}{1{,}2} = 1{,}42.$$

Ребровые обжатия предусматриваем в клетях 8в и 12в, т. е. в первом и предпоследнем проходах чистовой группы.

Чтобы установить общий коэффициент уменьшения высоты в в клетях 9 и 11, необходимо определить уширение в ребровых калибрах. Расчет ведут по ходу прокатки, чтобы определить уширение в клети 8в, и против хода прокатки, чтобы определить размеры раската, выходящего из клети 12в.

Рассмотрим прокатку в клети 8в, в которую задается полоса $68 \times 17$ *мм*.

Обычно ребровое обжатие во избежание изгиба полосы принимают равным половине толщины, т. е. $\Delta h_р = 0{,}5h$. Однако для узких полос ребровое обжатие может достигать $\Delta h_р \approx h_1$. При $\frac{b}{h} = 4$ можно принимать $\Delta h_р \approx h$, а при $\frac{b}{h} \approx 9$ обжатие $\Delta h_р \approx 0{,}5h$.

Ребровое обжатие в клети 8в составляет $\Delta h_р \approx 17{,}5$ *мм*. Определяем уширение, т. е. увеличение толщины в ребровом проходе. По формуле это уширение составляет около 3 *мм*. Следовательно, толщина полосы в клети 8в равна

$$h_8 = h_7 + \Delta b_{р8} = 17 + 3 = 20 \text{ мм}.$$

Как правило, предпоследний проход является ребровым, поэтому в нашем случае уширение, т. е. увеличение толщины в клети 12в, составляет

$$12 - 11 = 1 \text{ мм}.$$

В двух проходах на гладкой бочке суммарный коэффициент составляет

$$P_{9,11} = \frac{20}{11} = 1{,}82.$$

Этот суммарный коэффициент соответствует прокатке за два прохода. Согласно данным, приведенным в табл. 51, можно принять следующие коэффициенты:

$$1{,}82 = p_9 p_{11} = 1{,}4 \cdot 1{,}3.$$

Таким образом, в клети 9 принимаем $p_9 = 1{,}4$, а в клети 11 соответственно $p_{11} = 1{,}3$.

Итак, в клетях 9 и 11

$$h_9 = \frac{h_8}{p_9} = \frac{20}{1{,}4} \approx 14 \text{ мм};$$

$$h_{11} = \frac{1{,}4}{1{,}3} = 11 \text{ мм}.$$

Зная толщины и обжатия по калибрам, можно определить уширение в клетях 9 и 11.

Согласно табл. 57, в клети 9 при $\Delta h_9 = 6$ *мм* уширение составляет $\Delta b_9 = 4$ *мм*, а в клети 11 при $\Delta h_{11} = 3$ *мм* уширение равно $\Delta b_{11} = 2$ *мм*.

С учетом уширения в двух указанных клетях обжатие в ребровом калибре клети 12в составляет $\Delta h_{p12} = 7{,}5$ *мм*.

Чтобы получить полосу с острыми углами, рекомендуется в чистовом проходе давать обжатие не менее 2 *мм*, что составляет 20—30%. В ребровых калибрах выпуклость по дну калибра изменяется в пределах 0,2—0,3 *мм*. Уширение в ребровом калибре при $\frac{b}{h} = 4 \div 9$ имеет местный приконтактный характер, поэтому толщина задаваемой полосы должна быть на 0,3—0,5 *мм* меньше ширины калибра по дну. В клети 8 в ребровом калибре также делают по дну выпуклость до 0,5 *мм*. Калибры черновой группы являются общими для прокатки всего сортамента [1].

В табл. 57 приведена калибровка полосы $50 \times 10$ *мм*.

Рассмотрим калибровку штрипса $365 \times 3{,}5$ *мм*, прокатываемого на непрерывном штрипсовом стане 300 из сляба $108 \times 365$ *мм*. Стан состоит из 15 клетей, из которых 5 клетей (1в, 4в, 7в, 10в и 14в) с вертикальными валками.

---

[1] См. гл. V.

Таблица 57

**Калибровка полосы сечением 50×10 *мм* на мелкосортном стане 250 (см. рис. 123)**

| Номер клети | Вид калибра | Размеры полосы, *мм* | | Обжатие $\Delta h$, *мм* | Уширение $\Delta b$, *мм* |
|---|---|---|---|---|---|
| | | высота $h$ | ширина $b$ | | |
| | Заготовка 80×80 *мм* | | | | |
| | Черновая группа | | | | |
| 1 | Ящичный | 70 | 83 | 10 | 3 |
| 2 | » | 52 | 88 | 18 | 5 |
| 3 | » | 55 | 60 | 33 | 8 |
| 4 | Овал | 34 | 72 | 21 | 12 |
| 5 | Ребровый овал | 53 | 41 | 19 | 7 |
| 6 | Овал | 25 | 61 | 16 | 8 |
| 7 | Гладкая бочка | 17 | 68 | 8 | 7 |
| | Чистовая группа | | | | |
| 8в | Ребровый калибр | 20 | 50,5 | 17,5 | 3 |
| 9 | Гладкая бочка | 14 | 54,5 | 6 | 4 |
| 10 | То же | — | — | — | — |
| 11 | » | 11 | 56,5 | 3 | 2 |
| 12в | Ребровый калибр | 12 | 49 | 7,5 | 1 |
| 13 | Гладкая бочка | 10 | 50 | 2 | 1 |

Так как ширина полосы значительная — отношение $\frac{b}{h} = 10 \div 80$, то при обжатиях по ребру пренебрегаем утолщением полосы, что облегчает определение общего коэффициента уменьшения высоты $p$ и коэффициента $p_n$ по клетям. При непрерывной прокатке полосы (штрипса) на непрерывных штрипсовых станах исходим из следующих положений:

1) используем все клети, чтобы иметь в последних клетях максимальные скорости;

2) предусматриваем максимально возможные углы захвата в первых клетях с горизонтальными валками;

3) коэффициент уменьшается по ходу прокатки;

4) в чистовой группе следует учитывать давление и износ валков, поэтому коэффициент $p_n$ не должен быть большим (1,25—1,15);

5) в клетях с вертикальными валками ребровое обжатие в зависимости от толщины и ширины полосы не должно превышать 0,5—0,8 от толщины; такое ограничение ребрового обжатия необходимо, чтобы избежать изгиба полосы.

Исходя из этих положений, можно установить следующий ход расчета.

Находим общий коэффициент уменьшения высоты $P = \frac{h_0}{h_n}$, где $h_0$ — исходная толщина заготовки (сляба), $h_n$ — толщина штрипса в горячем состоянии, равная номинальной толщине холодной полосы:

$$P = \frac{108{,}0}{3{,}5} = 30{,}9.$$

В чистовой группе в четырех клетях с горизонтальными валками примем коэффициенты деформации равными

$$P_{\text{чист}} = p_{11}p_{12}p_{13}p_{15} = 1{,}30 \cdot 1{,}20 \cdot 1{,}20 \cdot 1{,}15 = 2{,}15.$$

На долю черновой группы приходится

$$P_{\text{черн}} = \frac{P}{p_{\text{чист}}} = \frac{30{,}9}{2{,}15} = 14{,}4.$$

Сначала определяем коэффициент $p_1$ для второй клети с горизонтальными валками (первая клеть — вертикальная), принимая допускаемый угол захвата 26° с учетом небольшой скорости прокатки, чему соответствует обжатие

$$\Delta h_2 = D_2 (1 - \cos \alpha_2) = 450 (1 - \cos 26°) = 45 \text{ мм}.$$

Таблица 58

**Калибровка штрипса сечением 365×3,5 мм (Ст. 2кп)**

| Номер клети | Размеры полосы, мм | | Обжатие $\Delta h$, мм | Уширение $\Delta b$, мм | Давление на валок $P$ | | Температура металла, °С |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | высота | ширина | | | $K_н$ | $T$ | |
| | Заготовка 108×365 мм | | | | | | |
| | Черновая группа | | | | | | |
| 1в | 108 | 358 | 7,0 | 0 | — | — | — |
| 2 | 63 | 371 | 45,0 | 13 | 2795 | 285 | 1150 |
| 3 | 36 | 384 | 27,0 | 13 | 2983 | 299 | 1140 |
| 4в | 36 | 355 | 29,0 | 0 | — | — | — |
| 5 | 21 | 366 | 15,0 | 11 | 3001 | 307 | 1120 |
| 6 | 13,5 | 374 | 6,5 | 8 | 2472 | 251 | 1100 |
| 7в | 13,5 | 365 | 9,0 | 0 | — | — | — |
| 8 | 10,0 | 367 | 3,5 | 2 | 1765 | 180 | 1080 |
| 9 | 7,5 | 369 | 2,5 | 2 | 1746 | 180 | 1070 |
| | Чистовая группа | | | | | | |
| 10в | 7,5 | 365 | 4,0 | 0 | — | — | — |
| 11 | 5,5 | 366 | 2,0 | 1 | 1805 | 184 | 1060 |
| 12 | 4,7 | 367 | 0,8 | 1 | 795 | 81,2 | 1050 |
| 13 | 4,0 | 368 | 0,7 | 1 | 772 | 79,0 | 1040 |
| 14в | 4,0 | 365 | 3,0 | 0 | — | — | — |
| 15 | 3,5 | 365 | 0,5 | 0 | 648 | 66,0 | 1020 |

После клети 2 толщина

$$h_2 = h_0 - \Delta h_2 = 108 - 45 = 63 \text{ мм}.$$

В остальных клетях можно принять

$$p_3 p_5 p_6 p_8 p_9 = (1{,}75 \div 1{,}6)\ (1{,}6 \div 1{,}5)\ (1{,}6 \div 1{,}5) \times$$
$$\times\ (1{,}5 \div 1{,}4)\ (1{,}35 \div 1{,}25).$$

Установив коэффициенты, находим, округляя, толщины по клетям.

Затем определяем ширины по проходам, для чего рассчитываем уширение при прокатке на гладкой бочке и ребровое обжатие в клетях с вертикальными валками. В первой клети предусматривают небольшое ребровое обжатие (7,0 *мм*) с целью обеспечить удаление окалины с заготовки и принудительную задачу полосы во вторую клеть. Следует иметь в виду, что рассчитанная калибровка нуждается в корректировке с учетом давления на валки и мощности двигателей.

В табл. 58 приведена калибровка штрипса $365 \times 3{,}5$ *мм*.

Глава VIII

# ПРОКАТКА И КАЛИБРОВКА УГЛОВОЙ СТАЛИ

## 1. СПОСОБЫ ПРОКАТКИ И КАЛИБРОВКИ УГЛОВОЙ СТАЛИ

Сталь угловую равнобокую согласно ГОСТ 8509—57 прокатывают от № 2 до № 25 *. Минимальная толщина полки составляет 3 *мм* для уголков № 2—5 и колеблется в пределах 3,5—16 *мм* для уголков № 6—25.

Крупные уголки, например № 20 и № 25, имеют максимальную толщину 30 *мм*. Каждый номер уголка имеет от двух до четырех и более размеров по толщине. Например, уголок № 10 имеет по толщине семь размеров: 6,5; 7; 8; 10; 12; 14 и 16 *мм*, только уголок № 2,8 имеет один размер по толщине, равный 3 *мм*.

ГОСТ устанавливает допускаемые отклонения по размерам профилей. Например, для уголков № 10—14 допускаемые отклонения составляют $\pm 2$ *мм* по ширине полки и $\pm 0{,}60$ и $\pm 0{,}65$ *мм* по толщине в зависимости от толщины полок.

Сталь прокатную угловую неравнобокую в соответствии с ГОСТ 8510—57 изготовляют от № 2,5/1,6 до № 25/15 **. Толщина полок равна 3—4 *мм* у профилей № 2,5/1,6—5/3,2 и 3,5—20 *мм* — у профилей № 5,6/3,6÷25/16. По толщине полки неравнобокие угловые профили имеют от одного (№ 2,5/1,6) до четырех размеров в пределах 3—20*мм*.

Допускаемые отклонения по ширине полки составляют от $\pm 1{,}0$ *мм* (для малых номеров) до $\pm 4{,}0$ *мм* (для крупных номеров), по толщине полки отклонения составляют от $\pm 0{,}40$ до $\pm 0{,}70$ *мм*. Длина готовых равнобоких и неравнобоких уголков, поставляемых металлургическими заводами, колеблется от 4 до 19 *м*.

Угловую сталь прокатывают на станах линейных ($D = 280 \div 800$ *мм*), зигзагообразных ($D = 500$ и 300 *мм*), шахматных ($D = 350$ *мм*), полунепрерывных ($D = 600$, 350 и 250 *мм*) и непрерывных ($D = 250$, 300 и 350 *мм*).

Различают следующие способы (рис. 124) калибровки угловой стали [2]: 1) с прямыми полками; 2) с развернутыми полками в закрытых калибрах; 3) в открытых калибрах; 4) прокатка в открытых калибрах на непрерывных станах.

---

* Номер указывает размер полок в *см*.

** Номер указывает размеры большой и малой полок в *см*.

Прокатка уголка с прямыми полками (рис. 124, *а*) является наиболее старым способом. В настоящее время на отечественных заводах этот способ не применяют.

Второй способ прокатки уголка с развернутыми полками в закрытых калибрах (рис. 124, *б*) получил широкое применение. Благодаря изогнутым полкам врез калибров значительно уменьшился, что позволило применять более интенсивные обжатия при меньшем числе проходов.

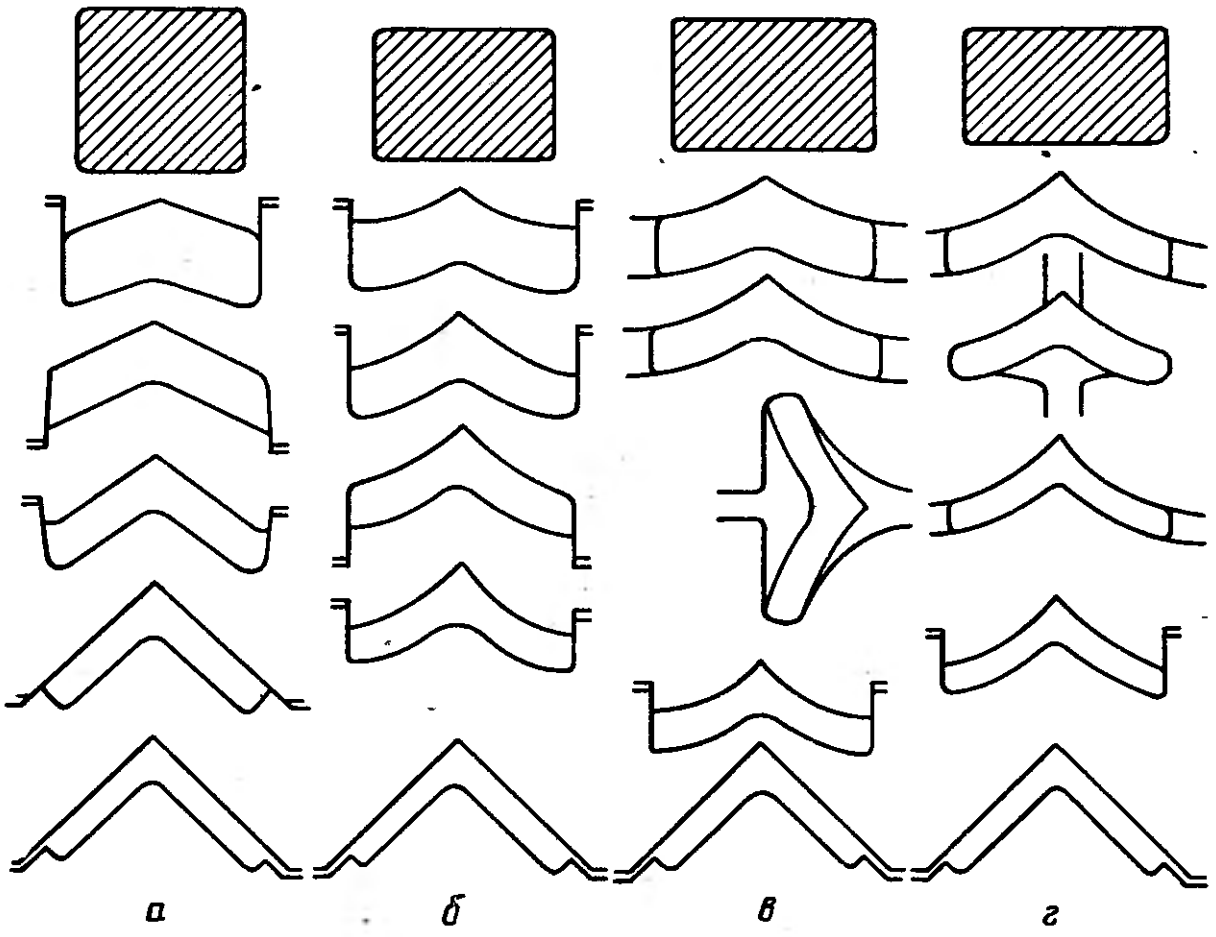



Рис. 124. Способы прокатки угловой стали

Третий способ прокатки уголка заключается в том, что черновые калибры делают открытыми со свободным уширением (рис. 124, *в*). Это дает возможность в одних и тех же черновых калибрах прокатывать уголки разных размеров по ширине и толщине полок. При такой калибровке сокращается парк валков и упрощается переточка их. За счет более интенсивных обжатий уменьшается число проходов. Для обеспечения необходимых размеров профиля предчистовой калибр делают закрытым.

Четвертый способ прокатки уголка (рис. 112, *г*) применяют на непрерывных станах. При этом способе прокатку ведут со свободным уширением, угол у вершины профиля, равный 90°, образуется уже в первых калибрах, а сгибание полок происходит постепенно по мере приближения к чистовому калибру. Точность размеров

полок обеспечивается ребровым обжатием в вертикальных валках и применением закрытых предчистового и чистового калибров.

За последнее время появились и другие способы прокатки уголков, которые рассмотрены ниже.

## 2. РАСЧЕТ КАЛИБРОВКИ УГОЛКА

При разработке калибровки уголка по тому или иному способу приходится решать следующие вопросы:

1) выбор числа проходов и коэффициентов уменьшения толщины полок по проходам;
2) определение углов закрытия по проходам;
3) расчет уширения полок;
4) построение калибров с развернутыми полками;
5) определение ширины (горизонтальной проекции) калибров;
6) определение радиусов закругления у вершины и у краев полок;
7) определение нейтральной линии калибра.

### *Выбор числа проходов и коэффициентов уменьшения толщины полок по проходам*

При прокатке уголка обычно предусматривают пять или шесть фасонных калибров. Исходная заготовка имеет прямоугольное или квадратное сечение. В отдельных случаях при прокатке мелких уголков на стане с валками достаточно большого диаметра можно иметь четыре фасонных калибра. Крупные уголки прокатывают за 7—8 проходов.

В наших расчетах будем принимать пять проходов для уголков до № 10 и 6 проходов для более крупных уголков.

При выборе коэффициентов уменьшения толщины полок по проходам можно руководствоваться следующими значениями коэффициентов по ходу прокатки:

для пяти проходов

$$1{,}6 \cdot 1{,}6 \cdot 1{,}6 \cdot 1{,}45 \cdot 1{,}25 = 7{,}41;$$

для шести проходов

$$1{,}6 \cdot 1{,}6 \cdot 1{,}6 \cdot 1{,}6 \cdot 1{,}45 \cdot 1{,}25 = 11{,}9.$$

В соответствии с принятой высотой заготовки эти коэффициенты можно скорректировать. Выбор коэффициентов уменьшения толщины зависит также от конкретных условий прокатного стана (диаметра валков, мощности двигателя, условий нагрева, наличия заготовки определенных размеров и т. п.).

Значения коэффициентов, рекомендуемые различными авторами [2, 7, 38, 39], находятся примерно в указанных пределах.

Опыт работы завода им. Дзержинского и других заводов показал, что для мелких уголков можно применять более интенсивный режим обжатий. Например, при прокатке в четырех калибрах:

$$1{,}8 \cdot 1{,}7 \cdot 1{,}5 \cdot 1{,}3 = 5{,}97;$$

в пяти калибрах:

$$1{,}8 \cdot 1{,}8 \cdot 1{,}7 \cdot 1{,}5 \cdot 1{,}3 = 10{,}7.$$

Общий коэффициент уменьшения толщины полок достаточно иметь в пределах $P = 6 \div 10$. Остальные калибры принимают прямоугольной формы.

В первых по ходу прокатки фасонных калибрах следует проверить угол захвата, который не должен превышать допустимых значений в зависимости от скорости вращения валков (см. рис. 45).

### *Определение углов сгиба между полками по отдельным калибрам*

В соответствии с практическими данными и рекомендациями большинства авторов [2, 7, 38], угол у вершины в предчистовом и чистовом калибрах принимаем равным $\varphi = 90°$.

В первом фасонном калибре принимаем $\varphi = 130°$. Эта величина отвечает данным заводских калибровок и обеспечивает получение правильной ширины (горизонтальной проекции) по отдельным калибрам (рис. 125).

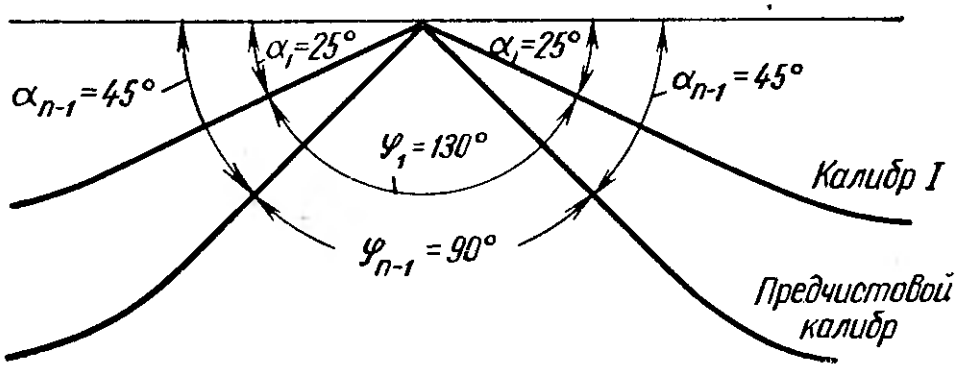



Рис. 125. Углы сгиба полок

В промежуточных калибрах угол $\varphi$ уменьшается постепенно — от 130 до 90° (в предчистовом калибре). Уменьшение угла $\varphi$ рассчитываем пропорционально обжатиям полок в отдельных калибрах.

Если суммарное обжатие в промежуточных калибрах от 2-го до $n$ — 1-го равно $\sum \Delta h$, а уменьшение угла $\varphi$ равно $\sum \Delta\varphi =$

$= 130° - 90° = 40°$, то в отдельных калибрах при пяти проходах значения угла $\varphi$ будут следующие:

$$\varphi_1 = 130°;$$

$$\varphi_2 = 130° - \Delta\varphi_2 = 130° - \frac{\sum \Delta\varphi}{\sum \Delta h}\Delta h_2;$$

$$\varphi_3 = \varphi_2 - \Delta\varphi_3 = \varphi_2 - \frac{\sum \Delta\varphi}{\sum \Delta h}\Delta h_3;$$

$$\varphi_4 = 90°;\ \varphi_5 = 90°.$$

Углы сгиба следует округлить до целых градусов. Такой метод определения углов сгиба прост и отражает условия деформации в калибрах — чем больше обжатие, тем интенсивнее можно сгибать полки.

### *Расчет уширения полок*

При расчете уширения полок необходимо учитывать два фактора — ограничение уширения в случае прокатки в закрытых калибрах и особенности деформации полок, сопровождающейся их сгибом (закрытием угла) при прокатке.

Следовательно, в формуле уширения (1) следует учитывать указанные два фактора:

$$\Delta b = \frac{2b_{ср}\Delta h k' k''}{(H + h)\left[1 + (1 + \alpha)\left(\frac{b_{ср}}{R\alpha}\right)^n\right]},$$

где $k' = 0{,}7 \div 0{,}8$ — коэффициент ограничения уширения;

$k''$ — поправочный коэффициент, учитывающий изгиб полок;

$b_{ср} = 2b$ — ширина двух полок равнобокого уголка по средней линии (оси);

$b_{ср} = b_м + b_б$ — сумма ширины малой и большой полок по средней линии при прокатке неравнобокого уголка.

Длина полки по средней линии равна

$$b = b_п - 0{,}5h,$$

где $b_п$ — длина по наружной грани полки;

$h$ — толщина полки.

Если прокатка ведется в свободных калибрах (см. рис. 124, *в*), то для всех калибров принимаем $k' = 1$.

При расчете уширения следует также учитывать особенности деформации в калибрах, когда полки изогнуты под определенным углом.

Поправочный коэффициент $k''$ будет увеличиваться по мере уменьшения угла у вершины $\varphi$. При прокатке полосы на гладкой бочке, когда $\varphi = 180°$, поправочный коэффициент $k'' = 1$. В предчистовом калибре, где угол $\varphi = 90°$ и полки уширяются как бы самостоятельно, коэффициент $k'' = 2$.

В промежуточных калибрах коэффициент $k''$ будет увеличиваться по мере уменьшения угла $\varphi$ от 180 до 90°. Можно принять прямолинейную зависимость между коэффициентом $k''$ и углом у вершины $\varphi$, как это показано на рис. 126.

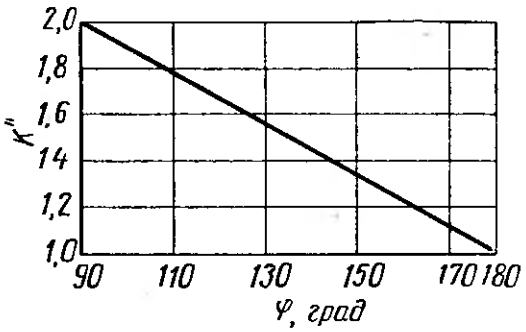



Рис. 126. Зависимость поправочного коэффициента $k''$ от угла сгиба $\varphi$

При прокатке в пяти калибрах углы у вершины изменяются примерно следующим образом: $\varphi_1 = 130 \div 140°$; $\varphi_2 = 110 \div 115°$; $\varphi_3 = 95 \div 100°$; $\varphi_4 = 90°$; $\varphi_5 = 90°$. Соответственно этим углам по графику (рис. 126) определяем поправочный коэффициент $k''$.

В табл. 59 приведены значения коэффициентов $k'$ и $k''$, а также их произведения при прокатке в пяти калибрах.

Аналогично можно установить коэффициенты и при прокатке в шести калибрах.

Учитывая, что коэффициент ограничения $k'$ может изменяться в известных пределах, можно для шести калибров принять следующие значения $k' \cdot k''$ по калибрам (по ходу прокатки):

$$k'k'' = 1{,}0;\ 1{,}2;\ 1{,}3;\ 1{,}4;\ 1{,}5;\ 2{,}0.$$

Таким образом, свободное уширение, подсчитанное по той или иной формуле, необходимо скорректировать умножением $\Delta b_{св}$ на $k' \cdot k''$.

В работе М. М. Штернова [38] также приведен график зависимости коэффициента, учитывающего увеличение уширения по сравнению со свободным, от угла $\varphi$ между полками.

Таблица 59

**Значения коэффициентов $k'$ и $k''$**

| Номер калибра | Углы $\varphi$, град | $k'$ | $k''$ | $k' \cdot k''$ |
|---|---|---|---|---|
| | 180 | 0,7 | 1 | 0,7 |
| *I* | 130—140 | 0,7 | 1,5 | 1,0 |
| *II* | 110—115 | 0,7 | 1,7 | 1,2 |
| *III* | 95—100 | 0,75 | 1,9 | 1,4 |
| *IV* | 90 | 0,75 | 2,0 | 1,5 |
| *V* | 90 | 1,0 | 2,0 | 2,0 |

Примечание. В чистовом калнбре имеет место свободное ушнрение, поэтому $k' = 1$.

*Построение калибров с развернутыми полками*

При прокатке в развернутых калибрах обеспечиваются оптимальные условия деформации металла, увеличивается срок службы валков.

Построение калибров с развернутыми полками необходимо начинать с предчистового калибра. Основные размеры калибра с развернутыми полками следующие: длина прямого участка полки $b'$,

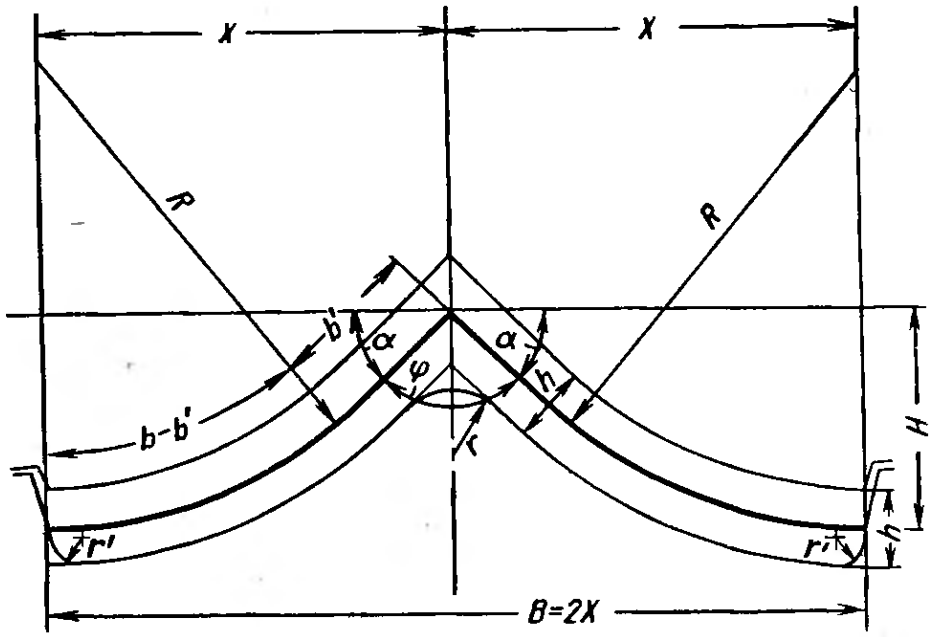



Рис. 127. К определению осиовных параметров построения углового калибра

радиус очертания (изгиба, разворота) полок $R$, высота среза калибра в валки $H$, ширина (горизонтальная проекция) калибра $B = 2 \cdot X$ (рис. 127).

Чем больше прямой участок полки $b'$, тем легче задавать полосу в чистовой калибр и легче идет выпрямление полок.

Радиус очертания $R$ характеризует кривизну (изгиб) полок. Чем больше $R$, тем более плавный изгиб полки, обеспечивающий лучшее качество поверхности уголка без морщин и складок. Глубину среза $H$ определяют, исходя из прочности валков и их диаметра. Чем меньше диаметр валка, тем меньшее значение $H$ следует принимать.

Важное значение имеет также правильный выбор ширины калибра $B$ и расстояния от середины ширины калибра до центра радиуса $R$ (см. рис. 127). Ширину калибра $B$ и значение $X$ необходимо выбирать так, чтобы обеспечить удобную задачу полосы в калибр, т. е. ширина калибра должна быть несколько больше ширины задаваемой полосы.

Указанные параметры $b'$, $R$, $H$ и $X$ связаны между собой геометрическими зависимостями, которые нетрудно вывести.

Ниже приведены некоторые формулы зависимостей для указанных параметров, которые необходимы для дальнейших расчетов:

$$\alpha = 90° - 0{,}5\varphi;$$

$$R = \frac{b - b'}{\alpha\,[рад]} = \frac{b - b'}{0{,}01745\alpha\,[град.]}; \tag{75}$$

$$X = b' \cos\alpha + R \sin\alpha = 0{,}5B; \tag{76}$$

$$H = b' \sin\alpha + R\,(1 - \cos\alpha); \tag{77}$$

$$R = \frac{X}{\sin\alpha} - \frac{b'}{\operatorname{tg}\alpha};$$

$$X = H\frac{\sin\alpha}{1 - \cos\alpha} - b'.$$

Если угол у вершины для предчистового калибра равен $\varphi = 90°$, то для равнобокого уголка получим следующие значения указанных параметров:

$$\alpha = 45°;$$

$$R = \frac{b - b'}{0{,}785} = 1{,}275\,(b - b');$$

$$X = 0{,}707b' + 0{,}707R = 0{,}5B;$$

$$H = 0{,}707b' + 0{,}293R;$$

$$R = 1{,}414X - b';$$

$$X = 2{,}414H - b'.$$

Некоторые авторы в своих методах расчета построения предчистового калибра задаются двумя параметрами и определяют остальные. Например, Б. П. Бахтинов [1] и М. М. Штернов [2, 38] задаются значениями $H$ и $R$ и находят затем $X$ и $B$. М. М. Штернов [38] рекомендует брать для равнобоких уголков

$$H = (0{,}4 \div 0{,}45)\ b;$$

$$R = (0{,}8 \div 0{,}95)\ b = \text{const}.$$

Для неравнобоких уголков

$$H = (0{,}4 \div 0{,}45)\frac{b_м + b_б}{2};$$

$$R_м = (1 \div 1{,}1)\ b_б = \text{const};$$

$$R_б = (0{,}7 \div 0{,}8)\ b_б = \text{const}.$$

[1] При построении предчистового калибра Б. П. Бахтинов отсчитывает значения $H$ и $R$ не от средней оси полки, а от ее верхней грани.

В предлагаемой нами методике расчета в основу построения калибров с изогнутыми полками положена величина прямого участка $b'$, которая может изменяться в пределах

$$b' = (0{,}20 \div 0{,}6)\ b,$$

где $b$ — длина полки по средней линии.

Задаваясь величиной $b'$, можно определить по приведенным выше формулам величину радиуса изгиба $R$, высоту среза $H$, ширину калибра $B = 2X$.

В табл. 60 приведены данные, по которым можно определить значения $R$, $H$, $X$ и $B$ в зависимости от величины $b'$.

Таблица 60

**Соотношения $R$, $H$, $X$, $B$, $b'_{n-1}$ и $b_{n-1}$ для предчистового калибра при $\alpha = 45°$**

| $\frac{b'_{n-1}}{b_{n-1}}$ | $\frac{R_{n-1}}{b_{n-1}}$ | $\frac{H_{n-1}}{b_{n-1}}$ | $\frac{X_{n-1}}{b_{n-1}}$ | $\frac{B_{n-1}}{b_{n-1}}$ |
|---|---|---|---|---|
| 0,20 | 1,02 | 0,440 | 0,861 | 1,722 |
| 0,25 | 0,955 | 0,457 | 0,852 | 1,704 |
| 0,30 | 0,893 | 0,473 | 0,842 | 1,684 |
| 0,35 | 0,827 | 0,489 | 0,830 | 1,660 |
| 0,40 | 0,764 | 0,507 | 0,823 | 1,646 |
| 0,45 | 0,701 | 0,523 | 0,810 | 1,620 |
| 0,50 | 0,637 | 0,541 | 0,803 | 1,606 |

В табл. 60 приведены данные расчета по формулам (75)—(77) размеров предчистового калибра в зависимости от отношения $b'_{n-1}/b_{n-1}$.

Как видно из табл. 60, при большом значении параметра $b'_{n-1}$ (например, равном $0{,}5b_{n-1}$) радиус изгиба $R_{n-1}$ уменьшается, а высота среза $H_{n-1}$ увеличивается. В связи с этим уменьшается полная ширина предчистового калибра.

Учитывая необходимость уменьшения ширины калибров от предчистового к первому, принимаем прямой участок в пределах $b'_{n-1} = (0{,}2 \div 0{,}40)\ b_{n-1}$, соответственно чему получаем следующие значения других параметров уголка:

$$R_{n-1} = (1{,}02 \div 0{,}764)\ b_{n-1};$$

$$H_{n-1} = (0{,}440 \div 0{,}507)\ b_{n-1};$$

$$X = (0{,}861 \div 0{,}823)\ b_{n-1};$$

$$B_{n-1} = (1{,}722 \div 1{,}646)\ b_{n-1} = 2 \cdot X.$$

При построении калибров для мелких и средних равнобоких уголков принимаем, что весь отрезок $b—b'$ изгибается по радиусу, равному ($\alpha$, град.):

$$R = \frac{b - b'}{0{,}01745\alpha}.$$

Калибры для крупных уголков имеют горизонтальный участок на конце полки, что увеличивает ширину калибра. В калибрах для неравнобоких уголков горизонтальный участок имеет большая полка.

### *Определение ширины (горизонтальной проекции) и остальных параметров черновых калибров*

Ширину предчистового калибра определяют по приведенным выше формулам (см. также табл. 60). Она должна быть достаточной, чтобы обеспечить нормальную задачу полосы в калибры.

Каждый предыдущий калибр (считая по ходу прокатки) должен быть несколько у́же последующего. Величину уменьшения ширины калибра можно определить по значениям выпусков (уклонов) боковых стенок калибра (рис. 128).

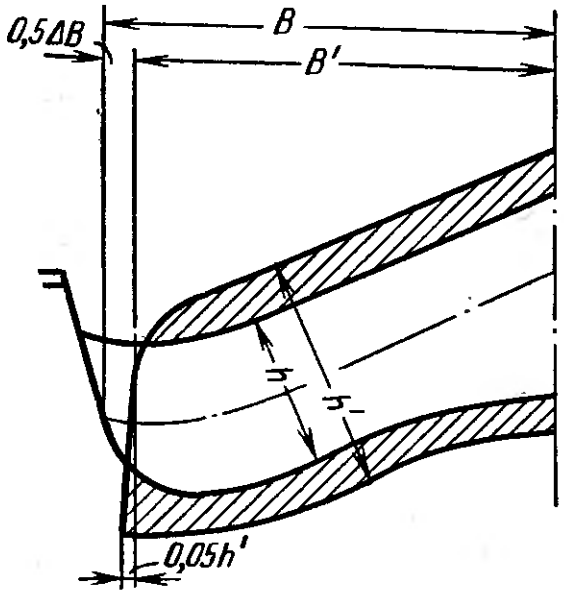



Рис. 128. Приращение ширины углового калибра

При уклонах около 10% уменьшение ширины калибра составляет $\sim 0{,}1h'$, где $h'$ — высота задаваемой полосы [11]. Некоторые авторы [38] принимают меньшие значения уменьшения ширины калибров.

В наших расчетах будем принимать каждый предыдущий калибр на 1—2 *мм* у́же последующего:

$$B' = B - (1 \div 2)\ мм,$$

где $B'$ — ширина предыдущего калибра,

$B$ — ширина следующего по ходу прокатки калибра.

Следует отметить, что ширину калибра необходимо увязывать с шириной полок, получаемой на основе расчета уширения, углов сгиба полок $\varphi$ и значений прямого $b'$ и изогнутого $b—b'$ участков.

Чем больше угол $\varphi$, тем при прочих равных условиях шире будет калибр, что можно видеть из сопоставления предчистового и первого калибров.

Согласно приведенным формулам, ширина калибра равна

$$B = 2X = 2 \cdot b' \cos\alpha + 2 \cdot R \sin\alpha = 2b' \cos\alpha + 2\,\frac{b - b'}{0{,}01745\alpha^\circ} \sin\alpha, \tag{78}$$

где $\alpha = 90^\circ - 0{,}5\varphi^\circ$.

В предчистовом калибре при $\varphi = 90°$ и $\alpha = 45°$ ширина калибра равна (табл. 60)

$$B_{n-1} = 1{,}414b'_{n-1} + 1{,}414R_{n-1} = 1{,}414b'_{n-1} + \\ + 1{,}8\,(b_{n-1} - b'_{n-1}) = 1{,}8b_{n-1} - 0{,}386b'_{n-1},$$

где $b'_{n-1}$ — величина прямого участка полки;

$b_{n-1}$ — ширина всей полки;

$R = \frac{b_{n-1} - b'_{n-1}}{0{,}785}$ — радиус изгиба полки.

В первом черновом калибре при $\varphi = 130°$ и $\alpha = 25°$ ширина калибра равна

$$B_1 = 2 \cdot 0{,}906b'_1 + 2 \cdot 0{,}423R_1 = 1{,}812 \cdot b' + \\ + 0{,}846 \cdot R_1 = 1{,}94 \cdot b_1 - 0{,}128 \cdot b'_1,$$

где

$$R_1 = \frac{b - b'}{0{,}436}.$$

Если принять прямой участок $b' = 0{,}40b$, то

$$B_{n-1} = 1{,}646b_{n-1} \text{ и } B_1 = 1{,}889b_1.$$

Ширину полки в первом калибре принимают меньше ширины полки в предчистовом калибре на величину уширения, но не настолько, чтобы ширина первого калибра получилась меньше ширины предчистового калибра, особенно для крупных номеров уголка.

Чтобы ширина калибров увеличивалась по ходу прокатки, необходимо при конструировании предчистового калибра принимать меньшую величину прямого участка $b'$, соответственно чему будет увеличиваться изогнутый участок и вся ширина предчистового калибра. Кроме того, необходимо в первом калибре брать прямой участок больше, например $b'_1 \approx 0{,}5b_1$, благодаря чему уменьшится ширина первого калибра. Таким способом можно получить постепенное увеличение ширины калибров по ходу прокатки. В предчистовом калибре будем принимать прямой участок в пределах $b'_{n-1} = (0{,}2 \div 0{,}4)\ b_{n-1}$, чтобы обеспечить уменьшение ширины предыдущих калибров.

После установления ширины каждого калибра с учетом увеличения ее по ходу прокатки находим параметры для промежуточных черновых калибров, пользуясь формулой

$$0{,}5B = X = b\cos\alpha + \frac{b - b'}{0{,}01745\alpha}\sin\alpha,$$

откуда для данного калибра

$$b' = \frac{b\dfrac{\sin\alpha}{0{,}01745\alpha} - 0{,}5B}{\dfrac{\sin\alpha}{0{,}01745\alpha} - \cos\alpha}; \qquad (79)$$

$$R = \frac{b - b'}{0{,}01745\alpha};$$

$$H = b' \sin\alpha + R\,(1 - \cos\alpha).$$

Так как в первом калибре приняли $\varphi = 130°$ и угол $\alpha_1 = 25°$, то для первого калибра получим следующие формулы:

$$b_1' = \frac{b_1\dfrac{0{,}423}{0{,}436} - 0{,}5 \cdot B_1}{\dfrac{0{,}423}{0{,}436} - 0{,}906} = 15{,}6\,(0{,}97b_1 - 0{,}5B_1);$$

$$R_1 = \frac{b_1 - b_1'}{0{,}436} = 2{,}29\,(b_1 - b_1');$$

$$H_1 = 0{,}423b_1' + 0{,}094R_1.$$

Сначала зададимся в предчистовом калибре $b_{n-1} \approx 0{,}3$, определим его ширину и ширину первого калибра. Если при расчете по приведенным формулам прямой участок $b'$ получится очень большим (например, $b_1' > 0{,}6b_1$), то заново рассчитываем размеры предчистового калибра, приняв $b_{n-1}' = (0{,}2 \div 0{,}25)\ b_{n-1}$.

При расчетах калибровки крупных уголков, например № 15—25, возможны случаи, когда ширина предчистового калибра при $b_{n-1}' = 0{,}2b_{n-1}$ получится все же недостаточной по сравнению с предыдущими калибрами. В этом случае можно сделать первый и второй калибры более узкими, если край изогнутой части полки не выйдет на горизонтальную линию (рис. 129).

Если принять $b_1' = (0{,}6 \div 0{,}7) \cdot b_1$, то скорректированный радиус изгиба полок $R_1'$ составит

$$R_1' > R_1 = \frac{(0{,}4 \div 0{,}3)\,b_1}{\alpha\ [рад]} = \frac{(0{,}4 \div 0{,}3) \cdot b_1}{0{,}436} = (0{,}916 \div 0{,}7)\,b_1,$$

где $\alpha = 0{,}436$ *рад* — угол наклона полки в первом калибре ($\alpha = 25°$).

В этом случае скорректированная ширина первого калибра $B_1'$ будет равна (рис. 129)

$$B_1' = b_1' \cos 25° + R_1' \sin 25° - R_1' \sin (25° - \alpha),$$

где

$$\alpha_1 = \frac{b_1 - b_1'}{R} \cdot 57{,}3 \text{ град.}$$

Аналогичную корректировку в случае необходимости можно применить и для второго калибра.

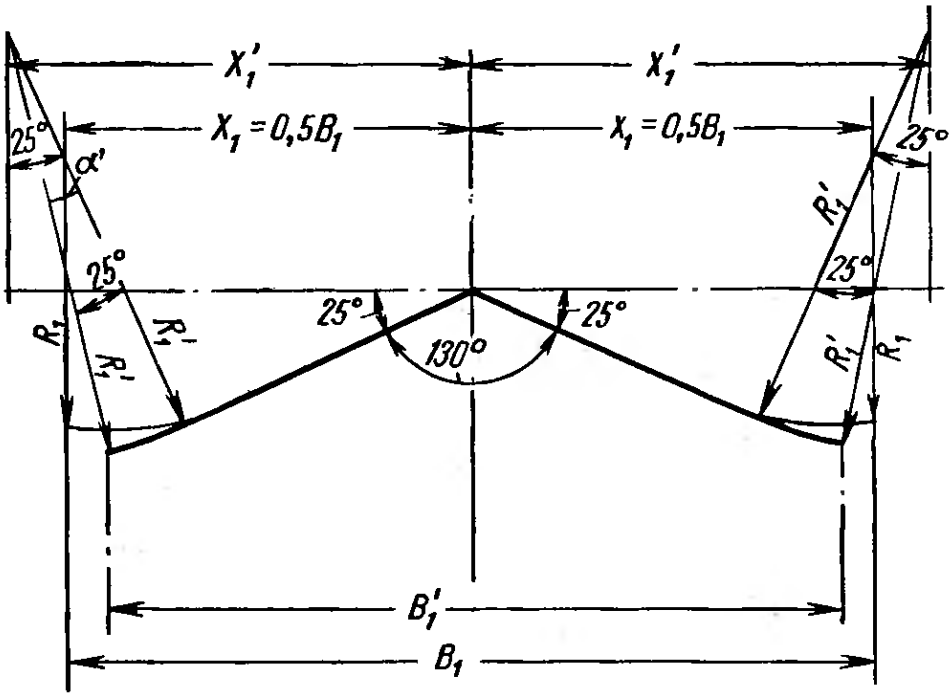



Рис. 129. Построение первого углового калибра

Для упрощения расчета можно принять следующие значения ширины прямых участков полок по проходам:

при пяти проходах

$$b_1' \approx 0{,}6b_1;\ b_2' \approx 0{,}35b_2;\ b_3' \approx 0{,}25b_3;\ b_4' \approx 0{,}2b_4$$

и при шести проходах

$$b_1' \approx 0{,}6 \cdot b_1;\ b_2' \approx 0{,}4 \cdot b_2;\ b_3' \approx 0{,}35 \cdot b_3;\ b_4' \approx 0{,}25 \cdot b_4;\ b_5' \approx 0{,}2 \cdot b_5.$$

При этом будет обеспечено постепенное увеличение ширины калибров по проходам.

При выборе ширины заготовки исходим из ширины первого калибра, причем принимаем небольшой простор на уширение в пределах 2—10 *мм* для лучшего центрирования заготовки. Уширение подсчитываем, исходя из толщины полки и толщины заготовки, причем соответствующим ограничением уширения можно регулировать ширину заготовки.

### *Определение радиусов закругления у вершины и у края полок*

Радиус закругления у вершины должен обеспечить хорошее заполнение угла, для чего вытяжку в вершине чистового калибра рекомендуется принимать несколько большей, чем в полке.

Определим коэффициент уменьшения высоты по вершине калибра. Согласно рис. 130, толщина уголка $m$ по вершине равна

$$m = \frac{h}{\cos\alpha} + \frac{r}{\cos\alpha} - r = \frac{h + r(1 - \cos\alpha)}{\cos\alpha}.$$

При $\alpha = 45°$ эта величина равна

$$m = \frac{h + 0{,}293r}{0{,}707}.$$

Если углы $\alpha$ для чистового и предчистового калибров равны, то, принимая

$$h' = ph \text{ и } r' = pr,$$

получим коэффициент уменьшения высоты по вершине

$$p = \frac{m'}{m} = \frac{ph + 0{,}293 \cdot pr}{h + 0{,}293 \cdot r}.$$

Здесь размеры со штрихом относятся к задаваемой полосе. Таким образом, если $r' = pr$, то в чистовом калибре по вершине

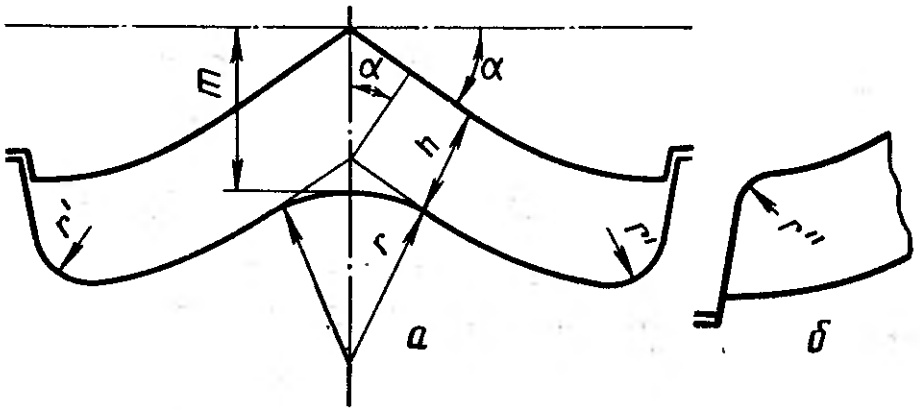



Рис 130. Радиусы закругления в угловом калибре

и по полке коэффициент уменьшения высоты получается одинаковый. Однако для лучшего заполнения радиус закругления у вершины в предчистовом калибре следует принимать $> pr$.

Можно рекомендовать следующие коэффициенты уменьшения высоты при определении радиуса закругления у вершины в случае пяти проходов:

$$r_5;\ r_4 = p_4 r_5;\quad r_3 = p_3 r_4;\quad r_2 = p_2 r_3;\quad r_1 = p_1 r_2.$$

Следовательно, радиус закругления умножают на коэффициент уменьшения высоты в том же калибре, пропуская коэффициент $p_5$. При принятых значениях коэффициентов уменьшения высоты получим

$$r_5;\quad r_4 = 1{,}45 \cdot r_5;\quad r_3 = 1{,}6 \cdot r_4;\quad r_2 = 1{,}6 \cdot r_3;\quad r_1 = 1{,}6 \cdot r_2.$$

Радиусы закругления у края полок, согласно рекомендации Б. П. Бахтинова [2], при пяти проходах можно брать следующие.

Для нижнего края полки, когда разъем находится сверху (см. рис. 130, *а*), принимаем

$$r_4' = r_5 + \Delta h_5; \quad r_2' = r_5' + \Delta h_3.$$

Для верхнего края полки, когда разъем снизу, принимаем

$$r_3'' = \Delta h_4; \quad r_1'' \approx \Delta h_2.$$

Можно также принимать

$$r' \approx 0{,}5 \cdot h; \quad r'' \approx 0{,}35 \cdot h.$$

### *Определение нейтральной линии калибра и среднего катающего диаметра*

На рис. 131 показано расположение калибра на валках. Ширина калибра

$$B = b' \cos\alpha + R\,(1 - \cos\alpha).$$

Для определения положения нейтральной линии калибра по формуле (25) необходимо определить площадь калибра $Q$, площадь $F$ и расстояние $z$ от вершины до нейтральной линии калибра.

Исходя из геометрических соотношений без учета закруглений (рис. 131), получим

$$F = (X + R\sin\alpha)(b' + 0{,}5h\,\mathrm{tg}\,\alpha)\sin\alpha + R'^2\left(\frac{\pi\alpha}{180} - \frac{\sin 2\alpha}{2}\right),$$

где $X$ — горизонтальная проекция полки;
$R'$ — радиус изгиба верхней грани полки;
$b' + 0{,}5h\,\mathrm{tg}\,\alpha$ — ширина прямого участка полки по верхней грани.

Для неравнобоких уголков площадь калибра равна [1]

$$Q = h \cdot (b_м + b_б).$$

Вспомогательная площадь $F$ равна (рис. 131):

$$F = F_м + F' = (X_м + R'\sin\alpha)(b' + 0{,}5h\,\mathrm{tg}\,\alpha)\sin\alpha + \\ + R'^2\left(\frac{\pi\alpha}{180} - \frac{\sin 2\alpha}{2}\right) + F',$$

где $F' = (b_б - b_м)\,H'$ — площадь прямоугольника *acde*;
$H' = H - 0{,}5 \cdot h$ — высота от вершины до верхней грани калибра;
$H = b_м'\sin\alpha + R\,(1 - \cos\alpha)$ — высота калибра от вершины до средней линии.

Для чистового калибра с прямыми полками нетрудно найти нейтральную линию калибра, определив площадь калибра $Q$, площадь $F$ и ширину калибра $B$.

В работах [2, 7, 9] приведены детальные расчеты калибровки угловой стали по различным методам. Эти методы характеризуются тем, что каждый автор дает свои рекомендации для построения черновых калибров, определения уширения, угла у вершины,

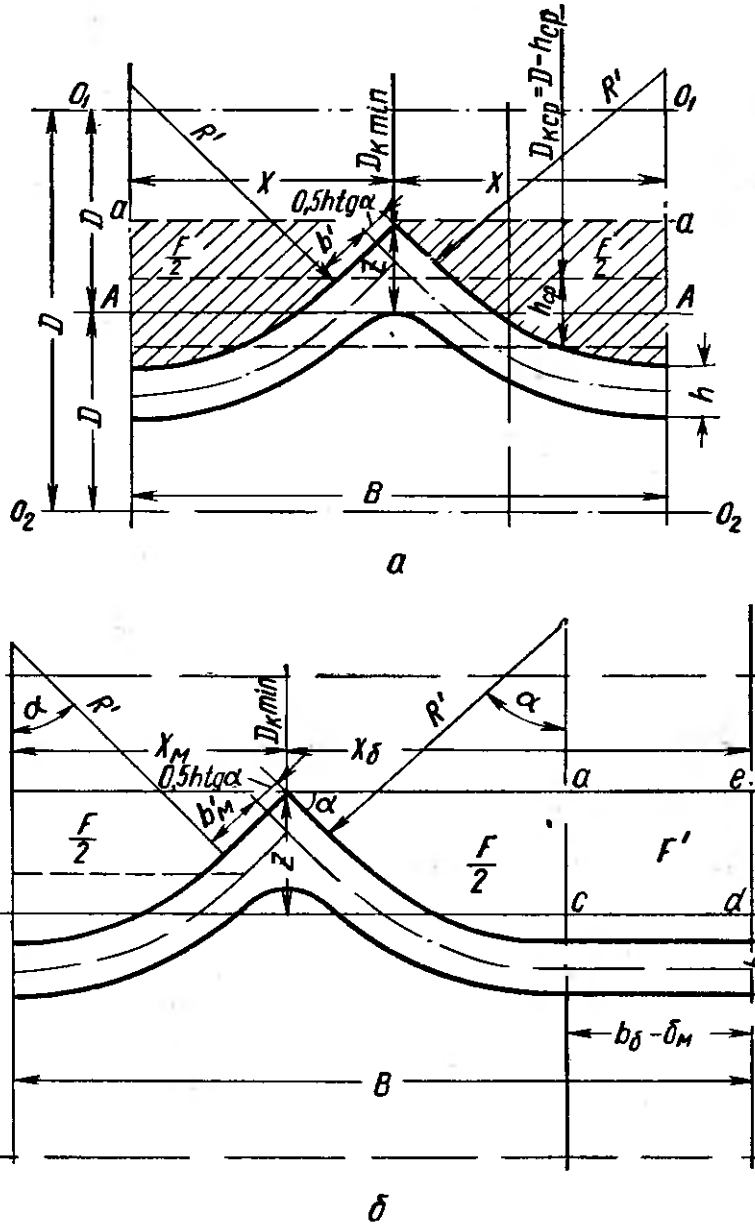



Рис. 131. Построение нейтральной линии калибра:

*а* — для равнобокого уголка; *б* — для неравнобокого уголка; *АА* — линия прокатки

выбора прямого и изогнутого участков полки и т. д. Все эти рекомендации являются вполне оправданными, поскольку они отражают опыт прокатки уголков на станах различных типов.

Одним из более простых методов расчета калибровки угловой стали является метод Б. П. Бахтинова [2]. Однако этот метод не учитывает положение средней линии полок.

При построении предчистового калибра по методу Б. П. Бахтинова (рис. 132) высота гребня равна

$$H = (0{,}35 \div 0{,}45) \cdot l;$$

а радиус разворота (изгиба) полок

$$R = (0{,}5 \div 1{,}0) \cdot l,$$

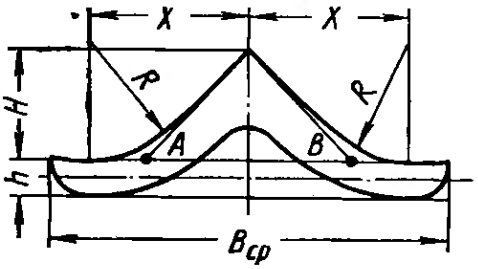
где $l$ — длина полок готового профиля.

Расстояние от вершины угла до центра радиуса разворота полок принимают неизменным во всех калибрах:

$$x = 0{,}414 \cdot R + H.$$

Высота гребня $H$ при переходе от калибра к калибру против хода прокатки уменьшается на величину, равную половине обжатия в предыдущем калибре.

Б. М. Шум [1], признавая известные достоинства метода Б. П. Бахтинова при прокатке мелких и средних уголков (примерно до № 14), рекомендует использовать скорректированные параметры для построения предчистового калибра, а именно:



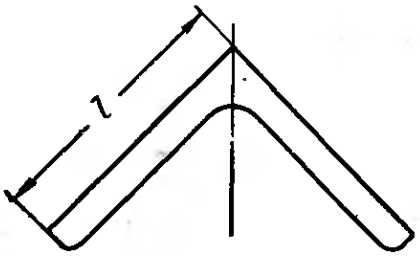




Рис. 132. Построение предчистового калибра по методу Б. П. Бахтинова

а) высоту гребня брать в пределах

$$H = (0{,}25 \div 0{,}40) \cdot l;$$

б) радиус изгиба полок принимать

$$R = (0{,}50 \div 0{,}75) \cdot l;$$

в) корректировку калибровки по ширине полки профиля производить изменением высоты гребня калибров $H$;

г) во всех калибрах рекомендуется сохранять постоянной величину основания $AB$ треугольника, образующегося в предчистовом калибре (рис. 132) — несоблюдение этого условия при $H > 0{,}35 \cdot l$ и $R > 0{,}6 \cdot l$ приводит к исчезновению прямых участков по краям полок и выкрашиванию замков в валках калибров;

д) при прокатке угловой стали рекомендуется применять прямоугольную заготовку, обеспечивающую устойчивость ее в первом калибре;

е) наиболее рациональной формой предчистовых калибров являются калибры с нижним открытием замков (зазоров), исключающим образование закатов у верхних кромок профиля.

### Примерный расчет калибровки равнобокого уголка № 10

Произвести расчет калибровки равнобокого уголка 100 × × 100 × 6,5 ÷ 16 (ГОСТ 8509—57) из Ст. 3 (ГОСТ 535—58).

Диаметр валков $D = 500$ *мм*, $n = 120$ *об/мин*.

[1] Б. М. Шум. Калибровка равностороннего углового железа средних размеров в условиях трехвалковых прокатных станов. В сб. «Металлургия». Ленинград, Судпромгиз, 1963, № 6, с. 60.

Допуски по ГОСТ 8509—57: по ширине полки $\pm$ 2 *мм*; по толщине полки $\pm$0,60 (для толщин 6,5; 7; 8 *мм*); $\pm$0,65 (для толщин 10, 12, 14, 16 *мм*).

Радиус внутреннего закругления (у вершины) $R = 12$ *мм*, радиус закругления полки $r = 4$ *мм*.

При толщине полки $h = 10$ *мм* площадь профиля $F = 1920$ *мм*$^2$

Расчет ведем для уголка толщиной $d = 10$ *мм* *.

Определяем размеры профиля в горячем состоянии, принимая неполный минусовый допуск.

Ширина полки

$$b_г = (100 - 1{,}5) \cdot 1{,}013 \approx 100 \text{ мм}.$$

Толщина полки

$$h_г = (10 - 0{,}5) \cdot 1{,}013 = 9{,}6 \text{ мм}.$$

Длина полок по средней линии (развернутая ширина уголка)

$$2b_{г.ср} = 2\,(100 - 0{,}5 \cdot 9{,}6) = 190{,}4 \text{ мм}.$$

Выбираем пять фасонных калибров. Коэффициенты уменьшения высоты принимаем

$$\sum \frac{H}{h} = 1{,}25 \cdot 1{,}45 \cdot 1{,}6 \cdot 1{,}6 \cdot 1{,}6 = 7{,}41.$$

Высота заготовки

$$h_0 = 9{,}6 \cdot 7{,}41 = 71 \text{ мм};$$

принимаем $h_0 = 70$ *мм*.

Толщина полок по проходам:

$$h_1 = 70 : 1{,}6 \approx 44 \text{ мм};$$

$$h_2 = 44 : 1{,}6 = 27{,}5 \text{ мм};$$

$$h_3 = 27{,}5 : 1{,}6 \approx 17{,}0 \text{ мм};$$

$$h_4 = 17 : 1{,}45 \approx 12{,}0 \text{ мм};$$

$$h_5 = 12 : 1{,}25 = 9{,}6 \text{ мм}.$$

Обжатие по проходам:

$$\Delta h_1 = h_0 - h_1 = 70 - 44 = 26 \text{ мм};$$

$$\Delta h_2 = h_1 - h_2 = 44 - 27{,}5 = 16{,}5 \text{ мм};$$

$$\Delta h_3 = h_2 - h_3 = 27{,}5 - 17{,}0 = 10{,}5 \text{ мм};$$

$$\Delta h_4 = h_3 - h_4 = 17{,}0 - 12{,}0 = 5{,}0 \text{ мм};$$

$$\Delta h_5 = h_4 - h_5 = 12{,}0 - 9{,}6 = 2{,}4 \text{ мм}.$$

---

* Возможность получения профиля с полками меньшей или большей толщины будет рассмотрена ниже.

Проверим обжатие в первом проходе по углу захвата при $D_{min} = 450$ *мм*:

$$\alpha_1 = \arccos\left(1 - \frac{\Delta h_1}{D_{к1}}\right) = \arccos\left(1 - \frac{26}{450 - 44}\right) = 20°\,36'.$$

При $n = 120$ *об/мин* окружная скорость равна

$$v = \frac{\pi D_{к1} n}{60} = \frac{3{,}14 \cdot 0{,}45 \cdot 120}{60} = 2{,}82 \text{ м/сек.}$$

Допустимый угол захвата по графику (см. рис. 45).

$$\alpha \approx 25°.$$

Аналогично определяем углы захвата в остальных калибрах. Затем определяем уширение в каждом калибре.

*Калибр V — чистовой*

Уширение по формуле (1) равно

$$\Delta b_5 = \frac{2 \cdot 190{,}4 \cdot 2{,}4 \cdot 2}{(12 + 9{,}6)\left[1 + (1 + 0{,}11)\left(\frac{190{,}4}{220{,}2 \cdot 0{,}11}\right)^2\right]} = 1{,}2 \text{ мм.}$$

Ширина полосы по средней линии в калибре IV

$$2b_4 = 2b_5 - \Delta b_5 = 190{,}4 - 1{,}2 = 189{,}2 \text{ мм.}$$

*Калибр IV — предчистовой*

Уширение

$$\Delta b_4 = \frac{2 \cdot 189{,}2 \cdot 5 \cdot 1{,}5}{(17 + 12)\left[1 + (1 + 0{,}152)\left(\frac{189{,}2}{219 \cdot 0{,}152}\right)^2\right]} = 2{,}5 \text{ мм.}$$

Ширина полосы в калибре *III*

$$2b_3 = 2b_4 - \Delta b_4 = 189{,}2 - 2{,}5 = 186{,}7 \text{ мм.}$$

*Калибр III—черновой*

Уширение

$$\Delta b_3 = \frac{2 \cdot 186{,}7 \cdot 10{,}5 \cdot 1{,}4}{(27{,}5 + 17)\left[1 + (1 + 0{,}214)\left(\frac{186{,}7}{216{,}5 \cdot 0{,}214}\right)^2\right]} = 5{,}9 \text{ мм.}$$

Ширина полосы в калибре *II*

$$2b_2 = 2b_3 - \Delta b_3 = 186{,}7 - 5{,}9 = 180{,}8 \text{ мм.}$$

*Калибр II — черновой*

Уширение

$$\Delta b_2 = \frac{2 \cdot 180{,}8 \cdot 16{,}5 \cdot 1{,}2}{(44 + 27{,}5)\left[1 + (1 + 0{,}279)\left(\frac{180{,}8}{211{,}3 \cdot 0{,}279}\right)^2\right]} = 7{,}7 \text{ мм.}$$

Ширина полосы в калибре *I*

$$2b_1 = 2b_2 - \Delta b_2 = 180{,}8 - 7{,}7 = 173{,}1 \text{ мм}.$$

*Калибр I — черновой*

Уширение

$$\Delta b_1 = \frac{2 \cdot 173{,}1 \cdot 26 \cdot 1}{(70 + 44)\left[1 + (1 + 0{,}355)\left(\frac{173{,}1}{203 \cdot 0{,}355}\right)^2\right]} = 9 \text{ мм}.$$

Ширина заготовки определена ниже по ширине калибра *I*. Определим углы сгиба в отдельных калибрах.

Угол сгиба в калибре *I* принимаем $\varphi_1 = 130°$, а в чистовом и предчистовом калибрах соответственно $\varphi_5 = 90°$ и $\varphi_4 = 90°$.

Для определения углов сгиба $\varphi$ в калибрах *II* и *III* определяем суммарное обжатие в указанных калибрах:

$$\sum \Delta h = \Delta h_2 + \Delta h_3 + \Delta h_4 = 16{,}5 + 10{,}5 + 5 = 32 \text{ мм}.$$

Суммарное уменьшение угла $\sum \Delta\varphi$ в указанных трех калибрах составляет

$$\sum \Delta\varphi = \Delta\varphi_2 + \Delta\varphi_3 + \Delta\varphi_4 = 130° - 90° = 40°.$$

Коэффициент пропорциональности равен

$$m = \frac{\sum \Delta\varphi}{\sum \Delta h} = \frac{40}{32} = 1{,}25.$$

Тогда угол сгиба в калибре *II* равен

$$\varphi_2 = \varphi_1 - \Delta\varphi_2 = 130° - 1{,}25 \cdot 16{,}5 \approx 109{,}4°.$$

Угол сгиба в калибре *III*

$$\varphi_3 = \varphi_2 - \Delta\varphi_3 = 109° - 1{,}25 \cdot 16{,}5 = 95{,}9° \approx 96°.$$

Результаты расчета приведены в табл. 61, по данным которой производим построение отдельных калибров, начиная с чистового.

Таблица 61

**Калибровка угловой стали 100×100×10 *мм***

| Номер проходов (калибров) | Коэффициент уменьшения высоты $p$ | Толщина полок $h$, *мм* | Обжатие полок $\Delta h$, *мм* | Общая ширина полок $2b$, *мм* | Общее уширение полок $\Delta b$, *мм* | Угол сгиба полок $\varphi$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Заготовка | | 70 | — | — | — | — |
| 1 | 1,6 | 44 | 26,0 | 173,1 | 9,0 | 130 |
| 2 | 1,6 | 27,5 | 16,5 | 180,8 | 7,7 | 109 |
| 3 | 1,6 | 17,0 | 10,5 | 186,7 | 5,9 | 96 |
| 4 | 1,45 | 12,0 | 5,0 | 189,2 | 2,5 | 90 |
| 5 | 1,25 | 9,6 | 2,4 | 190,4 | 1,2 | 90 |

*Калибр V — чистовой*

Чистовой калибр (рис. 133,*а*) имеет прямые полки. Радиусы закругления у вершины и у края полок равны соответственно

$$r = 12 \text{ мм} \text{ и } r' = 4 \text{ мм}.$$

Уширение в чистовом калибре свободное, поэтому длина полок калибра получается больше длины полок задаваемого уголка.

Для возможности прокатки уголка данного номера разной толщины достаточно иметь один чистовой калибр, так как настройкой валков при наличии простора на свободное уширение можно в одном чистовом калибре прокатывать уголки всех толщин и даже разной ширины, если радиусы закругления $R$ у вершины одинаковые.

В предчистовом калибре прокатку ведут с ограниченным уширением. Поэтому, например, для уголка № 10, толщина полок которого изменяется в пределах 6,5—16 *мм* (7 размеров), необходимо иметь, по крайней мере, два предчистовых калибра для обеспечения допускаемых отклонений по ширине в пределах ±2 *мм* согласно ГОСТ 8509—57.

Поэтому в приведенном расчете калибровки уголка 100×100×10 *мм* предчистовой калибр пригоден для толщин 6,5; 7,8 и 10 *мм*, а для толщин 12; 14 и 16 *мм* потребуется второй предчистовой калибр с меньшей общей шириной полок.

Ширина чистового калибра

$$B_5 = 2 \cdot b_5 \cos \alpha_5 = 190{,}4 \times$$
$$\times\ 0{,}707 = 135 \text{ мм}.$$

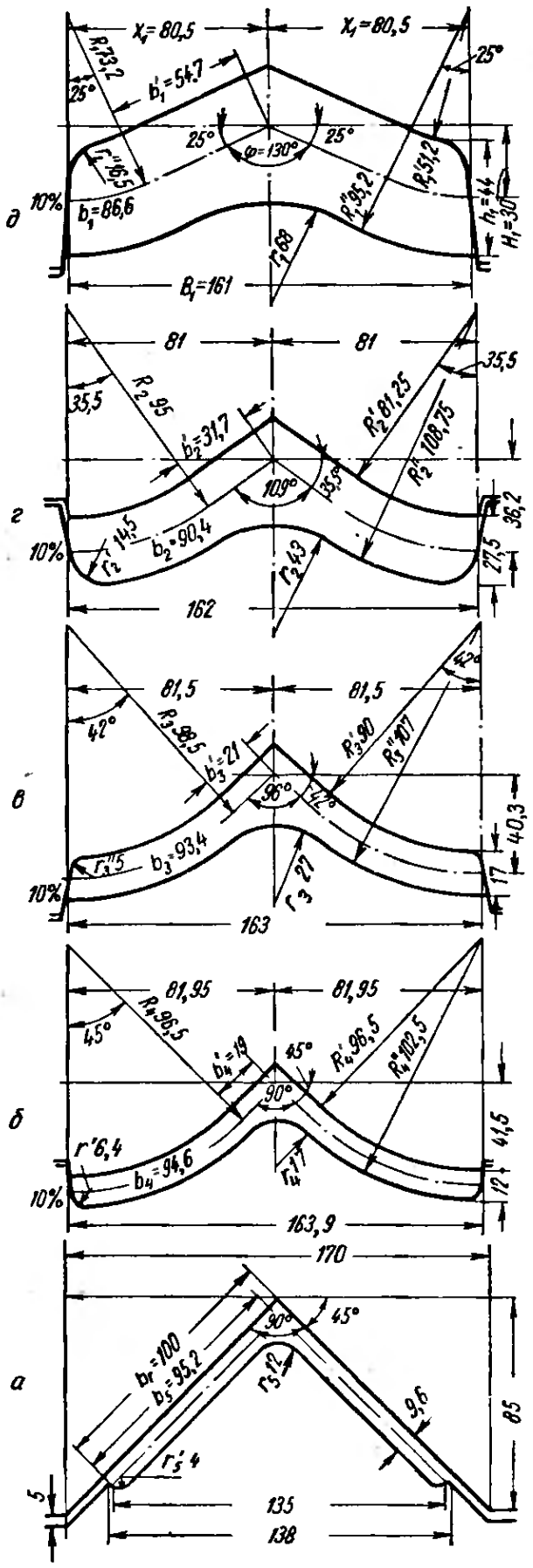



Рис. 133. Калибры для прокатки угловой стали № 10:

*а* — чистовой *V*; *б* — предчистовой *IV*; *в* — черновой *III*; *г* — черновой *II*; *д* — черновой *I*

Ширина калибра по верхнему валку [11]

$$B' \approx 1{,}7 b_г = 1{,}7 \cdot 100 = 170 \text{ мм}.$$

Глубина среза

$$H_5 = 0{,}5 \cdot B_5' = 0{,}5 \cdot 170 = 85 \text{ мм}.$$

*Калибр IV — предчистовой*

Согласно табл. 61 ширина одной полки в калибре IV (см. рис. 133, *б*) равна $b_4 = 94{,}6$ *мм*, толщина полки $h_4 = 12$ *мм*. Угол сгиба $\varphi_4 = 90°$, угол наклона полок $\alpha = 90° - 0{,}5\varphi = 45°$. Длину прямой части полки $b_4'$ необходимо выбрать такой, чтобы ширина калибра уменьшалась против хода прокатки. Для этого необходимо определить ширину калибра *I* и разработать конструкцию предчистового калибра.

Примем сначала в калибре *IV* прямую часть полки равной

$$b_4' = 0{,}30 \cdot b_4 = 0{,}30 \cdot 94{,}6 = 28{,}4 \text{ мм}.$$

Ширина калибра *IV* равна

$$B_4 = 2 \cdot X_4 = 2 \cdot 0{,}707 \cdot 28{,}4 +$$
$$+ 2 \cdot 1{,}275\,(94{,}6 - 28{,}4)\,0{,}707 = 160{,}1 \text{ мм}.$$

В калибре *I* длина полки

$$b_1 = 86{,}6 \text{ мм}.$$

Углы

$$\varphi_1 = 130°, \quad \alpha_1 = 25°.$$

Принимаем

$$b_1' = 0{,}6 \cdot b_1 = 0{,}6 \cdot 86{,}6 = 52 \text{ мм}.$$

Ширина калибра *I* равна

$$B_1 = 2 \cdot X = 2 \cdot 52 \cdot 0{,}906 + 2\frac{86{,}6 - 52}{0{,}436} 0{,}423 = 161{,}3 \text{ мм}.$$

Из приведенного расчета видно, что полученная ширина $B_4$ является недостаточной. Если принять приращение ширины в калибрах *II*, *III* и *IV* по 1 *мм*, то ширина калибра *IV* должна быть равной $B_4 \approx 164$ *мм*. Чтобы получить такую ширину, необходимо принять длину прямой части равной $b_4' = 0{,}2 \cdot b_4$.

Тогда получим

$$b_4' = 0{,}20 \cdot 94{,}6 = 19 \text{ мм}.$$

Согласно приведенным выше формулам, радиус изгиба полок равен

$$R_4 = 1{,}275\,(94{,}6 - 19) = 1{,}275 \cdot 75{,}6 = 96{,}5 \text{ мм}.$$

Радиус изгиба полки по верхней грани

$$R_4' = R_4 - 0{,}5h_4 = 96{,}5 - 0{,}5 \cdot 12 = 90{,}5 \text{ мм}.$$

Радиус изгиба по нижней грани полки

$$R_4'' = R_4 + 0{,}5 \cdot h_4 = 96{,}5 + 0{,}5 \cdot 12 = 102{,}5 \text{ мм}.$$

Ширина калибра

$$B_4 = 2 \cdot X_4 = 2 \cdot 0{,}707 \cdot 19 + 2 \cdot 0{,}707 \cdot 96{,}5 = 163{,}9 \text{ мм}.$$

Высота среза

$$H_4 = 0{,}707 \cdot 19 + 0{,}293 \cdot 96{,}5 = 41{,}7 \text{ мм}.$$

Радиус закругления у вершины

$$r_4 = 1{,}45 \cdot r_5 = 1{,}45 \cdot 12 \approx 17 \text{ мм}.$$

Радиус закругления у нижнего края полки

$$r_4' = r_5' + \Delta h_5 = 4 + 2{,}4 = 6{,}4 \text{ мм}.$$

По этим расчетным данным на рис. 133, *б* построен предчистовой калибр *IV*.

### *Калибр III — черновой*

Ширина одной полки, согласно табл. 61, равна $b_3 \approx 93{,}4$ *мм*, толщина полки $h_3 = 17$ *мм*. Угол сгиба равен $\varphi_3 = 96°$.

Ширина калибра

$$B_3 = B_4 - 1 = 163{,}9 - 1 \approx 163 \text{ мм}.$$

По ширине калибра определяем длину прямой части полки, радиус изгиба полок и другие размеры.

Ширину прямого участка полки можно определить по формуле

$$b_3' = \frac{b_3 \dfrac{\sin \alpha_3}{0{,}01745\alpha} - 0{,}5B_3}{\dfrac{\sin \alpha}{0{,}01745\alpha} - \cos \alpha},$$

где $\alpha_3 = 90 - 0{,}5\ \varphi_3$.

В нашем случае

$$\alpha_3 = 90° - 0{,}5 \cdot 96° = 42°;$$

$$\sin 42° = 0{,}669; \quad \alpha = 0{,}733 \text{ рад}; \quad \cos 42° = 0{,}743;$$

$$b_3' = \frac{93{,}4 \dfrac{0{,}669}{0{,}733} - 0{,}5 \cdot 163{,}0}{\dfrac{0{,}669}{0{,}733} - 0{,}743} = 21 \text{ мм}.$$

Радиус изгиба полки

$$R_3 = \frac{93{,}4 - 21}{0{,}733} = 98{,}5 \text{ мм}.$$

Радиус изгиба по верхней грани полки

$$R_3' = R_3 - 0{,}5h_3 = 98{,}5 - 0{,}5 \cdot 17 = 90{,}0 \text{ мм}.$$

Радиус изгиба по нижней грани

$$R_3'' = R_3 + 0{,}5h_3 = 98{,}5 + 0{,}5 \cdot 17 = 107{,}0 \text{ мм}.$$

Высота среза

$$H_3 = b_3' \sin \alpha_3 + R(1 - \cos \alpha_3) =$$

$$= 21 \cdot \sin 42° + 98{,}5\,(1 - \cos 42°) = 40{,}3 \text{ мм}.$$

Радиус закругления у вершины

$$r_3 = 1{,}6 \cdot r_4 = 1{,}6 \cdot 17 = 27 \text{ мм}.$$

Радиус закругления у верхнего края полки

$$r_3'' = \Delta h_4 = 5 \text{ мм}.$$

Уклон боковых граней принимаем 10%.

*Калибр II — черновой*

Ширина одной полки калибра *II* (см. рис. 133, *г*), согласно табл. 61, равна $b_2 = 90{,}4$ *мм*. Толщина полки $h_2 = 27{,}5$ *мм*, угол сгиба $\varphi_2 = 109°$. Угол наклона полки

$$\alpha_3 = 90° - 0{,}5 \cdot 109° = 35{,}5°.$$

Определяем ширину калибра:

$$B_2 = B_3 - 1 = 163{,}0 - 1 = 162{,}0 \text{ мм}.$$

Прямая часть полки $b_2'$ равна

$$b_2' = \frac{90{,}4\,\frac{0{,}581}{0{,}619} - 0{,}5 \cdot 162{,}0}{\frac{0{,}581}{0{,}619} - 0{,}814} = 31{,}7 \text{ мм}.$$

Радиус изгиба полки

$$R_2 = \frac{90{,}4 - 31{,}7}{0{,}619} = 95 \text{ мм}.$$

Радиус изгиба полки по верхней грани

$$R_2' = 95 - 0{,}5 \cdot 27{,}5 = 81{,}25 \text{ мм}.$$

Радиус изгиба полки по нижней грани

$$R_2'' = 95 + 0{,}5 \cdot 27{,}5 = 108{,}75 \text{ мм}.$$

Высота среза

$$H = 31{,}7 \cdot \sin 35{,}5° + 95\,(1 - \cos 35{,}5°) = 36{,}2 \text{ мм}.$$

Радиус закругления у вершины

$$r_2 = 1{,}6 \cdot r_3 = 1{,}6 \cdot 27 = 43 \text{ мм}.$$

Радиус закругления у нижнего края полки

$$r_2' = r_5 + \Delta h_3 = 4 + 10{,}5 = 14{,}5 \text{ мм}.$$

Уклон боковых граней принимаем 10%.

*Калибр I*

Длина одной полки калибра (см. рис. 133, *д*) равна $b_1 = 86{,}6$ *мм*, толщина $h_1 = 44$ *мм*, углы $\varphi_1 = 130°$ и $\alpha_1 = 90° - 0{,}5 \cdot 130° = 25°$.

Ширину калибра принимаем

$$B_1 = B_2 - 1 = 162 - 1 = 161{,}0 \text{ мм}.$$

Прямая часть полки равна

$$b_1' = \frac{86{,}6\,\frac{0{,}423}{0{,}436} - 0{,}5 \cdot 161{,}0}{\frac{0{,}423}{0{,}436} - 0{,}906} = 54{,}7 \text{ мм}.$$

Радиус изгиба полки

$$R_1 = \frac{86{,}6 - 54{,}7}{0{,}436} = 73{,}2 \text{ мм}.$$

Радиус изгиба полки по верхней грани

$$R_1' = 73{,}2 - 0{,}5 \cdot 44 = 51{,}2 \text{ мм}.$$

Радиус изгиба полки по нижней грани

$$R_1'' = 73{,}2 + 0{,}5 \cdot 44 = 95{,}2 \text{ мм}.$$

Высота среза

$$H = 54{,}7 \cdot \sin 25° + 73{,}2\,(1 - \cos 25°) = 30{,}0 \text{ мм}.$$

Радиус закругления у вершины

$$r_1 = 1{,}6 \cdot r_2 = 1{,}6 \cdot 43 = 68 \text{ мм}.$$

Радиус закругления у верхнего края полки

$$r_1'' = \Delta h_2 = 16{,}5 \text{ мм}.$$

Уклон боковых граней принимаем 10%.

*Выбор ширины заготовки*

Толщину заготовки приняли $h_0 = 70$ *мм*. Ширину заготовки в соответствии с шириной калибра *I* следует принять $b_0 = 161 - 9 = 152$ *мм*.

Учитывая значительную толщину калибра *I*, малый угол сгиба и надежное центрирование, принимаем меньший простор на уширение. Окончательно выбираем ширину заготовки $b_0 = 155$ *мм*. Данные, необходимые для построения калибров, приведены в табл. 62.

**Размеры калибров угловой**

| Номер калибра | Ширина полки $b$, *мм* | Прямая часть полки $b'$, *мм* | Изогнутая часть полки $b-b'$, *мм* | Ширина калибра $B$, *мм* | Толщина полк $h$, *мм* | Угол сгиба полок $\varphi$, град. | Радиус изгиба полки по средней оси $R$, *мм* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Заготовка | — | — | 155,0 | 70 | — | — |
| 1 | 86,6 | 54,7 | 31,9 | 161,0 | 44 | 130 | 73,2 |
| 2 | 90,4 | 31,7 | 58,7 | 162,0 | 27,5 | 109 | 95,0 |
| 3 | 93,4 | 21,0 | 72,4 | 163,0 | 17,0 | 96 | 98,5 |
| 4 | 94,6 | 19,0 | 75,6 | 163,9 | 12,0 | 90 | 96,5 |
| 5 | 95,2 | — | — | — | 9,6 | 90 | — |

## Примерный расчет калибровки неравнобокого уголка № 12,5/8

Методика расчета калибровки неравнобокого углового профиля в основном такая же, как и методика расчета калибровки равнобокого уголка, за исключением некоторых особенностей, которые видны из приведенного ниже примерного расчета неравнобокого уголка № 12,5/8.

*Исходные данные*

Рассчитать калибровку неравнобокого уголка 125×80×7; 8; 10; 12 *мм* в соответствии с ГОСТ 8510—57 из Ст. 3 (ГОСТ 535—58). Диаметр валков $D = 500$ *мм*, $n = 120$ *об/мин*.

Допуски: по ширине полки $\pm 2$ *мм*; по толщине $\pm 0{,}60$ *мм* для толщины 7 и 8 *мм* и $\pm 0{,}65$ *мм* для толщины 10 и 12 *мм*.

Радиус внутреннего закругления у вершины $R = 11$ *мм*, радиус закругления полки $r = 3{,}7$ *мм*. Расчет ведем для прокатки уголка с полкой толщиной 10 *мм*.

Площадь профиля для полки толщиной 10 *мм* равна

$$F = 1970 \text{ мм}^2.$$

Определяем горячие размеры профиля, принимая неполный минусовый допуск.

Ширина большой полки

$$b_{б.г} = (125 - 1{,}5)\ 1{,}013 = 125\ мм.$$

Ширина малой полки

$$b_{м.г} = (80 - 1{,}5)\ 1{,}013 = 80\ мм.$$

Толщина полки

$$h_г = (10 - 0{,}5)\ 1{,}013 = 9{,}6\ мм.$$

Таблица 62

**стали 100×100×10 *мм***

| Радиус изгиба полки по верхней грани $R'$, *мм* | Радиус изгиба по нижней грани $R''$, *мм* | Высота среза $H$, *мм* | Радиус закругления у вершины $r$, *мм* | Радиус закругления у нижнего края полки $r'$, *мм* | Радиус закругления у верхнего края полки $r''$, *мм* | Уклон стенок калибров, % |
|---|---|---|---|---|---|---|
| — | — | — | — | — | — | — |
| 51,2 | 95,2 | 30,0 | 68,0 | — | 16,5 | 10 |
| 81,25 | 108,75 | 36,2 | 43,0 | 14,5 | — | 10 |
| 90,0 | 107,0 | 40,3 | 27,0 | — | 5 | 10 |
| 90,5 | 102,5 | 41,7 | 17,0 | 6,4 | — | 10 |
| — | — | 67,3 | 12,0 | 4 | — | — |

Ширина полок по средней линии равна

$$b_б + b_м = 125 + 80 - 9{,}6 = 195{,}4\ мм.$$

Принимаем пять фасонных калибров:

$$\sum \frac{H}{h} = 1{,}25 \cdot 1{,}45 \cdot 1{,}6 \cdot 1{,}6 \cdot 1{,}6 = 7{,}41.$$

Высоту заготовки принимаем

$$h_0 = 9{,}6 \cdot 7{,}41 \approx 70\ мм.$$

Толщина полок по проходам

$$h_1 = 70 : 1{,}6 = 44\ мм;$$

$$h_2 = 44 : 1{,}6 = 27{,}5\ мм;$$

$$h_3 = 27{,}5 : 1{,}6 = 17{,}0\ мм;$$

$$h_4 = 17{,}0 : 1{,}45 = 12{,}0\ мм;$$

$$h_5 = 12{,}0 : 1{,}25 = 9{,}6\ мм.$$

Обжатие по проходам

$$\Delta h_1 = h_0 - h_1 = 70 - 44 = 26 \text{ мм};$$
$$\Delta h_2 = h_1 - h_2 = 44 - 27{,}5 = 16{,}5 \text{ мм};$$
$$\Delta h_3 = h_2 - h_3 = 27{,}5 - 17{,}0 = 10{,}5 \text{ мм};$$
$$\Delta h_4 = h_3 - h_4 = 17{,}0 - 12{,}0 = 5{,}0 \text{ мм};$$
$$\Delta h_5 = h_4 - h_5 = 12{,}0 - 9{,}6 = 2{,}4 \text{ мм}.$$

Угол захвата в калибре I при $D = 450$ *мм* равен

$$\alpha_1 = \arccos\left(1 - \frac{\Delta h_1}{D_{к1}}\right) = \left(1 - \frac{26}{450 - 44}\right) = 20^\circ 36'.$$

При $n = 120$ *об/мин* окружная скорость равна

$$v = \frac{\pi D_{к1} n}{60} = \frac{3{,}15 \cdot 0{,}406 \cdot 120}{60} = 2{,}55 \text{ м/сек}.$$

Допустимый угол захвата по графику (см. рис. 45) составляет $\alpha_{доп} = 25^\circ$. Последующие проходы по условию захвата не проверяем.

Определяем уширение по отдельным калибрам. Воспользуемся результатами расчета уширения, приведенными ранее для уголка № 10, т. е.

$$\Delta b_5 = 1{,}2 \text{ мм}; \ \Delta b_4 = 2{,}5 \text{ мм}; \ \Delta b_3 = 5{,}9 \text{ мм}; \ \Delta b_2 = 7{,}7 \text{ мм}$$
$$\text{и } \Delta b_1 = 9{,}0 \text{ мм}.$$

Тогда ширина полосы после каждого калибра будет:

$$b_4 = 194{,}2 \text{ мм}, \quad b_3 = 191{,}7 \text{ мм}, \quad b_2 = 185{,}8 \text{ мм}, \quad b_1 = 178{,}1 \text{ мм}$$

Для построения калибров необходимо знать ширину большой и малой полок в отдельности. Уширение распределяем между большой и малой полками пропорционально их ширине. Если уширение равно $\Delta b$, то

$$\Delta b_б = \frac{\Delta b \cdot b_б}{b_б + b_м} \text{ и } \Delta b_м = \frac{\Delta b \cdot b_м}{b_б + b_м}.$$

Тогда имеем следующие значения большой и малой полки:

$$\Delta b_{б5} = 0{,}7 \text{ мм}; \quad b_{б5} = 120{,}2 \text{ мм}; \quad \Delta b_{м5} = 0{,}5 \text{ мм};$$
$$b_{м5} = 75{,}2 \text{ мм};$$
$$\Delta b_{б4} = 1{,}5 \text{ мм}; \quad b_{б4} = 119{,}5 \text{ мм}; \quad \Delta b_{м4} = 1{,}0 \text{ мм};$$
$$b_{м4} = 74{,}7 \text{ мм};$$

$$\Delta b_{б3} = 3{,}7\ мм;\quad b_{б3} = 118{,}0\ мм;\quad \Delta b_{м3} = 2{,}2\ мм;$$
$$b_{м3} = 73{,}7\ мм;$$
$$\Delta b_{б2} = 4{,}8\ мм;\quad b_{б2} = 114{,}3\ мм;\quad \Delta b_{м2} = 2{,}9\ мм,$$
$$b_{м2} = 71{,}5\ мм;$$
$$b_{б1} = 109{,}5\ мм;\qquad b_{м1} = 68{,}6\ мм.$$

Углы сгиба определяем таким же образом, как и при расчете калибровки равнобокого уголка:

$$\varphi_1 = 130°;\quad \varphi_2 = 109°;\quad \varphi_3 = 96°;$$
$$\varphi_4 = 90°\ и\ \varphi_5 = 90°.$$

Результаты расчета приведены в табл. 63.

Таблица 63

**Калибровка неравнобокого уголка 125×80×10 *мм***

| Номер калибра | Коэффициент уменьшения высоты $p$ | Толщина полок $h$, *мм* | Обжатие полок $\Delta h$, *мм* | Общая ширина полок $b_б + b_м$, *мм* | Ширина большой полки $b_б$, *мм* | Ширина малой полки $b_м$, *мм* | Общее уширение $\Delta b$, *мм* | Угол сгиба полок $\varphi$, град. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Заготовка | 70,0 | — | — | — | — | — | — |
| *I* | 1,6 | 44,0 | 26,0 | 178,1 | 109,5 | 68,6 | 9,0 | 130 |
| *II* | 1,6 | 27,5 | 16,5 | 185,8 | 114,3 | 71,5 | 7,7 | 109 |
| *III* | 1,6 | 17,0 | 10,5 | 191,7 | 118,0 | 73,7 | 5,9 | 96 |
| *IV* | 1,45 | 12,0 | 5,0 | 194,2 | 119,5 | 74,7 | 2,5 | 90 |
| *V* | 1,25 | 9,6 | 2,4 | 195,4 | 120,2 | 75,2 | 1,2 | 90 |

Затем переходим к построению отдельных калибров, начиная с чистового.

### *Калибр V — чистовой*

Неравнобокий уголок в чистовом калибре (рис. 134, *а*) располагаем так, чтобы глубина вреза $H$ для малой и большой полок была одинаковой. Как видно из рис. 134, *а*, должно соблюдаться равенство вертикальных проекций полок [11]:

Результаты расчета приведены в табл. 63

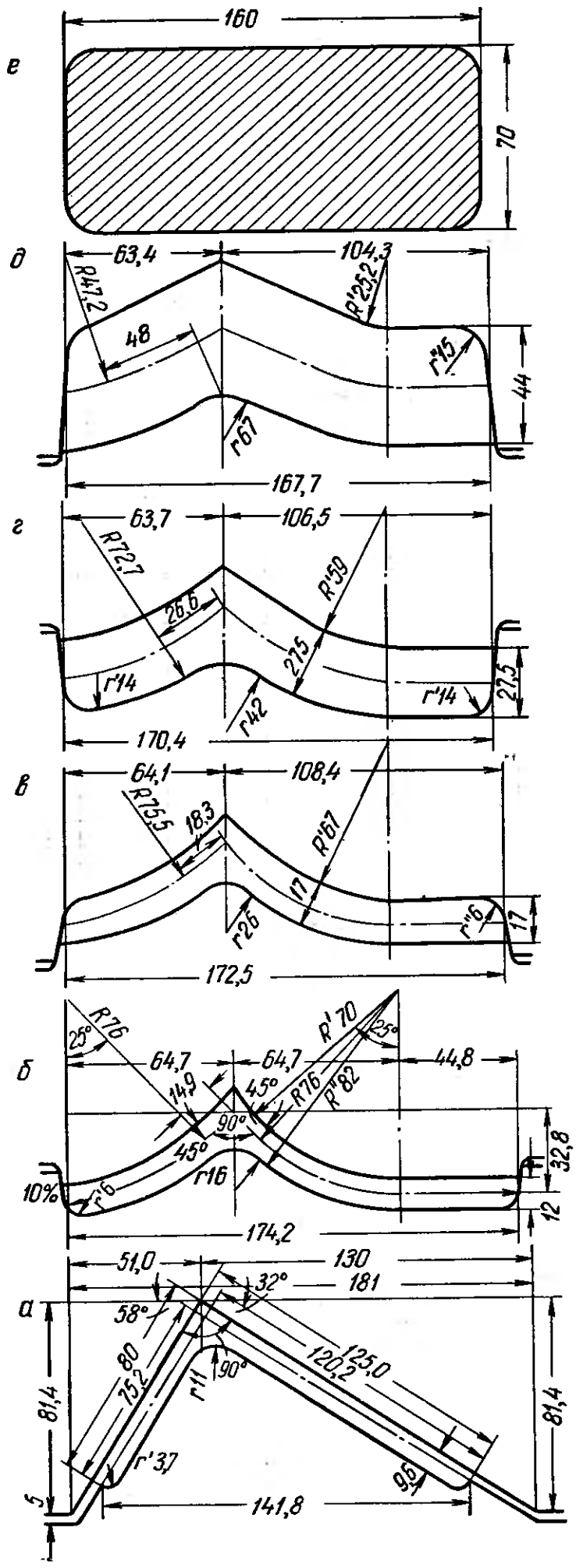
$$b_м \sin \alpha_м = b_б \sin \alpha_б,$$

откуда

$$\frac{b_б}{b_м} = \frac{\sin \alpha_м}{\sin \alpha_б}.$$

Так как

$$\alpha_б = 90° - \alpha_м \text{ и } \sin \alpha_б = \cos \alpha_м,$$




то

$$\frac{b_б}{b_м} = \operatorname{tg}\alpha_м \quad \text{и} \quad \alpha_м = \operatorname{arctg}\frac{b_б}{b_м}.$$

В нашем случае

$$\alpha_м = \operatorname{arctg}\frac{120,2}{75,2} = \operatorname{arctg} 1,6 = 58°;$$

$$\alpha_б = 90° - 58° = 32°.$$

Ширина чистового калибра

$$B_п = b_м \cos\alpha_м + b_б \cos\alpha_б;$$

$$B_б = 75,2 \cdot \cos 58° + 120,2 \cdot \cos 32° = 141,8 \text{ мм}.$$

Глубина ручья [11]

$$H_б = 1,2 b_{м.г} \cdot \sin\alpha_м = 1,2 \cdot 80 \cdot \sin 58° = 81,4 \text{ мм}.$$

Ширина калибра по верхнему валку

$$B'_б = H_б (\operatorname{ctg}\alpha_м + \operatorname{ctg}\alpha_б) = 81,4 (\operatorname{ctg} 58° + \operatorname{ctg} 32°) = 181 \text{ мм}.$$

Радиусы закругления $r_5 = 11$ *мм* у вершины и $r'_5 = 3,7$ *мм* у края полки. Для возможности прокатки уголков разной толщины предусматриваем два чистовых калибра — для $h = 7$ *мм* и $h = 10$ *мм*. Остальные толщины (8 и 12 *мм*) получаем изменением раствора валков.

Рис. 134. Расчетная калибровка для прокатки неравнобокого уголка 125×80×10 *мм*

*Калибр IV — предчистовой*

Согласно данным табл. 63, ширина малой полки $b_{м4} = 74{,}7$ *мм*, большой полки $b_{б4} = 119{,}5$ *мм*, толщина $h_4 = 12$ *мм*.

Угол сгиба $\varphi_4 = 90°$. Предчистовой калибр располагаем так, (см. рис. 134, *б*), чтобы биссектриса проходила вертикально и $\alpha_{м4} = \alpha_{б4} = 45°$. Определим радиус изгиба $R_4$ для малой полки с тем, чтобы согласовать радиус изгиба с шириной калибра по отдельным проходам.

Принимаем длину прямой части полки

$$b'_{м4} = 0{,}2 \cdot b_{м4} = 0{,}2 \cdot 74{,}7 = 14{,}9 \text{ мм}.$$

Проекция малой полки $X_{м4}$ равна

$$X_{м4} = 0{,}707 \cdot 14{,}9 + 1{,}275\ (74{,}7 - 14{,}9)\ 0{,}707 = 64{,}7 \text{ мм}.$$

При $b'_{м1} = 0{,}6 \cdot 68{,}6 = 41{,}2$ *мм* и $\varphi_1 = 130°$

$$X_{м1} = 41{,}2 \cdot 0{,}906 + \frac{68{,}6 - 41{,}2}{0{,}436}\ 0{,}432 = 63{,}7 \text{ мм}.$$

Получилась малая разница между значениями ширины калибров. Принимаем

$$b'_{м1} = 0{,}70 \cdot 68{,}6 \approx 48 \text{ мм},$$

тогда

$$X = 48 \cdot 0{,}906 + \frac{68{,}6 - 48}{0{,}436} \cdot 0{,}423 = 63{,}4 \text{ мм}.$$

Принимаем следующие значения $X_м$ по калибрам;

$$X_{м4} = 64{,}7 \text{ мм};\quad X_{м3} = 64{,}1 \text{ мм};\quad X_{м2} = 63{,}7 \text{ мм};$$
$$X_{м1} = 63{,}4 \text{ мм}.$$

Как далее увидим, общая ширина калибра будет увеличиваться на 1—1,5 *мм* по ходу прокатки.

Для большой полки горизонтальная проекция (см. рис. 134, *б*) равна

$$X_{б4} = X_{м4} + b_{б4} - b_{м4} = 64{,}7 + 119{,}5 - 74{,}7 =$$
$$= 109{,}5 \text{ мм}.$$

Отрезок $b_{б4} - b_{м4} = 44{,}8$ *мм* является горизонтальным участком большой полки.

Полная ширина калибра

$$B_4 = X_{м4} + X_{б4} = 64{,}7 + 109{,}5 = 174{,}2 \text{ мм}.$$

Радиус изгиба полки

$$R_4 = 1{,}275\ (74{,}7 - 14{,}9) = 76{,}0 \text{ мм}.$$

Радиус изгиба по верхней грани полки

$$R_4' = R_4 - 0{,}5 \cdot h_4 = 76{,}0 - 0{,}5 \cdot 12 = 70 \text{ мм}.$$

Радиус изгиба по нижней грани полки

$$R_4'' = R_4 + 0{,}5 \cdot h_4 = 76 + 0{,}5 \cdot 12 = 82{,}0 \text{ мм}.$$

Высота среза $H_4$ равна

$$H_4 = 0{,}707 \cdot 14{,}9 + 0{,}293 \cdot 76 = 32{,}8 \text{ мм}.$$

Радиус закругления у вершины

$$r_4 = 1{,}45 \cdot r_5 = 1{,}45 \cdot 11 = 16 \text{ мм}.$$

Радиус закругления у нижнего края полки

$$r' = 0{,}5 \cdot h = 0{,}5 \cdot 12 = 6 \text{ мм}.$$

Уклон боковых граней равен 10%.

*Калибр III — черновой*

Ширина малой полки, согласно данным табл. 63, равна $b_{м3} = 73{,}7$ *мм*, толщина полки $h_3 = 17$ *мм*. Угол сгиба $\varphi_3 = 96°$. Угол $\alpha_3 = 90° - 0{,}5 \cdot 96° = 42°$. Горизонтальная проекция малой полки равна $X_{м3} = 64{,}1$ *мм* (см. рис. 134, *в*)

Определяем длину прямой части полки $b_{м3}'$ по формуле (79):

$$b_{м3}' = \frac{73{,}7 \dfrac{0{,}669}{0{,}733} - 64{,}1}{\dfrac{0{,}669}{0{,}733} - 0{,}743} = 18{,}3 \text{ мм}.$$

Радиус изгиба полки

$$R_3 = \frac{73{,}7 - 18{,}3}{0{,}733} = 75{,}5 \text{ мм}.$$

Радиус изгиба по верхней грани полки

$$R_3' = R_3 - 0{,}5 \cdot h_3 = 75{,}5 - 0{,}5 \cdot 17 = 67{,}0 \text{ мм}.$$

Радиус изгиба по нижней грани полки

$$R_3'' = R_3 + 0{,}5 \cdot h_3 = 75{,}5 + 0{,}5 \cdot 17 = 84{,}0 \text{ мм}.$$

Горизонтальный отрезок большой полки

$$b_{б3} - b_{м3} = 118{,}0 - 73{,}7 = 44{,}3 \text{ мм}.$$

Горизонтальная проекция большой полки

$$X_{б3} = 64{,}1 + 44{,}3 = 108{,}4 \text{ мм}.$$

Ширина калибра

$$B_3 = X_{м3} + X_{б3} = 64{,}1 + 108{,}4 = 172{,}5 \text{ мм}.$$

Высота среза равна

$$H_3 = b'_{м3} \sin \alpha_3 + R_3 (1 - \cos \alpha_3) =$$
$$= 18{,}3 \cdot 0{,}669 + 45{,}5 \cdot (1 - 0{,}743) = 31{,}6 \text{ мм}.$$

Уклон боковых граней принимаем 10%.

*Калибр II — черновой*

Ширина малой полки калибра (см. рис. 134, *г*), равна $b_{м2} = 71{,}5$ *мм*, толщина полки 27,5 *мм*. Углы $\varphi_2 = 109°$ и $\alpha_2 = 35{,}5°$.

Горизонтальная проекция малой полки равна

$$X_{м2} = 63{,}7 \text{ мм}.$$

Длина прямого участка полки

$$b'_{м2} = \frac{71{,}5 \dfrac{0{,}581}{0{,}619} - 63{,}7}{\dfrac{0{,}581}{0{,}619} - 0{,}814} = 28{,}6 \text{ мм}.$$

Радиус изгиба полки

$$R_2 = \frac{71{,}5 - 28{,}6}{0{,}619} = 69{,}2 \text{ мм}.$$

Радиус изгиба полки по верхней грани

$$R'_2 = R_2 - 0{,}5 \cdot h_2 = 69{,}2 - 0{,}5 \cdot 27{,}5 = 55{,}4 \text{ мм}.$$

Радиус изгиба полки по нижней грани

$$R''_2 = R_2 + 0{,}5 \cdot h_2 = 69{,}2 + 0{,}5 \cdot 27{,}5 = 83{,}0 \text{ мм}.$$

Горизонтальный отрезок большой полки

$$b_{б2} - b_{м2} = 114{,}3 - 71{,}5 = 42{,}8 \text{ мм}.$$

Горизонтальная проекция большой полки

$$X_{б2} = 63{,}7 + 42{,}8 = 106{,}5 \text{ мм}.$$

Полная ширина калибра

$$B_2 = X_{м2} + X_{б2} = 63{,}7 + 106{,}5 = 170{,}2 \text{ мм}.$$

Высота среза

$$H_2 = b'_{м2} \sin \alpha_2 + R_2 (1 - \cos \alpha_2) =$$
$$= 28{,}6 \cdot 0{,}581 + 69{,}2 \cdot 0{,}186 = 29{,}5 \text{ мм}.$$

Радиус закругления у вершины

$$r_2 = 1{,}6 \cdot r_3 = 1{,}6 \cdot 26 \approx 42 \text{ мм}.$$

Радиус закругления у нижнего края полки

$$r_2' = 0{,}5 h_2 = 0{,}5 \cdot 27{,}5 \approx 14 \text{ мм}.$$

Уклон боковых граней 10%.

*Калибр I — черновой*

Ширина малой полки равна $b_{м1} = 68{,}6$ *мм*, толщина полки $h_1 = 44$ *мм*. Углы $\varphi_1 = 130°$ и $\alpha_1 = 25°$. Горизонтальная проекция малой полки (см. рис. 134, *д*):

$$X_{м1} = 63{,}4 \text{ мм}.$$

Длина прямой части полки по формуле (79):

$$b_{м1}' = \frac{68{,}6 \dfrac{0{,}423}{0{,}436} - 63{,}4}{\dfrac{0{,}423}{0{,}436} - 0{,}906} = 48 \text{ мм}.$$

Радиус изгиба полки

$$R_1 = \frac{68{,}6 - 48{,}0}{0{,}436} = 47{,}2 \text{ мм}.$$

Радиус изгиба полки по верхней грани

$$R_1' = 47{,}2 - 0{,}5 \cdot 44 = 25{,}2 \text{ мм}.$$

Радиус изгиба полки по нижней грани

$$R_1'' = 47{,}2 + 0{,}5 \cdot 44 = 69{,}2 \text{ мм}.$$

Горизонтальный отрезок большой полки

$$b_{б1} - b_{м1} = 109{,}5 - 68{,}6 = 40{,}9 \text{ мм}.$$

**Размеры калибров**

| Номер калибра | Ширина малой полки $b_м$, *мм* | Длина прямой части малой полки $b_м'$, *мм* | Длина изогнутой части малой полки $b_м - b_м'$, *мм* | Длина горизонтального отрезка большой полки $b_б - b_м$, *мм* | Ширина калибра $B$, *мм* | Толщина полок $h$, *мм* | Угол сгиба $\varphi$, град. | $X_м$, *мм* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Заготовка | — | — | — | 160 | 70 | — | — |
| *I* | 68,6 | 48,0 | 20,6 | 40,9 | 167,7 | 44 | 130 | 63,4 |
| *II* | 71,5 | 28,6 | 42,9 | 42,8 | 170,2 | 27,5 | 109 | 63,7 |
| *III* | 73,7 | 18,3 | 55,4 | 44,3 | 172,5 | 17,0 | 96 | 64,1 |
| *IV* | 74,7 | 14,9 | 59,8 | 44,8 | 174,0 | 12,0 | 90 | 64,6 |
| *V* | 75,2 | — | — | — | 141,8 | 9,6 | 90 | 39,8 |

Горизонтальная проекция большой полки

$$X_{б1} = X_{м1} + b_{б1} - b_{м1} = 63{,}4 + 40{,}9 = 104{,}3 \text{ мм}.$$

Полная ширина калибра

$$B_1 = X_{м1} + X_{б1} = 63{,}4 + 104{,}3 = 167{,}7 \text{ мм}.$$

Высота среза

$$H_1 = 48{,}8 \cdot 0{,}423 + 47{,}2\,(1 - 0{,}906) = 25{,}1 \text{ мм}.$$

Радиус закругления у вершины

$$r_1 = 1{,}6 \cdot r_2 = 1{,}6 \cdot 42 = 67 \text{ мм}.$$

Радиус закругления у верхнего края полки

$$r_1'' = 0{,}35 \cdot h_1 = 15 \text{ мм}.$$

Уклон боковых граней 10%.

*Ширина заготовки*

Толщина заготовки $h_0 = 70$ мм.
Ширина заготовки равна

$$b_0 = B_1 - \Delta b_1 = 167{,}7 - 9 = 158{,}7 \text{ мм}.$$

Можно ограничить уширение и принять ширину заготовки (см. рис. 134, *е*) равной

$$b_0 = 160 \text{ мм}.$$

Данные, необходимые для построения калибров, приведены в табл. 64.

Таблица 64

**голка 125×80×10 мм**

| $X_б$, мм | Раднус изгнба $R$, мм | Радиус изгнба $R'$, мм | Радиус изгиба $R''$, мм | Высота среза $H$, мм | Радиус закруглення $r$, мм | Радиус закругления $r'$, мм | Радиус закруглення $r''$, мм | Уклон % |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 104,3 | 47,2 | 25,2 | 69,2 | 25,1 | 67,0 | — | 15,0 | 10 |
| 106,5 | 69,2 | 55,4 | 83,0 | 29,5 | 42,0 | 14,0 | — | 10 |
| 108,4 | 75,5 | 67,0 | 84,0 | 31,6 | 26,0 | — | 6,0 | 10 |
| 109,4 | 76,0 | 70,0 | 82,0 | 32,8 | 16,0 | 6,0 | — | 10 |
| 102,0 | — | — | — | 76,5 | 11,0 | 3,7 | — | — |

## 3. ПРОКАТКА И КАЛИБРОВКА УГЛОВОЙ СТАЛИ НА НЕПРЕРЫВНЫХ СТАНАХ

Перед расчетом калибровки угловой стали при прокатке на непрерывном стане выбирают схему прокатки в открытых или закрытых калибрах.

Уголки $40\times40\times4$ и $36\times36\times4$ *мм* на непрерывном стане 250 Криворожского металлургического завода раньше прокатывали в открытых калибрах: в клетях 6,7 и 9 были расположены открытые пластовые калибры, в клети 10 раскат обжимали в вертикальных валках для уточнения ширины, в клети 11 производили небольшой изгиб полок (уклон $\alpha \approx 15°$), в клети 12 с помощью вертикальных валков уточняли ширину полок и несколько увеличивали уклон их (до 20°), в клетях 13 и 15 уголок получал нормальную форму, а в двух последних калибрах — предчистовом и чистовом — полку обжимали по толщине с 6 до 4 *мм*.

Прокатка в открытых калибрах упрощает форму калибров, делает их более универсальными, однако при этом необходимо более тщательно следить за проводковой арматурой с целью получения точных размеров полок по ширине. Поэтому в последнее время на стане 250 прокатку уголка ведут в закрытых калибрах.

Как видно из рис. 135, уголок $40\times40\times4$ *мм* прокатывают следующим образом. Овальная полоса $61\times25$ *мм* из клети 6 поступает в закрытй пластовый калибр клети 7 и затем в аналогичный калибр клети 9. Далее в клети 11 производят небольшой изгиб полок в закрытом калибре ($\alpha = 15°$), в клети 12 вертикальными валками уточняют размеры полок и производят дальнейший изгиб полок до $\alpha = 30°$.

В клети 13 уголок принимает нормальную форму, причем прокатку ведут в открытом калибре (предчистовом). В клети 15 уголок получает окончательные размеры в чистовом калибре.

Прокатка в закрытых калибрах обеспечивает более точные размеры уголка, упрощается уход за проводковой арматурой.

Необходимо отметить, что схему прокатки уголка (рис. 135) применяют только для прокатки равнобокого уголка небольших размеров, примерно до № 5. В этом случае можно применять калибровку уголка с прямыми полками, которые получают ребровое обжатие в одной или двух клетях с вертикальными валками.

При прокатке на непрерывных станах уголков большего размера применяют систему калибров с изогнутыми полками без применения вертикальных валков.

Для примерного расчета принимаем схему прокатки с закрытыми калибрами (рис. 135). Ход расчета по этой схеме калибровки уголка следующий:

1) устанавливаем «горячие» размеры и среднюю длину полок с учетом минусового допуска;

2) определяем обжатие в чистовом калибре, которое составляет около 20%, а также свободное уширение полок, считая уши-

рение для каждой полки самостоятельным, находим размеры предчистового калибра (клеть 13);

3) определяем размеры калибра клети 12, принимая в клети 13 обжатие по толщине полок ~25%, со свободным уширением; уклон полок калибра в клети 12 принимаем равным 30°.

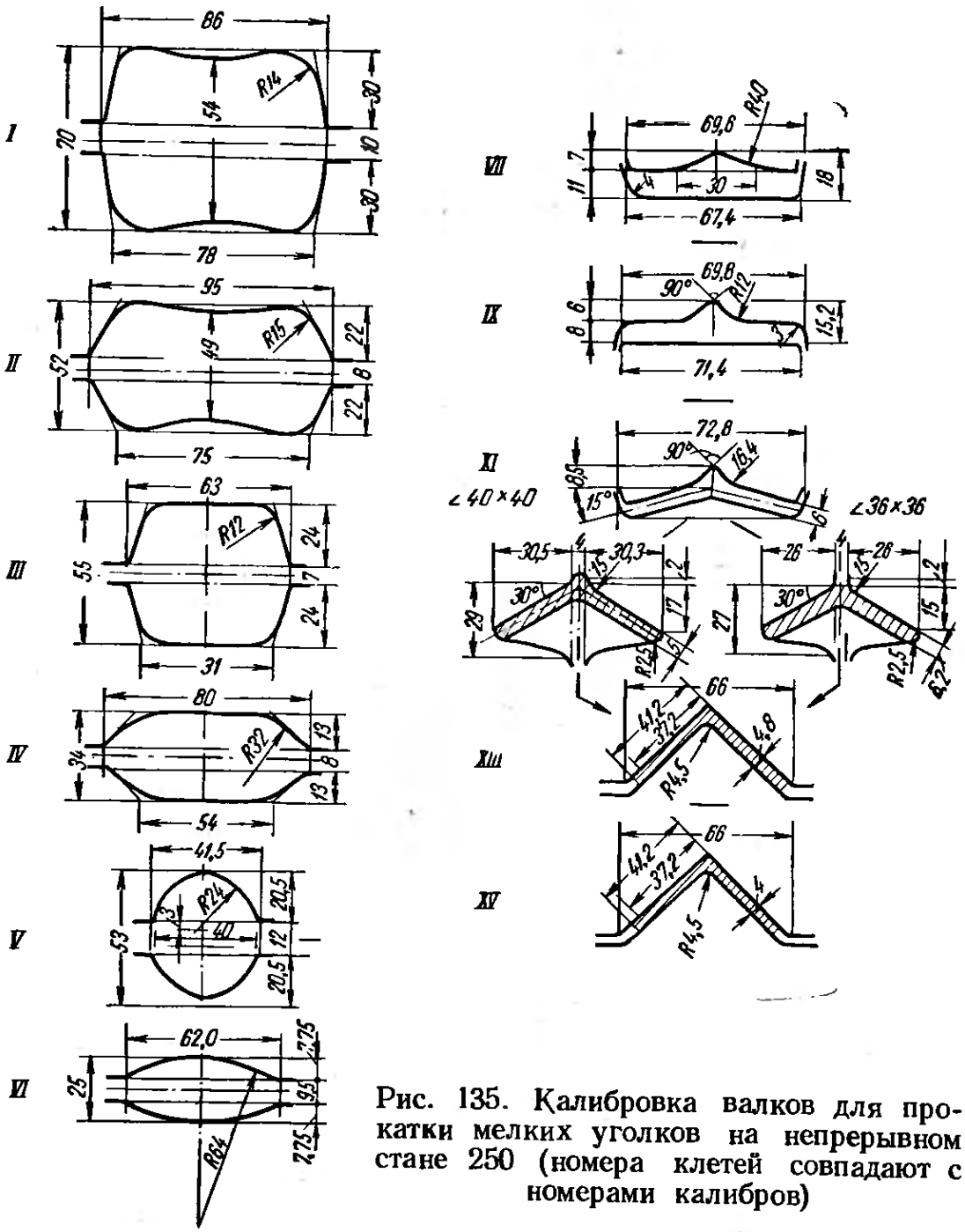



Рис. 135. Калибровка валков для прокатки мелких уголков на непрерывном стане 250 (номера клетей совпадают с номерами калибров)

4) определяем размеры следующего калибра (клеть 11), принимая уклон полок 15°, а ребровое обжатие полок в клети 12 — равным 3—4 *мм*;

5) в клетях 11,9 и 7 прокатку ведем с ограниченным уширением, с обжатием полок около 30—45%;

6) исходное сечение — овал, выходящий из клети 6 черновой группы.

Таким образом, уголок прокатывают в шести фасонных калибрах: двух пластовых, одном с наклонными полками, одном ребровом калибре и последних двух калибрах (предчистовом и чистовом) нормальной формы.

## Примерный расчет калибровки угловой стали 40×40×4 *мм* при прокатке на непрерывном стане 250

### *Исходные данные*

Ширина полки в холодном состоянии $b = 40$ *мм*. Толщина полки в холодном состоянии $h = 4{,}0$ *мм*. Согласно ГОСТ 8509—57, допуски $\Delta$ составляют $\pm 1$ *мм* по ширине полки и $\pm 0{,}4$ *мм* по толщине полки.

Радиусы закругления $R = 5$ *мм* у вершины и $r = 1{,}7$ *мм* у края полки.

Площадь поперечного сечения готового профиля $Q = 308$ *мм*$^2$, масса 1 *м* профиля $G = 2{,}42$ *кг*.

Схему калибровки и форму калибров принимаем согласно рис. 135.

### *Клеть 15 — чистовой калибр*

Наружная ширина полки в горячем состоянии с учетом минусового допуска составляет

$$b_{г15} = \left(b - \frac{\Delta}{2}\right) \cdot 1{,}015 = \left(40 - \frac{1}{2}\right) \cdot 1{,}015 = 40{,}0 \text{ мм}.$$

Толщина полки в горячем состоянии

$$h_{г15} = \left(h - \frac{\Delta}{2}\right) \cdot 1{,}015 = \left(4{,}0 - \frac{0{,}4}{2}\right) \cdot 1{,}015 = 4{,}0 \text{ мм}.$$

Ширина полки по средней линии равна (рис. 136, *а*)

$$b_{15} = b_{г15} - 0{,}5 \cdot h_{г15} = 40 - 0{,}5 \cdot 4{,}0 = 38{,}0 \text{ мм}.$$

Принимаем коэффициент уменьшения высоты

$$p_{15} = \frac{h_{13}}{h_{15}} = 1{,}20,$$

тогда задаваемая толщина полки равна

$$h_{13} = h_{г15}\, p_{15} = 4{,}0 \cdot 1{,}2 = 4{,}8 \text{ мм}.$$

Определяем уширение, считая, что каждая полка уширяется самостоятельно:

$$\Delta b_{15} = \frac{2 \cdot 38{,}0 \cdot 0{,}8}{(4{,}8 + 4{,}0)\left[1 + (1 + 0{,}0785)\left(\frac{38{,}0}{134{,}4 \cdot 0{,}0785}\right)^2\right]} = 0{,}5 \text{ мм},$$

где

$$b_{ср15} \approx 38{,}0 \text{ мм};\ \Delta h_{15} = 4{,}8 - 4{,}0 = 0{,}8 \text{ мм};$$

$$D_0 = D_б + s = 270 + 4{,}4 = 274{,}4 \text{ мм};$$

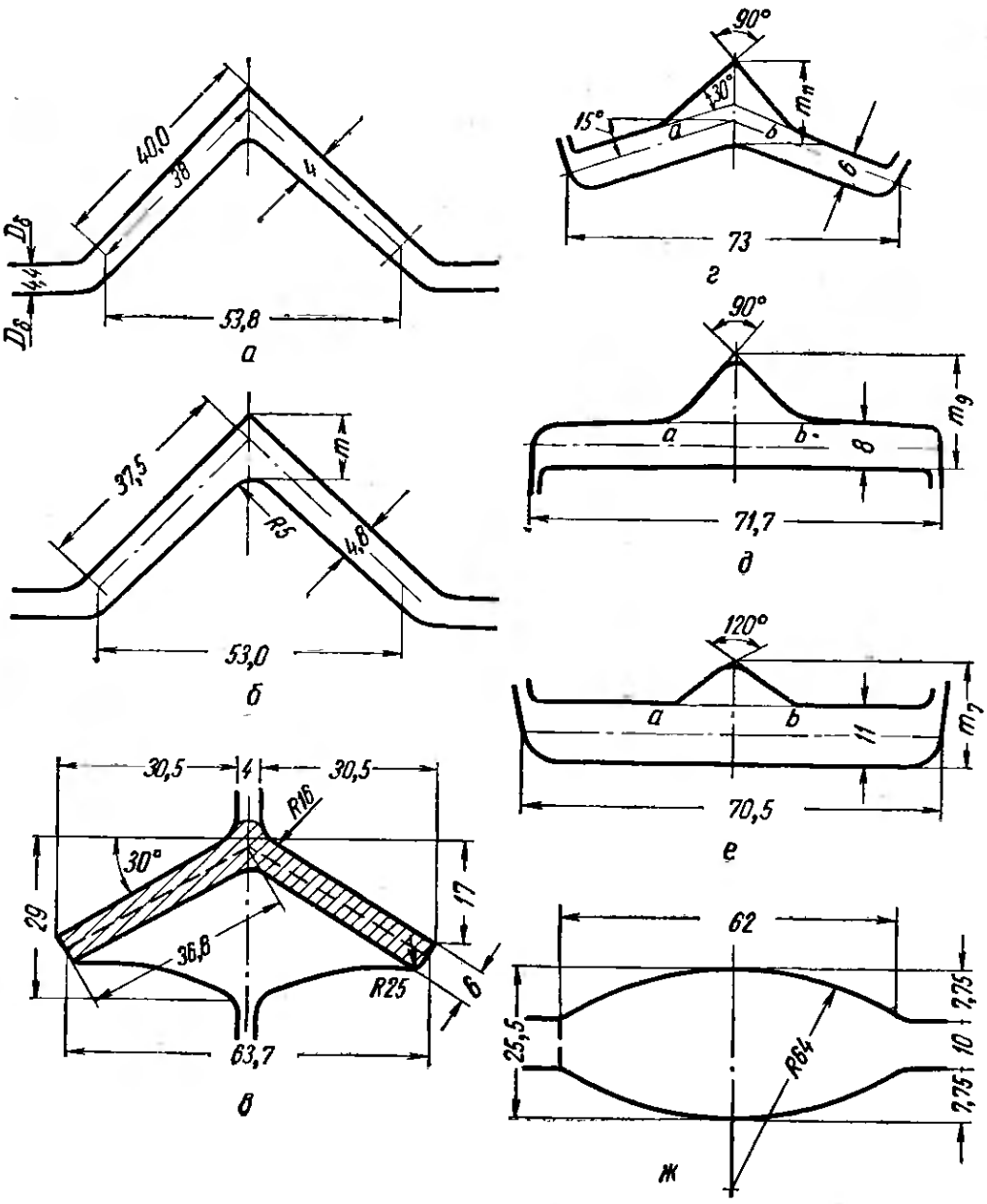



Рис. 136. Калибровка уголка 40×40×4 *мм* при прокатке на непрерывном стане 250:

*а* — чистовой, клеть 15; *б* — предчистовой, клеть 13; *в* — ребровый, клеть 12; *г* — черновой, клеть 11; *д* — пластовый, клеть 9; *е* — пластовый, клеть 7; *ж* — овальный, клеть 6

$$D_{к.ср} = D_0 - h_{ср} = 274{,}4 - \frac{Q}{b_к} = 274{,}4 - \frac{304}{53{,}8} = 268{,}7 \text{ мм};$$

$$R_{к.ср} = 134{,}4 \text{ мм}.$$

$$Q = 2 \cdot b_{ср15} \cdot h_{г15} = 2 \cdot 38 \cdot 4 = 304 \text{ мм}^2;$$

$$\alpha_{15} = \arccos\left(1 - \frac{\Delta h_{15}}{D_{к.ср}}\right) = \arccos\left(1 - \frac{0{,}8}{268{,}7}\right) = \arccos 0{,}9969;$$

$$\alpha_{15} = 4° 30';\quad \alpha_{15} = 0{,}0785 \text{ рад}.$$

*Клеть 13 — предчистовой калибр*

Ширина полки по средней линии (рис. 136, *б*)

$$b_{13} = b_{15} - \Delta b_{15} = 38{,}0 - 0{,}5 = 37{,}5 \text{ мм}.$$

Толщина полки $h_{13} = 4{,}8$ *мм*.

Коэффициент уменьшения высоты в предчистовом калибре принимаем

$$p_{13} = \frac{h_{12}}{h_{13}} = 1{,}25.$$

Тогда задаваемая толщина полки равна

$$h_{12} = h_{13} p_{13} = 4{,}8 \cdot 1{,}25 = 6 \text{ мм}.$$

Обжатие по толщине полки составляет

$$\Delta h_{13} = h_{12} - h_{13} = 6{,}0 - 4{,}8 = 1{,}2 \text{ мм}.$$

Определяем уширение полки в предчистовом калибре, считая, что каждая полка имеет независимое и свободное уширение

$$\Delta b_{13} = \frac{2 \cdot 37{,}5 \cdot 1{,}2}{(6 + 4{,}8)\left[1 + (1 + 0{,}096)\left(\frac{37{,}5}{133{,}8 \cdot 0{,}096}\right)^2\right]} = 0{,}7 \text{ мм},$$

где $Q_{13} = 2, \cdot 37{,}5 \cdot 4{,}8 = 360$ *мм*$^2$.

$$D_{к.\,ср} = 274{,}4 - \frac{360}{53} = 267{,}6; \qquad R_{к.\,ср} = 133{,}8 \text{ мм};$$

$$\alpha_{13} = 5°30' = 0{,}096 \text{ рад}.$$

Согласно ГОСТ 8509—57, радиус закругления у вершины $R = 5$ *мм*. Толщина полосы у вершины (рис. 136, *б*) равна

$$m_{13} = 1{,}414 \cdot 4{,}8 + 0{,}414 \cdot 5 = 8{,}8 \text{ мм}.$$

*Клеть 12 с вертикальными валками*

Для уточнения размеров полок в вертикальных валках применяют ребровый калибр.

Наклон полок $\alpha$ в клетях 11, 12 и 13 принимаем соответственно

$$\alpha_{11} = 15°, \ \alpha_{12} = 30° \text{ и } \alpha_{13} = 45°.$$

Ширина полки в клети 12 (рис. 136, *в*)

$$b_{12} = b_{13} - \Delta b_{13} = 37{,}5 - 0{,}7 = 36{,}8 \text{ мм}.$$

Толщина полки в ребровом калибре равна $h_{12} = 6$ *мм*.

Ширина полки по горизонтали составляет

$$B_{12} = 2 \cdot b_{12} \cdot \cos 30° = 2 \cdot 36{,}8 \cdot 0{,}866 = 63{,}7 \text{ мм}.$$

В вертикальных валках даем обжатие по ширине каждой полки около 1 *мм*.

*Клеть 11 — с горизонтальными валками*

Наклон полок составляет $\alpha_{11} = 15°$. Ширина полки с учетом обжатия ее в ребровом калибре равна

$$b_{11} = b_{12} + 1 = 36{,}8 + 1 = 37{,}8 \text{ мм}.$$

Толщина полки остается прежней, т. е.

$$h_{11} = h_{12} = 6 \text{ мм}.$$

Ширина калибра по горизонтали (рис. 136, *г*)

$$B_{11} = 2 \cdot b_{11} \cos 15° = 2 \cdot 37{,}8 \cdot 0{,}966 = 73 \text{ мм}.$$

Коэффициент уменьшения высоты принимаем $p_{11} = 1{,}35$. Тогда задаваемая толщина равна (клеть 10 пропускаем)

$$h_9 = p_{11} h_{11} = 1{,}35 \cdot 6 = 8{,}0 \text{ мм}.$$

Обжатие равно

$$\Delta h_{11} = h_9 - h_{11} = 8 - 6 = 2 \text{ мм}.$$

В клети 11 принимаем коэффициент ограничения $k' = 0{,}8$. Поправочный коэффициент, учитывающий наклон полок, принимаем $k'' = 1{,}5$. Тогда при подсчете уширения пользуемся произведением

$$k'k'' = 0{,}8 \cdot 1{,}5 = 1{,}2.$$

Суммарное уширение для двух полок равно

$$\Delta b = \frac{2 \cdot 73 \cdot 2 \cdot 1{,}2}{(8+6)\left[1 + (1 + 0{,}1134)\left(\frac{73{,}0}{159{,}3 \cdot 0{,}1134}\right)^2\right]} = 1{,}3 \text{ мм},$$

где

$$D_0 = 320 + 4 = 324 \text{ мм}; \quad D_{\text{к.ср}} = 324 - \frac{393}{73} = 318{,}6;$$

$$R_{\text{к.ср}} = 159{,}3; \quad \alpha = 6°30' = 0{,}1134 \text{ рад}.$$

Как видно из рис. 136, *г*, для заполнения вершины уголка необходимо определить величину $m_{11}$. Принимаем коэффициент уменьшения $p'_{13}$ по вершине несколько больше, чем $p_{13} = 1{,}25$, т. е. $p'_{13} = 1{,}3$. Тогда

$$m_{11} = p'_{13} m_{13} = 1{,}3 \cdot 8{,}8 = 11{,}4 \text{ мм}.$$

Из геометрических соотношений (см. рис. 136, *г*) находим величину $ab = 14{,}2$ *мм*. Угол у вершины $\varphi_{11} = 90°$.

*Клеть 9 — пластовый калибр*

Ширина полок или калибра (см. рис. 136, *д*) равна

$$B_9 = B_{11} - \Delta b_{11} = 73 - 1{,}3 = 71{,}7 \text{ мм}.$$

Принимаем коэффициент уменьшения толщины $p_9 = 1{,}4$. Тогда задаваемая толщина равна

$$h_7 = p_9 h_9 = 1{,}4 \cdot 8 = 11 \text{ мм}.$$

Обжатие по толщине

$$\Delta h_9 = h_7 - h_9 = 11 - 8 = 3 \text{ мм}.$$

Уширение

$$\Delta b_9 = \frac{2 \cdot 71{,}7 \cdot 3 \cdot 0{,}8}{(11+8)\left[1 + (1 + 0{,}122\left(\frac{71{,}7}{158 \cdot 0{,}122}\right)^2\right]} = 1{,}2 \text{ мм},$$

где

$$\alpha_9 = 7^\circ = 0{,}122 \text{ рад}; \quad R_{\text{к. ср}} = 158 \text{ мм}.$$

Принимаем у вершины $p'_{11} = 1{,}35$, тогда

$$m_9 = p'_9 m_{11} = 1{,}35 \cdot 11{,}4 = 15{,}5 \text{ мм}.$$

Угол у вершины $\varphi_9 = 90^\circ$.

*Клеть 7 — пластовый калибр*

Ширина калибра (рис. 136, *е*)

$$B_7 = B_9 - \Delta b_9 = 71{,}7 - 1{,}2 = 70{,}5 \text{ мм}.$$

Толщина полки $h_7 = 11$ *мм*.

Учитывая, что в этот калибр задается овальная полоса, принимаем угол у вершины $\varphi_7 = 120^\circ$.

Коэффициент уменьшения по вершине принимаем

$$p'_9 = p_9 = 1{,}4.$$

Тогда толщина по вершине будет равна

$$m_7 = p'_9 m_9 = 1{,}4 \cdot 15{,}5 = 21{,}7 \text{ мм}.$$

С учетом закруглений принимаем $m_7 = 21$ *мм*. Ширина треугольника (выступа) равна (рис. 136, *е*)

$$ab = 2\,(21 - 11)\,\text{tg}\,60^\circ = 2 \cdot 10 \cdot 1{,}732 = 34{,}6 \text{ мм}.$$

В этот калибр задают овальную полосу из клети 6.

Таким образом, последняя клеть черновой группы (клеть 7) имеет специальный калибр для прокатки уголка $40 \times 40 \times 4$ *мм* [1].

По данным заводской калибровки, принимаем размеры овальной полосы

$$b_6 h_9 = 62 \cdot 25{,}5 \text{ мм}.$$

[1] Расчет размеров калибров в остальных клетях черновой группы приведен в гл. V.

Простор на уширение в клети 7 равен

$$\Delta b_7 = b_7 - b_6 = 70{,}5 - 62 = 8{,}5 \text{ мм}.$$

Проверим уширение по формуле

$$\Delta b_7 = 0{,}45\sqrt{\Delta h_{ср} R_{к.ср}}\,\frac{\Delta h_{ср}}{h_{ср6}} = 0{,}45\cdot\sqrt{1{,}838\cdot 8{,}1}\,\frac{8{,}1}{20{,}5} = 7 \text{ мм},$$

где

$$\Delta h_{ср7} = h_{ср6} - h_{ср7} = 20{,}5 - 12{,}4 = 8{,}1 \text{ мм};$$

$$h_{ср6} = \frac{Q_6}{b_6} = \frac{1240}{62} = 20{,}5 \text{ мм};$$

$$h_{ср7} = \frac{Q_7}{b_7} = \frac{870}{70{,}5} = 12{,}4 \text{ мм};$$

$$D_{к.ср} = 380 - 12{,}4 = 367{,}6 \text{ мм}; \quad R_{к.ср} = 183{,}8 \text{ мм}.$$

Простор на уширение больше фактического уширения. Размеры овала оставляем без изменения.

Результаты расчета приведены в табл. 65.

Таблица 65

**Калибровка угловой стали 40×40×4 мм**

| Группа клетей | Номер клети | Размеры калибров, мм | | | Площадь сечения, мм² | Коэффициент вытяжки | Начальный диаметр, мм | Средний катающий диаметр, мм | n, об/мин | Окружная скорость валков, м/сек |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | ширина полки | ширина калибра | толщина | | | | | | |
| Черновая | 6 | — | 62 | 25,5 | 1280 | — | 380 | 360 | 114 | 1,66 |
| | 7 | — | 70,5 | 11 | 875 | 1,47 | 380 | 368 | 163 | 3,14 |
| Чистовая | 8 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | 9 | — | 71,7 | 8,0 | 630 | 1,39 | 330 | 319 | 260 | 4,35 |
| | 10 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | 11 | 38,7 | 73 | 6,0 | 485 | 1,30 | 330 | 323 | 334 | 5,7 |
| | 12 | 36,8 | — | 6,0 | 468 | 1,03 | 330 | 260 | 430 | 5,8 |
| | 13 | 37,5 | 53,0 | 4,8 | 360 | 1,30 | 274,4 | 268,0 | 542 | 7,6 |
| | 14 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | 15 | 38,0 | 53,8 | 4 | 304 | 1,19 | 274,4 | 269,0 | 640 | 9,0 |

При окружной скорости в чистовой клети $v_{15} = 9$ *м/сек* константа прокатки составляет $QD_{к.с}n = 52{,}4\cdot 10^6$. Значения чисел оборотов для остальных клетей определяем для условия, когда натяжение отсутствует, т. е. принимает константу, полученную для клети 15.

# ПРОКАТКА И КАЛИБРОВКА ДВУТАВРОВЫХ БАЛОК

## 1. ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОФИЛЯ

Одними из наиболее распространенных профилей, применяющихся при сооружении металлических конструкций, являются двутавровые балки (рис. 137). Характеристика двутавровых профилей различных номеров приведена в табл. 66.

Таблица 66

**Характеристика двутавровых балок (ГОСТ 8239—56)**

| Номер профиля | Размеры, *мм* | | | | | | Площадь сечения, *см²* | Масса 1 *м* профиля, *кг* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | *h* | *b* | *d* | *t* | *R* | *r* | | |
| 10 | 100 | 55 | 4,5 | 7,2 | 7 | 2,5 | 12,0 | 9,46 |
| 12 | 120 | 64 | 4,8 | 7,3 | 7,5 | 3 | 14,7 | 11,5 |
| 14 | 140 | 73 | 4,9 | 7,5 | 8 | 3 | 17,4 | 13,7 |
| 16 | 160 | 81 | 5,0 | 7,8 | 8,5 | 3,5 | 20,2 | 15,9 |
| 18 | 180 | 90 | 5,1 | 8,1 | 9 | 3,5 | 23,4 | 18,4 |
| 18а | 180 | 100 | 5,1 | 8,3 | 9 | 3,5 | 25,4 | 19,9 |
| 20 | 200 | 100 | 5,2 | 8,4 | 9,5 | 4 | 26,8 | 21,0 |
| 20а | 200 | 110 | 5,2 | 8,6 | 9,5 | 4 | 28,9 | 22,7 |
| 22 | 220 | 110 | 5,4 | 8,7 | 10 | 4 | 30,6 | 24,0 |
| 22а | 220 | 120 | 5,4 | 8,9 | 10 | 4 | 32,8 | 25,8 |
| 24 | 240 | 115 | 5,6 | 9,5 | 10,5 | 4 | 34,8 | 27,3 |
| 24а | 240 | 125 | 5,6 | 9,8 | 10,5 | 4 | 37,5 | 29,4 |
| 27 | 270 | 125 | 6,0 | 9,8 | 11 | 4,5 | 40,2 | 31,5 |
| 27а | 270 | 135 | 6,0 | 10,2 | 11 | 4,5 | 43,2 | 33,9 |
| 30 | 300 | 135 | 6,5 | 10,2 | 12 | 5,0 | 46,5 | 36,5 |
| 30а | 300 | 145 | 6,5 | 10,7 | 12 | 5 | 49,9 | 39,2 |
| 33 | 330 | 140 | 7,0 | 11,2 | 13 | 5 | 53,8 | 42,2 |
| 36 | 360 | 145 | 7,5 | 12,3 | 14 | 6 | 61,9 | 48,6 |
| 40 | 400 | 155 | 8,0 | 13,0 | 15 | 6 | 71,4 | 56,1 |
| 45 | 450 | 160 | 8,6 | 14,2 | 16 | 7 | 83,0 | 65,2 |
| 50 | 500 | 170 | 9,5 | 15,2 | 17 | 7 | 97,8 | 76,8 |
| 55 | 550 | 180 | 10,3 | 16,5 | 18 | 7 | 114 | 89,8 |
| 60 | 600 | 190 | 11,1 | 17,8 | 20 | 8 | 132 | 104 |
| 65 | 650 | 200 | 12,0 | 19,2 | 22 | 9 | 153 | 120 |
| 70 | 700 | 210 | 13,0 | 20,8 | 24 | 10 | 176 | 138 |
| 70а | 700 | 210 | 15,0 | 24,0 | 24 | 10 | 202 | 158 |
| 70б | 700 | 210 | 17,5 | 28,2 | 24 | 10 | 234 | 184 |

Уклон внутренних граней полок допускается не более 12%. Балки № 10—18 поставляются длиной 5—19 *м*, а № 20—70 — длиной 6—19 *м*.

ГОСТ 8239—56 предусматривает одну и ту же величину допусков по высоте балок и ширине полок. Величина этих отклонений составляет для профилей: № 10—14 ±2 *мм*; № 16—18 ±2,5 *мм*; № 20—30 ±3 *мм*; № 33—40 ±3,5 *мм*; № 45—70 ±4 *мм*.

По толщине полки плюсовые отклонения не ограничиваются, минусовые допускаются до 6% средней толщины полки. Толщину полок контролируют по калибрам на валках при их расточке.

Отклонения по массе допускаются в пределах 3—5%. Контроль массы осуществляет завод-изготовитель взвешиванием партии балок массой 20—60 *т* от каждых 400—500 *т* проката или взвешиванием кусков балок длиной не менее 300 *мм*, отбираемых при прокатке не реже, чем через каждые 100 прокатанных полос.

По требованию заказчика балки поставляют с уклоном наружной грани каждой полки не более 1,25%.

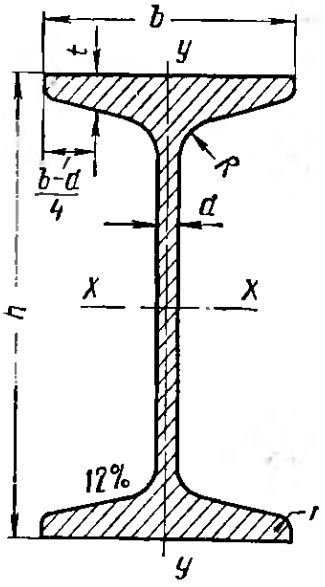



Рис. 137. Профиль двутавровой балки:

*h* — высота балки; *b* — ширина балки; *d* — толщина стенки; *t* — средняя толщина полки; *R* и *r* — радиусы закруглений

ГОСТ 8239—56 предусматривает прокатку двутавровых балок высотой 100—700 *мм* (№ 10—70). Балки № 18, 20, 22, 24, 27 и 30 имеют по два профиля. Для обозначения второго профиля рядом с номером балки ставят букву *а*. Указанные литерные профили отличаются от основных только увеличенной средней толщиной полок.

Балка № 70 имеет три профиля: 70, 70а и 70б. Литерные профили балки № 70 имеют увеличенные размеры полок и стенки. В результате увеличения размеров во всех литерных профилях увеличивается площадь поперечного сечения и масса.

## 2. СПОСОБЫ ПРОКАТКИ ДВУТАВРОВЫХ БАЛОК

Двутавровые балки прокатывают из прямоугольной заготовки. Первым фасонным калибром, придающим раскату черновую форму балки, служит разрезной калибр. Разрезной калибр может иметь различную конфигурацию в зависимости от размера прокатываемой балки, способа калибровки и типа стана. По способу вреза в валки разрезные калибры бывают с разъемом посередине высоты калибра (открытые) и с разъемом у края фланцев (закрытые).

Разрезанная заготовка поступает в балочные калибры, которые бывают прямые с ровной или изогнутой стенкой (рис. 138, *а* и *б*), косые (рис. 138, *в*), универсальные (рис. 138, *г*) и симметричные (открытые) (рис. 138, *д*).

Большое распространение получили прямые балочные калибры. Калибр состоит из стенки, открытых и закрытых фланцев. Стенка калибра образуется гребнями верхнего и нижнего валков, здесь происходит прямое обжатие стенки профиля. При прокатке балок мелких и средних размеров на отечественных заводах широко применяют калибры с изогнутой стенкой и с повышенным уклоном наружных стенок открытых фланцев (рис. 138, *б*).

Открытые фланцы образуются боковыми стенками буртов одного и стенками гребня другого валка. Металл попадает в пространство, имеющее форму суживающегося клина, и обжимается по толщине, получая боковое обжатие. Наличие бокового обжатия в открытых фланцах является важной особенностью прокатки двутавровых балок.

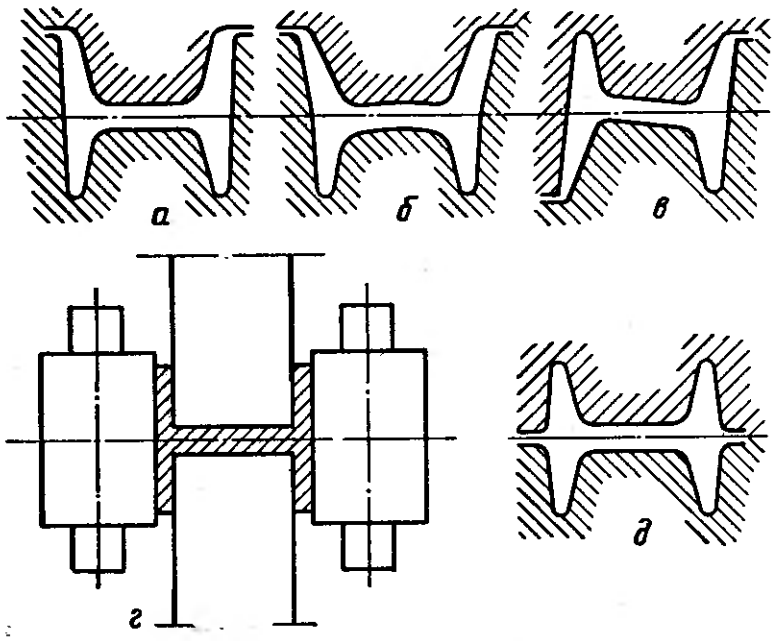


Рис. 138. Типы балочных калибров

Закрытые фланцы врезают в один валок, поэтому деформацию металла в них можно сравнить с процессом волочения прутка через очко, в результате чего металл в закрытом фланце получает утяжку по высоте и толщине.

Положение открытых и закрытых фланцев чередуется в следующих друг за другом калибрах. Это дает возможность поочередно интенсивно обрабатывать верхнюю и нижнюю части профиля без его кантовки. Наличие уклонов в калибрах подобного типа не позволяет получить профиль балки с параллельными наружными гранями полок.

Косое расположение калибров обеспечивает постоянство ширины калибров и параллельность наружных граней полок при переточках (рис. 138, *в*). При косой калибровке легче обжимать фланцы по толщине и можно сократить число проходов; меньше износ валков и выводных проводок; сокращается объем механической обработки при переточках валков. Однако при прокатке в косых калибрах возникают боковые усилия, вызывающие осевое смещение валков.

Универсальные калибры (рис. 138, *г*) применяют в специальных чистовых универсальных клетях при прокатке обычных балок на рельсо-балочных и крупносортных станах, в главных черновых и чистовых клетях универсальных станов при прокатке широкополочных балок и колонных профилей. Прямое обжатие в таких

калибрах осуществляется горизонтальными валками, боковое — вертикальными. Калибры черновых клетей универсальных балочных станов имеют уклоны наружных и внутренних стенок, что повышает степень использования горизонтальных валков и улучшает условия их службы. Универсальные калибры во всех чистовых клетях указанных выше станов уклона не имеют, что обеспечивает получение балок с параллельными наружными и внутренними гранями полок.

Симметричные балочные калибры (рис. 138, *д*) применяют на валках блюминга при прокатке больших балок, а также в обжимных клетях реверсивное дуо рельсо-балочных станов.

### 3. ДЕФОРМАЦИЯ МЕТАЛЛА В БАЛОЧНЫХ КАЛИБРАХ

При калибровке двутавровых балок различают элементы профиля — стенку и полки, последние в свою очередь состоят из двух фланцев: открытого и закрытого.

Рассмотрим характер деформации металла в двутавровом калибре в установившемся процессе, т. е. при наличии одновременно

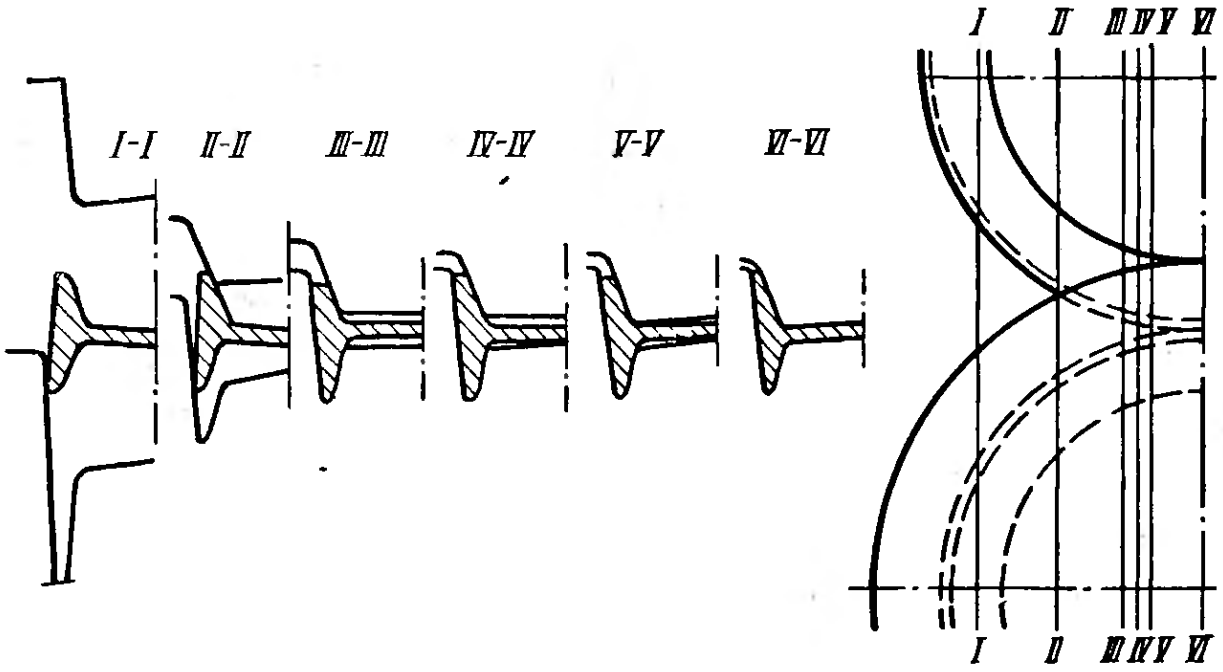



Рис. 139. Положение металла в балочном калибре при различных стадиях процесса прокатки

заднего и переднего внешних концов. Положение раската в калибре определяем из условия равновесия контактных сил; при этом необходимо учитывать возможные при пластической деформации изгибы элементов профиля и перетекание металла из одного элемента в другой. В двутавровом калибре с прямой стенкой положение профиля определяется постоянством оси стенки, а при изогнутой стенке — определенным характером ее перегиба.

На рис. 139 представлен ряд вертикальных сечений раската и калибра по длине очага деформации. В зависимости от наклона

боковых стенок калибра и полок задаваемого раската металл встречается с валками со стороны открытого или со стороны закрытого фланца. В современных калибровках двутавровых балок уклоны боковых стенок открытых фланцев делаются значительно большими, чем закрытых. Однако необходимо учитывать, что выравнивание изгиба фланцев частично происходит до соприкосновения их с валками благодаря воздействию находящегося в очаге деформации металла на задний внешний конец.

В сечении *I—I* фланец задаваемого раската касается внешней боковой поверхности калибра. Далее в сечении *II—II* противоположный фланец касается внутренней стороны гребня, образующего открытый фланец калибра. При этом происходит отгибка обоих фланцев с их поворотом. Это не вызывает значительного выравнивания изгиба стенки, так как местное увеличение ее ширины сдерживается соседними частями раската.

В сечении *III—III* начинается обжатие металла в закрытом фланце, при этом наружная грань задаваемого фланца прижимается к боковым стенкам калибра.

В сечении *IV—IV* оба фланца, верхний и нижний, подвергаются обжатию преимущественно у основания. Сравнительно небольшое их обжатие в этой стадии деформации не в состоянии вызвать общее удлинение всего профиля, поэтому обжимаемый металл из фланцев перетекает в стенку, которая в этот момент уже зажата между боковыми наружными гранями калибра. В результате стенка может несколько утолщаться или изгибаться (при малой толщине).

Сечение *V—V* характеризуется обжатием всех элементов профиля. Интенсивно начинает обжиматься стенка, металл из которой частично перетекает во фланцы. В закрытом фланце происходит защемление и утяжка металла, причем последняя может сопровождаться обжатием по высоте. В открытом фланце происходит боковое обжатие металла, меньшее, чем обжатие стенки. Величина высотной деформации металла в открытом фланце в основном зависит от соотношения вытяжек в этом фланце и стенке. Окончательное формирование профиля происходит в выходном сечении *VI—VI* или непосредственно за ним. Здесь заканчивается перетекание металла из стенки в область фланцев.

Следовательно, при прокатке фланцевых профилей, в том числе двутавровых балок, деформация металла в отдельных элементах профиля по мере прохождения очага деформации неравномерна; примерно одинаковыми могут быть лишь конечные коэффициенты вытяжки отдельных элементов. Из анализа последовательности заполнения балочного калибра металлом видно, что этот процесс можно разбить на четыре этапа.

В течение первого этапа

$$\mu_{фл} > 1 > \mu_{ст}.$$

Раскат захватывается валками по фланцам. Металл стремится течь вдоль полосы. Так как стенка тормозит вытяжку обжимаемых фланцев, часть металла из фланцев перемещается в стенку. Площадь поперечного сечения стенки несколько увеличивается.

В течение второго этапа

$$\mu_{фл} > \mu_{ст} > 1.$$

Вследствие начавшейся контактной деформации стенки перетекание металла из фланцев прекращается и создается возможность для вытяжки всего обжимаемого металла профиля. В результате этого начинается интенсивный рост коэффициента вытяжки фланцев $\mu_{фл}$.

В течение третьего этапа

$$\mu_{ст} > \mu_{фл} > 1.$$

Начинается интенсивная деформация стенки. При незначительных коэффициентах вытяжки фланцев в этой части очага деформации создается возможность обратного перетекания металла из стенки во фланцы.

В течение четвертого этапа

$$\mu_{ст} \approx \mu_{фл} > 1.$$

По мере приближения к выходу из очага деформации коэффициенты вытяжки отдельных элементов выравниваются. За счет неполного выравнивания коэффициентов вытяжки отдельных элементов в профиле могут возникать остаточные внутренние напряжения.

Таким образом, перетекание металла из фланцев в стенку в начале очага деформации к его концу сменяется обратным перетеканием из стенки во фланцы при одинаковых коэффициентах вытяжки в стенке и фланцах. В этом случае увеличиваются потери на внешнее трение и возникают внутренние напряжения в металле. Поэтому в случае прокатки во фланцевых калибрах предъявляются повышенные требования к пластичности металла и, кроме того, необходимо соблюдать определенный температурный интервал прокатки.

Для исследования деформации металла в балочном калибре отбирались недокаты с переходным участком от разных калибров. [1]

Снятие размеров поперечных сечений по длине очага деформации, а также контактных поверхностей производилось при помощи профилографа (рис. 140).

Профилограф имеет штатив, на котором закрепляют иглу и карандаш в одной вертикальной плоскости, проходящей через ось штатива. Вылеты иглы и карандаша должны быть строго

---

[1] Р. А. Машковцев. В сб. «Обработка металлов давлением» (ДМИ), вып. 48. Изд-во «Металлургия, 1962, с. 275.

одинаковы. При передвижении профилографа вокруг темплета так, чтобы игла соприкасалась с его поверхностью, на бумаге остается карандашный след, точно вычерчивающий исследуемый контур на темплете. Устанавливая темплет в разных положениях, можно получить любые проекции контактной поверхности. Профилограф позволяет измерять размеры темплета в любом месте, не разрезая заготовку.

На рис. 141 приведены профилограммы для одного из темплетов: поперечные сечения металла в очаге деформации, горизонтальная и вертикальная проекции контактной поверхности.

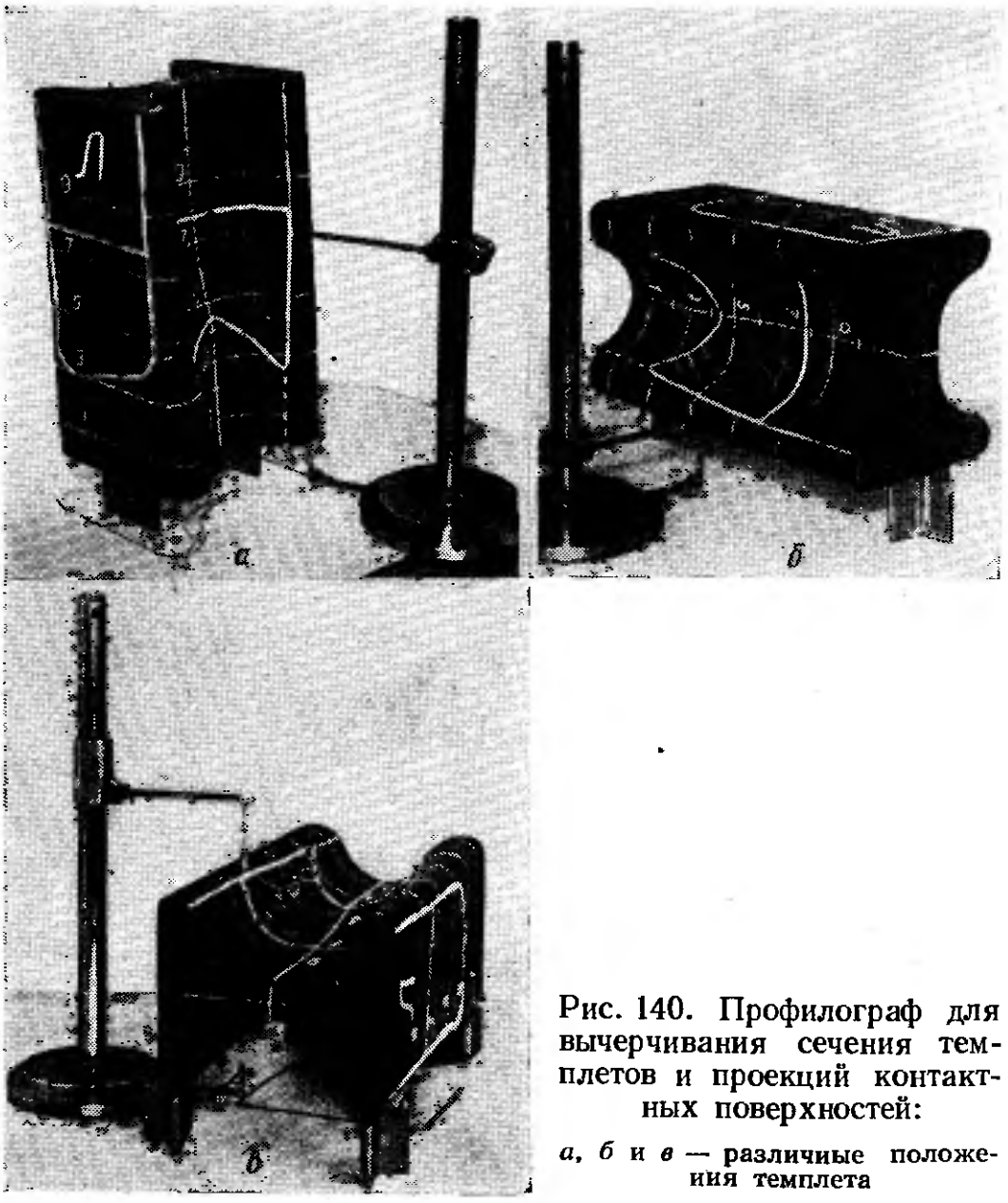



Рис. 140. Профилограф для вычерчивания сечения темплетов и проекций контактных поверхностей:

*а, б* и *в* — различные положения темплета

По профилограммам можно найти коэффициенты деформации элементов сечения. На рис. 142 приведены графики изменения дробных (от сечения к сечению) и нарастающих коэффициентов вытяжки элементов балочного профиля по длине очага деформации. Обращает на себя внимание увеличение толщины стенки в начале

очага деформации (коэффициент вытяжки меньше единицы) и резкое нарастание коэффициента для стенки в конце очага деформации. На выходе из очага деформации коэффициент вытяжки стенки близок к среднему значению коэффициента вытяжки фланцев. В рассматриваемом темплете металл в закрытых фланцах подвергся большей деформации, чем в открытых.

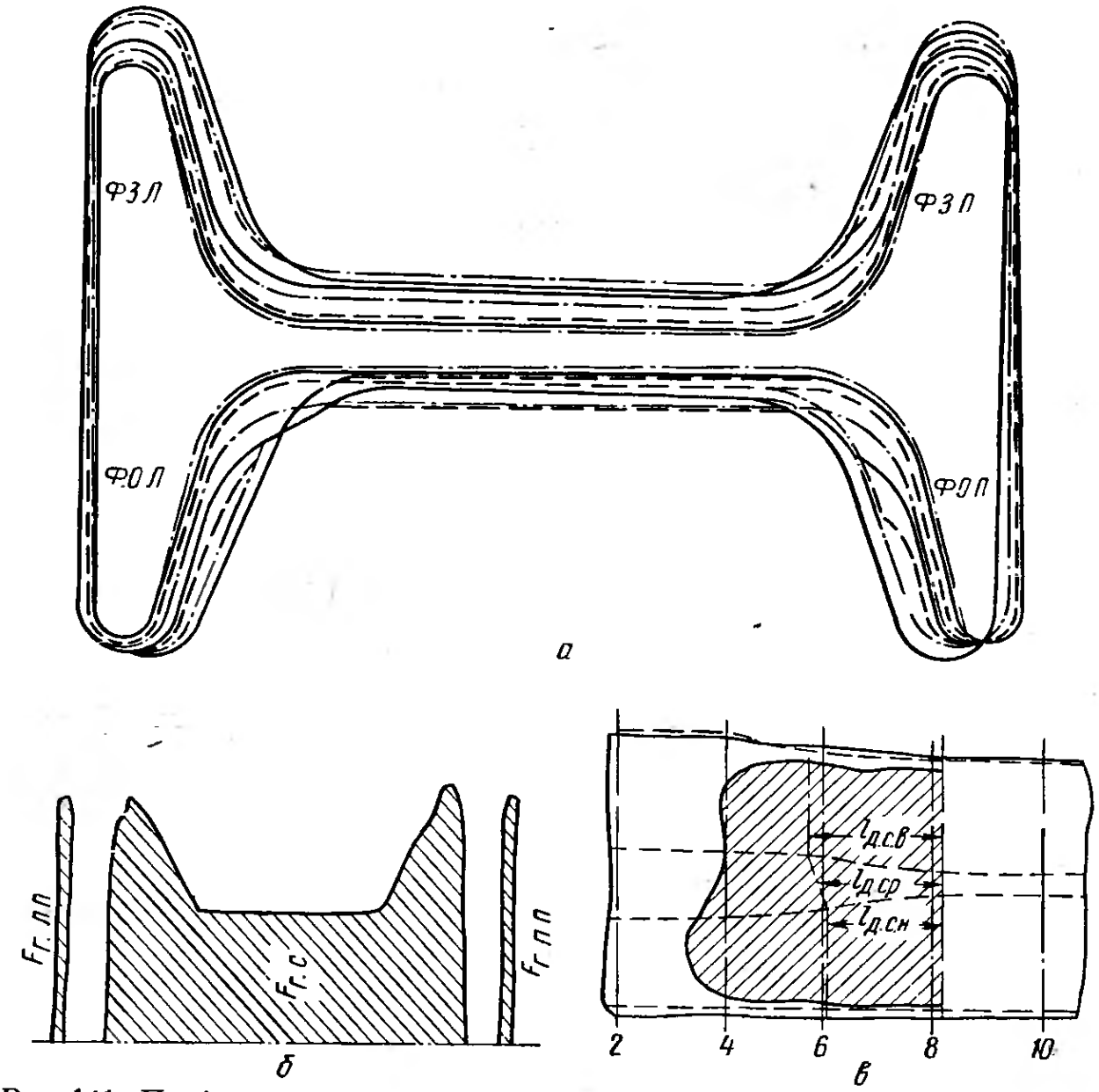



Рис. 141. Профилограммы поперечного сечения (*а*), горизонтальной (*б*) и вертикальной (*в*) проекций контактной поверхности переходного темплета:

*2—10* — различные поперечные сечения темплетов; *Ф. З. Л.* и *Ф. З. П.* — фланцы закрытые левые и правые; *Ф. О. Л.* и *Ф. О. П.* — фланцы открытые левые и правые; $F_{г.л.п}$ и $F_{г.п.п}$ — горизонтальные проекции левой и правой полки; $F_{г.с}$ — горизонтальная проекция очага деформации по стенке; $l_{д.с.в}$, $l_{д.с.н}$, $l_{д.ср}$ — значения длины очага деформации стенки по верхнему и нижнему валкам и средняя

Из анализа деформации металла в балочном калибре следует, что приращение ширины стенки происходит за счет обжатия внутренних граней фланцев; это необходимо учитывать при выборе коэффициентов вытяжки фланцев и стенки.

На рис. 143 показано наложение двух последовательно расположенных балочных калибров, на котором обозначены:

$q_i$ и $q_i'$ — площади открытого и закрытого фланцев $i$-того калибра;

$q_{i+1}$ и $q_{i+1}'$ — площади открытого и закрытого фланцев следующего по ходу прокатки калибра;

$\Delta B_{i+1}$ — уширение в последующем калибре.

Принимая два фланца (верхний и нижний) и находящийся между ними прямоугольный участок, являющийся продолжением стенки, как единый лежащий на ребро (вертикальный) полосо-

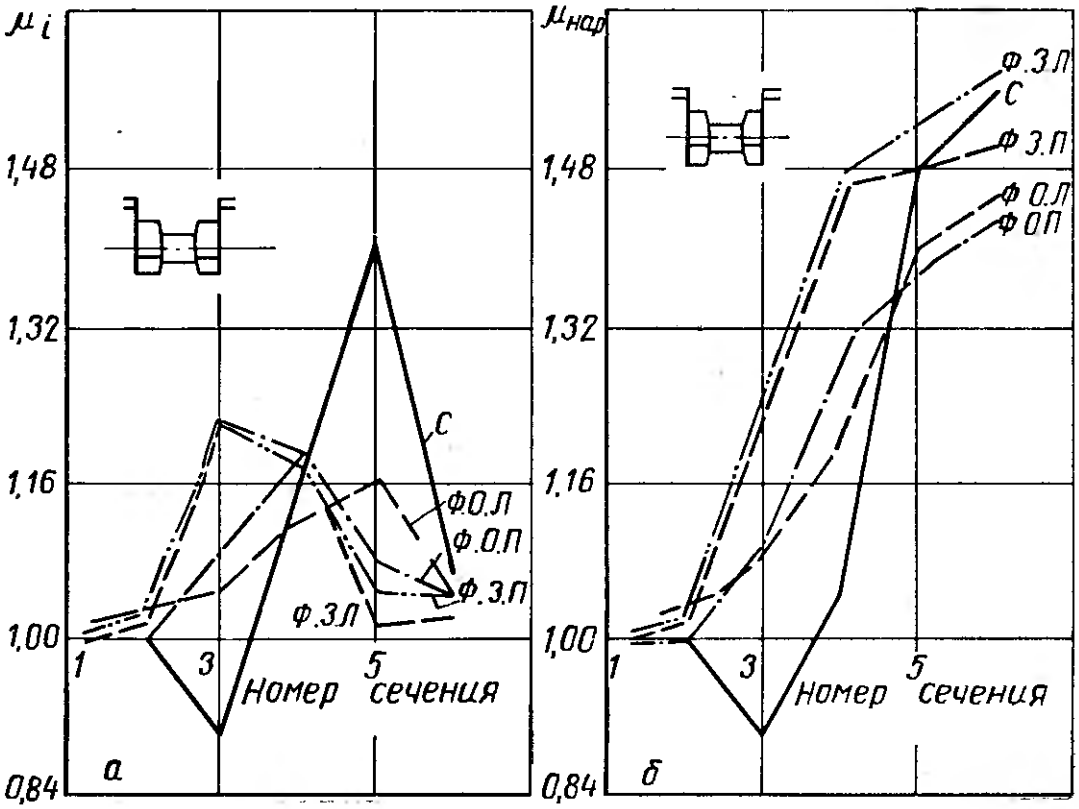



Рис. 142. Графики дробных (*а*) и нарастающих (*б*) коэффицнентов вытяжки элементов профиля двутавровой балки № 20 в третьем черновом калибре:

*С* — стенка профиля; *Ф. З. Л.* и *Ф. З. П.* — фланцы закрытые левые и правые; *Ф. О. Л.* и *Ф. О. П.* — фланцы открытые левые н правые

образный элемент, получим, по данным А. П. Чекмарева [40], коэффициент вытяжки во фланцах

$$\mu_{\text{фл } i+1} = \frac{q_i + q_i' + d_i b_i}{q_{i+1} + q_{i+1}' + d_{i+1}\left(b_i + 0{,}5\Delta B_{i+1}\right)}. \qquad (80)$$

Выражения $d_i b_i$ в числителе и $d_{i+1}\,(b_i + 0{,}5\Delta B_{i+1})$ в знаменателе являются площадями участков, служащих продолжением стенки и входящих в площадь вертикального полосообразного элемента. Как было установлено выше, заштрихованная площадь стенки $i + 1$-го калибра, входящая в знаменатель выражения, образуется из площади сечения фланцев задаваемого $i$-того раската.

Для определения коэффициента вытяжки стенки шириной $B_i - 2b_i$ необходимо взять отношение задаваемой площади к выходящей. Учитывая, что к моменту начала обжатия стенки калибр по ширине заполнен и металл стенки не может получить значительного уширения, коэффициент вытяжки можно принять как отношение задаваемой и выходящей толщин стенки:

$$\mu_{ст\,i+1} = \frac{d_i}{d_{i+1}}. \qquad (81)$$

Наименьшее перетекание металла в калибре, вызванное неравномерностью деформации в различных элементах профиля по длине очага деформации, будет наблюдаться, по-видимому, при равенстве коэффициентов вытяжки всех элементов профиля. На практике, однако, в целях лучшего заполнения фланцев в последних по ходу прокатки калибрах для стенки принимают несколько меньшие коэффициенты вытяжки, чем для фланцев. В первых по ходу прокатки калибрах, где небольшая площадь стенки может мало повлиять на утяжку фланцев, коэффициенты вытяжки для стенки принимают больше, чем для фланцев.

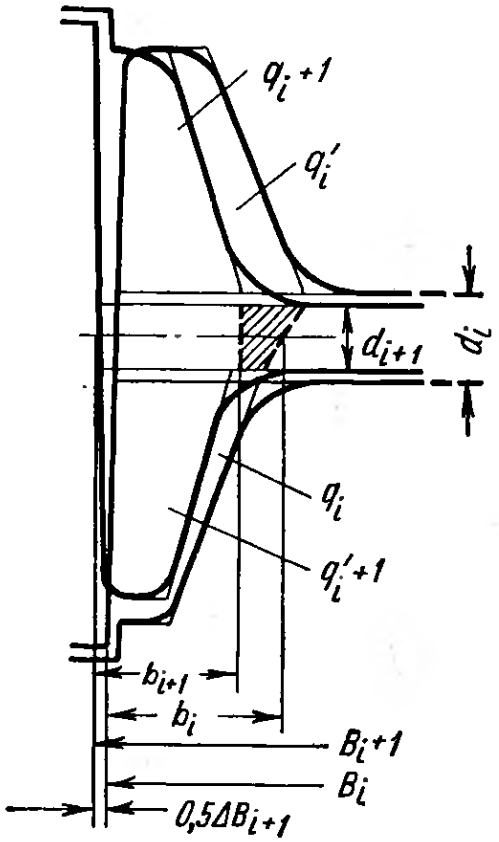



Рис. 143. Схема наложения двух последовательно расположенных балочных калибров

Обозначая соотношение коэффициентов вытяжки фланцев и стенки через $k$, на основании выражений (80) и (81) можно написать выражение для коэффициента вытяжки $i+1$-го калибра:

$$\mu_{i+1} = \frac{q_i + q_i' + d_i b_i}{q_{i+1} + q_{i+1}' + d_{i+1}\left(b_i + 0{,}5\Delta B_{i+1}\right)} = k\frac{d_i}{d_{i+1}}. \qquad (82)$$

После преобразований получили

$$d_i = \frac{d_{i+1}\left(q_i + q_i'\right)}{k\left(q_{i+1} + q_{i+1}' + 0{,}5 d_{i+1}\Delta B_{i+1}\right) - (1-k)\left(d_{i+1} b_i\right)}. \qquad (83)$$

Таким образом, получили выражение (83) для определения толщины стенки предыдущего по ходу прокатки раската. Чтобы определить толщину стенки последующего калибра, выражение (83) можно соответствующим образом преобразовать, если размеры калибров рассчитывать по ходу прокатки.

Если в первых калибрах по ходу прокатки $k < 1$, а в последних $k > 1$, то $k_{ср} \approx 1$. В этом случае коэффициент вытяжки $i + 1$-го калибра будет равен

$$\mu_{i+1} = \frac{q_i + q_i' + d_i b_i}{q_{i+1} + q_{i+1}' + d_{i+1}(b_i + 0{,}5\Delta B_{i+1})} = \frac{d_i}{d_{i+1}}, \qquad (84)$$

или после преобразований

$$\mu_{i+1} = \frac{q_i + q_i'}{q_{i+1} + q_{i+1}' + 0{,}5 d_{i+1}\Delta B_{i+1}} = \frac{d_i}{d_{i+1}}. \qquad (85)$$

Из последней формулы видно, что коэффициент вытяжки в калибре равен отношению толщин стенки $d_i/d_{i+1}$, так как уширение калибра идет за счет деформации фланцев в течение первого этапа процесса заполнения очага деформации.

Отношение площадей фланцев

$$\mu_{фл} = \frac{q_i + q_i'}{q_{i+1} + q_{i+1}'} > \mu_i,$$

т. е. коэффициент вытяжки (условный) для фланцев будет в наших расчетах несколько больше, чем коэффициент вытяжки по стенке или по всему калибру.

На основании выражения (85) определяют толщину стенки для разрезного (первого) калибра по размерам чистового $n$-го калибра и суммарного уширения от разрезного до чистового калибра:

$$d_1 = \frac{d_n (q_1 + q_1')}{(q_n + q_n') + 0{,}5 d_1 \sum_2^n \Delta B}.$$

Обычно $q_1 = q_1'$; $q_n = q_n'$.

Ниже будет показано, что размеры разрезного калибра часто приходится корректировать, увеличивая толщину стенки с целью обеспечения надежного угла захвата, поэтому коэффициент вытяжки по стенке будет больше, т. е. $k < 1$. В случае необходимости можно корректировать размеры и второго калибра, увеличивая толщину стенки калибра.

## 4. ЧИСЛО ПРОХОДОВ В ФАСОННЫХ КАЛИБРАХ

В условиях производства число проходов на стане, а следовательно, и число калибров устанавливают, исходя из совокупности конкретных условий: мощности приводного двигателя, прочности, износостойкости и длины бочки валков, температуры прокатки, условий захвата, марки стали, качества проката и т. п.

На практике число проходов для того или иного фланцевого профиля является более или менее установившимся и изменяется в сравнительно узких пределах.

На рис. 144 приведен график для выбора числа фланцевых калибров (включая разрезной) при прокатке двутавровых балок и швеллеров. По этому графику можно выбрать в указанных пределах то или иное число калибров, причем минимальной (нижней) границы очерченного поля рекомендуется придерживаться при наиболее благоприятных условиях (мощный двигатель, высокая температура прокатываемого металла, хорошее его качество и т. д.), а верхней границы — при наименее благоприятных условиях [1].

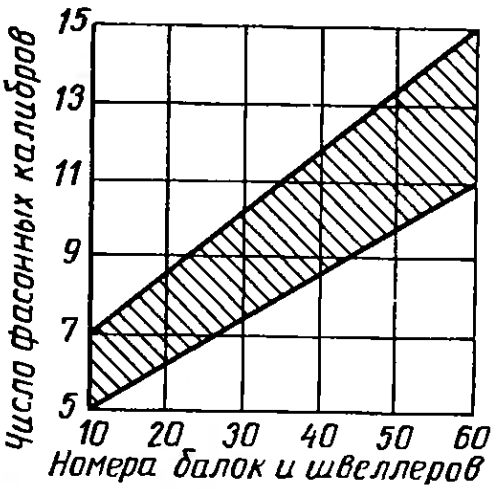



Рис. 144. График для выбора числа калибров при прокатке двутавровых балок и швеллеров

В настоящее время в связи с улучшением качества стали, а также с увеличением температуры и скорости прокатки, повышением износостойкости валков и другими факторами на многих заводах сокращают число проходов при прокатке двутавровых балок и швеллеров.

Максимальные допускаемые вытяжки необходимо выбирать, исходя из условий захвата при отсутствии закатов, подрезов и других дефектов, с учетом пластических свойств металла и характера напряженного состояния, а также износостойкости калибров.

Определение углов захвата имеет значение только для первых по ходу прокатки калибров, в которых приходится применять большие обжатия.

## 5. УШИРЕНИЕ ПРИ ПРОКАТКЕ БАЛОК

Горизонтальное уширение металла в балочных калибрах (его иногда неправильно называют уширением стенки) оказывает большое влияние на заполнение калибра и, следовательно, на формирование и выполнение профиля.

Анализ переходных темплетов, полученных при прокатке двутавровых балок, показал, что уширение металла по длине очага деформации изменяется неравномерно и процесс этот можно разбить в общем случае на четыре стадии:

1) внеконтактная поперечная деформация, происходящая главным образом за счет отгибания фланцев (в разрезном калибре

[1] Можно пользоваться также табл. 69.

внеконтактное уширение достигает 48% от общего уширения в калибре);

2) интенсивное уширение за счет обжатия фланцев и растяжения стенки;

3) продолжение уширения до соприкосновения металла с боковыми стенками калибра под действием обжатия стенки профиля;

4) боковое обжатие («отрицательное уширение») профиля боковыми стенками калибра (по мере сближения валков ширина калибра уменьшается за счет выпусков).

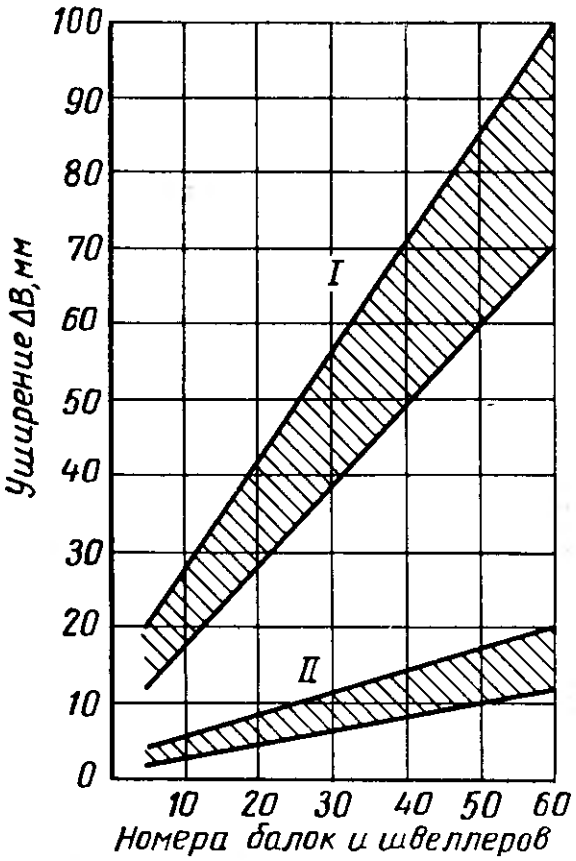



Рис. 145. График для выбора величины уширения в двутавровых и швеллерных калибрах:

*I* — суммарное уширение во всех калибрах, кроме разрезного; *II* — уширение в разрезном калибре

Практика показала, что это уширение может изменяться в весьма широких пределах при достаточно удовлетворительных результатах работы прокатного стана. При сильном ограничении уширения будет наблюдаться несколько большее увеличение высоты открытого фланца и меньшая утяжка закрытого фланца.

На основании данных хорошо работающих калибровок выбор уширения в фланцевых калибрах для прокатки двутавровых балок и швеллеров можно рекомендовать в соответствии с графиком, приведенном на рис. 145.

В закрытом калибре уширение металла ограничено, и для лучшего заполнения фланцев его выбирают обычно небольшим. В полузакрытом калибре значительного ограничения уширения нельзя достичь из-за возможности вытекания металла в зазор, расположенный в середине высоты калибра. Эти особенности конструкции разрезных калибров сказываются на том, что при одних и тех же их размерах для открытого калибра требуется заготовка меньшей ширины, но большей высоты, чем для закрытого.

Б. П. Бахтинов и М. М. Штернов рекомендуют определять уширение в балочных калибрах по формуле [2]:

$$\Delta b_n = 0{,}01B + (n - 1), \qquad (86)$$

где $\Delta b_n$ — уширение в данном калибре;

$n$ — номер калибра (против хода прокатки);

$B$ — ширина чистового калибра.

Авторы работы [7] предлагают рассчитывать уширение во фланцевых калибрах по следующей формуле:

$$\Delta b_n = c + \frac{n-1}{2}, \qquad (87)$$

где $\Delta b_n$ — уширение в данном калибре;
$n$ — номер прохода (против хода прокатки);
$c$ — уширение в чистовом калибре (по табл. 67).

На практике при прокатке двутавровых балок на различных заводах применяют различные значения уширения. Так, в чистовом калибре уширение изменяется от 1,0 *мм* при прокатке балки № 12 на зигзагообразном стане 500 до 4,5 *мм* при прокатке балки № 55 на рельсобалочном стане 800. Суммарное уширение в этом случае изменяется соответственно в пределах 12,5—49 *мм*.

Таблица 67

**Уширение в чистовом калибре**

| Номер балки | Величина $c$, *мм*, при прокатке стали | |
|---|---|---|
| | низкоуглеродистой | высокоуглеродистой и легированной |
| 10—14 | 1,5 | 0,75—1,0 |
| 18—24 | 2,0—2,5 | 1,25—1,5 |
| 27—40 | 2,5—3,0 | 1,5—2,0 |
| 45—60 | 3,0—4,0 | 2,0—2,5 |

Иногда, в случае необходимости, в отдельных калибрах применяют отрицательное уширение, т. е. прокатка протекает с защемлением. В этом случае наблюдается повышенный износ калибров. Однако, по данным И. А. Шарапова [1], при работе двух черновых калибров балки № 14 с защемлением в пределах 13—17 *мм* стойкость их довольно высока и составляет в среднем 5000—6000 *т* между переточками. Эти калибры были врезаны в стальные валки, что улучшило условия захвата и позволило восстанавливать ширину калибра наплавкой.

Известную трудность представляет определение уширения при прокатке двутавровых балок в сопряженных калибрах на станах линейного типа, состоящих из рабочих клетей трио. Обычно уширение дают в первом из двух сопряженных калибров. Во втором калибре, имеющем общий с первым средний ручей, уширение давать нельзя. В результате этого увеличивается расход энергии и снижается стойкость калибров. В этом случае рекомендуется для изменения ширины полосы несколько уменьшать уклон открытого фланца второго калибра [2].

## 6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УТЯЖКИ, ПРИРАЩЕНИЯ ВЫСОТЫ И ТОЛЩИНЫ ФЛАНЦЕВ

Высота калибра двутавровой балки в открытых и закрытых фланцах изменяется различно. Обычно в закрытых фланцах высота

[1] И. А. Шарапов. Сталь, 1965, № 3, с. 253.

уменьшается, происходит утяжка металла. В открытых фланцах высота, как правило, увеличивается. Утяжка и приращение высоты зависят от сочетания многих факторов: соотношения обжатий и коэффициентов вытяжки фланцев и стенки, величины выпусков калибра и т. д. В отдельных случаях на практике наблюдается нулевое и даже отрицательное приращение в открытом фланце.

Для определения удлинения и утяжки фланцев в балочных калибрах можно пользоваться различными методами и формулами, учитывающими влияние скоростных факторов прокатки и защемляющего действия закрытого фланца, но не учитывающими степень ограничения горизонтального уширения в калибре. Поэтому в настоящее время приходится руководствоваться практическими данными: утяжку в закрытых фланцах принимают в пределах 5—8 *мм*, а приращение высоты открытых фланцев — в пределах 0—2 *мм* (большие значения для больших номеров балок).

Для определения размеров фланцев, а именно толщины фланца у основания $b$ и у конца $a$, существуют различные методы. В наших расчетах при определении размеров открытых фланцев будем пользоваться точкой $K$, представляющей собой точку пересечения образующих внутренних граней открытых фланцев (рис. 146, *а*). Оставляя координаты этой точки неизменными, находим уклоны внутренних граней открытых фланцев, что позволяет определить толщину фланцев у основания и у края.

При определении размеров закрытых фланцев будем исходить из размеров открытых фланцев с тем, чтобы при задаче открытого фланца в закрытый было небольшое защемление в первых по ходу прокатки калибрах, а в последних калибрах открытый фланец должен свободно заходить в закрытый.

Ниже рассмотрено определение положения точки $K$. Как видно из рис. 146, *а*, открытые фланцы чистового и разрезного калибров накладывают так, чтобы наружные грани и основания их совпадали (без учета закруглений). Наружные грани и основания фланцев являются началом отсчета при определении положения точки $K$.

Размеры открытого фланца чистового калибра известны, размеры первого разрезного калибра определяем по принятым значениям утяжки и приращения высоты в калибрах и выбранным размерам $b_1$ и $a_1$, о чем будет сказано несколько ниже.

Итак, пересечение внутренних граней открытых фланцев последнего чистового и первого разрезного калибров дает точку $K$, расстояние которой от основания равно

$$H_K = \frac{e + b_n}{\operatorname{tg} \varphi_n} = \frac{e + b_1}{\operatorname{tg} \varphi_1},$$

где $e$ — расстояние точки $K$ от наружной грани фланцев;
$\operatorname{tg}\varphi_n$ и $\operatorname{tg}\varphi_1$ — тангенсы углов наклона внутренних граней фланцев чистового и разрезного калибров;
$b_n$ и $b_1$ — толщина фланцев у основания чистового и разрезного калибров.

Находим величину $e$:

$$e = \frac{b_1 \operatorname{tg}\varphi_n - b_n \operatorname{tg}\varphi_1}{\operatorname{tg}\varphi_1 - \operatorname{tg}\varphi_n},$$

где

$$\operatorname{tg}\varphi_n = \frac{b_n - a_n}{h_n}; \quad \operatorname{tg}\varphi_1 = \frac{b_1 - a_1}{h_1}.$$

Зная величину $e$, находим значение $H_K$.

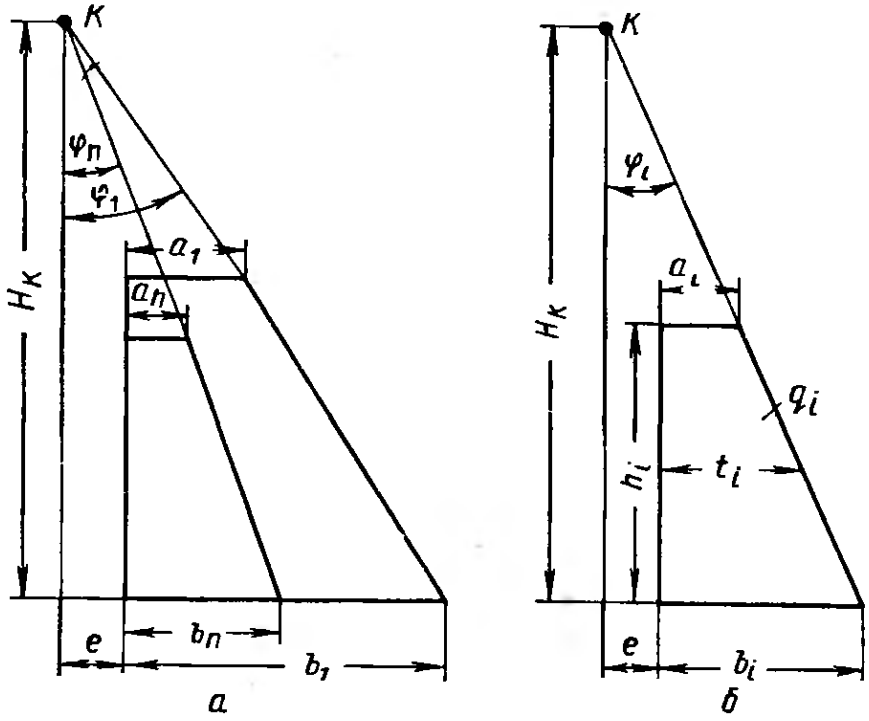



Рис. 146. К определению размеров фланцев

Высоту фланцев чистового калибра $h_n$ принимаем по размерам готового профиля с учетом температурного расширения и минимальных допусков.

Для определения высоты открытых фланцев разрезного калибра необходимо предварительно установить число фасонных калибров и выбрать утяжку $\Delta h_{ут}$ и приращение высоты $\Delta h_{пр}$ для закрытых и открытых фланцев.

Тогда высота открытых фланцев разрезного калибра будет равна

$$h_1 = h_n + \sum \Delta h_{ут} - \sum \Delta h_{пр},$$

где $\sum \Delta h_{ут}$ — общая утяжка высоты закрытых фланцев;
$\sum \Delta h_{пр}$ — общее приращение высоты открытых фланцев.

Для открытых фланцев разрезного калибра необходимо также определить толщину фланца у основания $b_1$ и у конца $a_1$. На основе практических данных величина $b_1$ составляет

$$b_1 = (0{,}35 \div 0{,}45)\, B_1,$$

где $B_1$ — ширина разрезного калибра.
Толщину фланца у края разрезного калибра можно принять

$$a_1 = (0{,}45 \div 0{,}5)\, b_1.$$

Для определения размеров открытых и закрытых фланцев необходимо прежде всего по выбранным коэффициентам вытяжки найти площади открытых и закрытых фланцев.

Общий коэффициент вытяжки фланцев (условный) от разрезного к чистовому составляет

$$\sum_{2}^{n} \mu_{фл} = \frac{q_1}{q_n} = \mu_{фл_2}\mu_{фл_3} \cdot \cdot \cdot \mu_{фл\,(n-1)}\mu_{фл\,n}.$$

Коэффициенты вытяжки по отдельным фланцам нетрудно подобрать.

В первых калибрах коэффициент вытяжки составляет $\mu_{фл} \approx \approx 1{,}45 \div 1{,}5$, постепенно снижаясь до $\mu_{фл\,(n-1)} = 1{,}20—1{,}25$ в предчистовом калибре и $\mu_{фл n} = 1{,}08—1{,}15$ в последнем, чистовом калибре. Зная коэффициенты вытяжки для фланцев, находим площади фланцев $q_1, q_2, \ldots, q_n$ по отдельным калибрам.

Тогда размеры открытых фланцев промежуточных калибров определяем по формулам, полученным на основании координат точки $K$.

Средняя толщина открытого фланца

$$t_i = \frac{q_i}{h_i}.$$

Тангенс угла наклона внутренней грани открытого фланца (рис. 146, *б*)

$$\operatorname{tg} \varphi_i = \frac{0{,}5t_i + e}{H_K - 0{,}5h_i}.$$

Толщина фланца у основания

$$b_i = H_K \operatorname{tg} \varphi_i - e.$$

Толщина фланца у конца

$$a_i = (H_K - h_i) \operatorname{tg} \varphi_i - e$$

или

$$a_i = 2t_i - b_i.$$

Перейдем теперь к определению размеров закрытых фланцев. При задаче открытого фланца в закрытый необходимо обеспечить свободный вход металла, чтобы обеспечить заполнение закрытого фланца по высоте.

В первых по ходу прокатки калибрах допускается небольшое защемление металла так, что на концах фланцев допускается

$$\frac{a_i}{a'_{i+1}} \approx 1{,}15,$$

где $a'_{i+1}$ — толщина у конца закрытого фланца в $i + 1$-м калибре

В последующих калибрах степень защемления должна уменьшаться, а в последних двух калибрах необходимо обеспечить свободный вход металла в закрытый фланец так, чтобы

$$\frac{a_i}{a'_{i+1}} \approx 0{,}95.$$

Таким образом, при определении толщины у конца закрытых фланцев следует установить коэффициенты деформации по калибрам в пределах

$$\frac{a_i}{a'_{i+1}} = 1{,}15 \div 0{,}95,$$

на основании чего можно определить все размеры закрытых фланцев. Если

$$a'_{i+1} = \frac{a_i}{1{,}15 \div 0{,}95},$$

то

$$b'_{i+1} = 2t'_{i+1} - a'_{i+1},$$

где $t'_{i+1} = \frac{q'_{i+1}}{h'_{i+1}}$ — средняя толщина закрытого фланца.

Следует также проверить, чтобы не было большого защемления и у основания закрытого фланца.

Можно допускать степень деформации у основания закрытого фланца в пределах:

$$\frac{b_i}{b'_{i+1}} \approx 1{,}35 \div 1{,}3 \text{ в первых калибрах}$$

и

$$\frac{b_i}{b'_{i+1}} \approx 1{,}05 \div 1 \text{ в последних.}$$

## 7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРОВ РАЗРЕЗНЫХ КАЛИБРОВ И ИСХОДНОЙ ЗАГОТОВКИ

В зависимости от условий захвата выбирают ту или иную конструкцию разрезного калибра. Как указывалось выше, по способу среза в валки разрезные калибры бывают с разъемом посередине (открытые, рис. 147, *а* и *в*) и с разъемом у концов фланцев (закрытые, рис. 147, *б*).

Закрытые калибры характеризуются большой глубиной среза закрытого ручья, и поэтому их применяют на станах с валками достаточно большого диаметра. В калибрах этого типа можно вести прокатку со значительным стеснением, что способствует получению высоких фланцев.

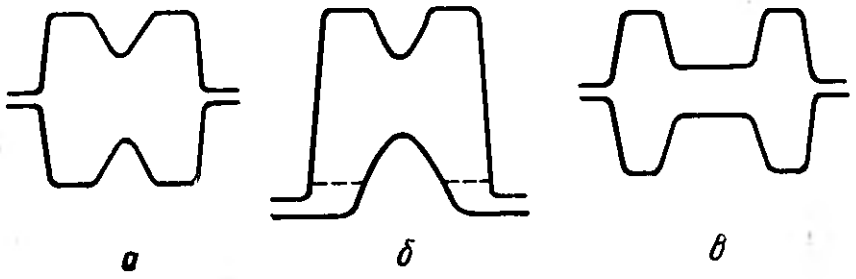



Рис. 147. Форма разрезных калибров:
*а* — открытый; *б* — закрытый; *в* — открытый (на валках блюмнига)

Разрезные калибры открытого типа применяют в тех случаях, когда из условия прочности нельзя врезать в валки глубокие ручьи. Подобные калибры специфической формы (с большими тупыми разрезающими гребнями) применяют на валках блюминга или на валках обжимной клети 900 для получения фасонной заготовки при прокатке двутавровых балок крупных номеров (рис. 147, *в*). Валки с открытыми разрезными калибрами имеют одинаковые начальные диаметры.

Условиями захвата определяется выбор формы разрезающего гребня. На некоторых заводах при прокатке балок мелких номеров для разрезки заготовок используют так называемые тупые гребни. Применение тупых гребней позволяет увеличить коэффициент вытяжки в разрезном калибре и сократить общее число проходов. Необходимо отметить, что применение тупых гребней вызывает повышенную утяжку фланцев, поэтому высоту заготовки увеличивают.

При невозможности из-за условий захвата получения нужной для прокатки балки заготовки в одном калибре применяют разрезку в двух разрезных калибрах сортового стана или предусматривают получение разрезанной фасонной заготовки с блюминга или заготовочного стана.

Высокая температура металла позволяет иметь в разрезном калибре максимально возможное обжатие. С другой стороны,

большая деформация позволяет из прямоугольной начальной заготовки быстрее получить фасонный черновой профиль как первое приближение к конечному двутавровому профилю. Поэтому форму и размеры разрезного калибра необходимо выбирать с учетом размеров готового профиля и максимальной деформации. Максимальную деформацию определяют из условия захвата в начальный момент гребнями валков, на которые обычно наносят насечку для увеличения допускаемого угла захвата до 35—38° (при небольшой скорости захвата). Условия захвата улучшаются также из-за утолщения стенки при удачно выбранных закруглениях мест перехода фланцев в стенку.

Б. П. Бахтинов [2] считает, что захват металла валками становится затруднительным или даже невозможным, если суммарная высота разрезных клиньев плюс величина обжатия фланцев по высоте превышают одну пятую диаметра валков с разрезным калибром:

$$\sum H_{\text{р. кл}} + \Delta h_{\text{р}} \leqslant \frac{1}{5} D.$$

Соответствующий угол захвата, рассчитанный по вершинам гребней разрезного калибра, равен

$$\alpha = \frac{180}{\pi} \sqrt{\frac{\Delta h}{R}} = \frac{180}{3{,}14} \sqrt{\frac{\frac{1}{5} D}{\frac{1}{2} D}} = \frac{180}{3{,}14} \sqrt{\frac{2}{5}} = 36°.$$

В дальнейшем будем принимать угол захвата $\alpha$ в пределах 33—35°. Иногда угол захвата рассчитывают по средней величине обжатия в калибре, что соответствует не начальному моменту, а установившемуся процессу прокатки при

$$\Delta h_{\text{ср}} = H_0 - H_{\text{ср}} = H_0 - \frac{q_{\text{р}}}{B_{\text{р}}},$$

где $H_0$ — высота заготовки, задаваемой в разрезной калибр;
$q_{\text{р}}$ — площадь разрезного калибра;
$B_{\text{р}}$ — ширина разрезного калибра.

В этом случае максимальный угол захвата при прокатке на стальных валках не должен превышать 24—25°.

Выбирая форму и размеры разрезного калибра, исходят из его ширины и расчетных значений высоты открытого и закрытого фланцев и толщины стенки. Для определения толщины фланцев сначала задаются размером нижнего их основания. Для крупных балок толщину нижнего основания принимают около половины ширины калибра (0,40—0,50), для балок малых размеров толщину нижнего основания фланца выбирают меньше половины ширины калибра (0,35—0,45).

Для выбора уширения в закрытом и открытом разрезных калибрах можно использовать график, приведенный на рис. 145. Зная уширение, определяют ширину заготовки $B_0$, затем определяют высоту заготовки с обязательным учетом утяжки высоты фланцев, вызванной неравномерной даформацией металла в разрезном калибре. Обозначим через $H_0$ высоту заготовки (рис. 148), необходимую для заполнения разрезного калибра высотой $H_р$. Условно разделим заготовку вертикальными сечениями на три части: две крайних шириной $B_a$ и среднюю — шириной $B_0 — 2B_a$. Размер $B_a$ выбирают так, чтобы металл средней части заготовки шел на образование средней части раската, выходящего из разрезного калибра, шириной $B_р — 2a_р$, металл крайних частей соответственно образует два крайних вертикальных прямоугольника шириной $a_р$ и высотой $H_р$. При этом условии коэффициенты вытяжки частей одинаковы:

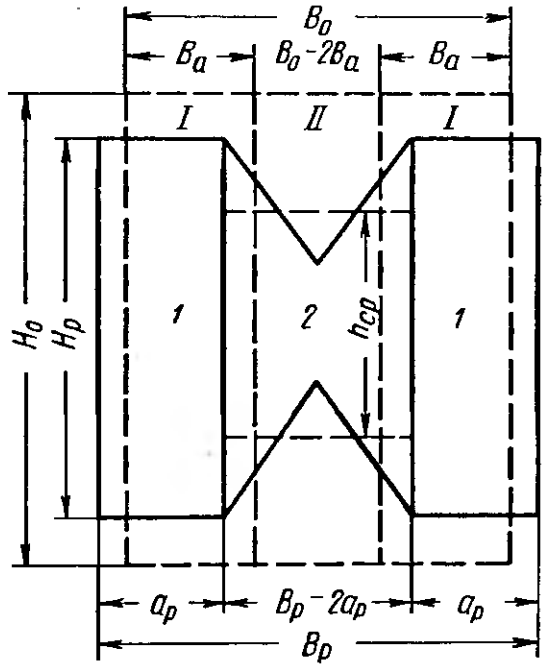


Рис. 148. К определению размеров заготовки

$$\frac{H_0 B_a}{H_р a_р} = \frac{H_0 (B_0 — 2B_a)}{h_{ср} (B_р — 2a_р)},$$

откуда

$$B_a = \frac{H_р a_р B_0}{B_р h_{ср} + 2a_р (H_р — h_{ср})}, \qquad (88)$$

где $h_{ср}$ — средняя высота средней части разрезного калибра.

Естественная (частная) вытяжка средней части заготовки больше, чем вытяжка крайних частей, которые подвергаются утяжке (принудительной вытяжке). Примем, что утяжка одинакова по высоте и ширине полок, т. е.

$$\frac{H_0}{H_р} = \frac{B_a}{a_р},$$

откуда

$$H_0 = \frac{B_a H_р}{a_р}. \qquad (89)$$

Подставив выражение (88) в формулу (89), получили

$$H_0 = \frac{H_р^2 B_0}{B_р h_{ср} + 2a_р (H_р — h_{ср})}. \qquad (90)$$

Знаменатель выражения (90) представляет собой площадь сечения разрезного калибра $q_р$. В итоге получаем формулу А. П. Чекмарева [40]:

$$H_0 = \frac{H_р^2 B_0}{q_р}, \tag{91}$$

по которой можно рассчитать минимально необходимую высоту заготовки при свободном (или близком к свободному) уширении. Такой метод определения высоты заготовки пригоден для разрезного открытого или закрытого калибров с большим простором на уширение.

Выразим коэффициент вытяжки через размеры крайних полос до и после прокатки:

$$\mu = \frac{H_0 B_a}{H_р a_р}. \tag{92}$$

Учитывая условие (89), определяем коэффициент утяжки высоты фланцев в калибре

$$k_у = \frac{H_0}{H_р} = \sqrt{\mu}. \tag{93}$$

Формулой (93) можно пользоваться для определения высоты фланцев в открытом разрезном калибре блюминга при нескольких проходах в одном калибре с опусканием верхнего валка.

Поскольку

$$\mu = \frac{H_0 B_0}{q_р},$$

имеем

$$H_0 = H_р \sqrt{\frac{H_0 B_0}{q_р}},$$

откуда получим формулу (91).

Такой вывод формулы (91) приводит М. С. Мутьев в работе [5].

Определим теперь высоту заготовки для закрытого разрезного калибра (рис. 148). На основании экспериментальных данных можно принять, что в начале очага деформации разрезающие гребни, проникая на небольшую глубину в заготовку, оттесняют без вытяжки обжимаемый металл в стороны до соприкосновения с боковыми стенками калибра. Поэтому можно записать

$$q' = H_0 (B_р - B_0). \tag{94}$$

При дальнейшем внедрении гребней валков в заготовку происходит только вытяжка металла, так как калибр заполнен по

ширине. Тогда коэффициент естественной вытяжки средней части будет равен

$$\mu_2 = \frac{H_0 (B_\text{р} - 2a) - H_0 (B_\text{р} - B_0)}{q_\text{р} - 2H_\text{р}a_\text{р}} = \frac{H_0 (B_0 - 2a_\text{р})}{q_\text{р} - 2H_\text{р}a_\text{р}}. \quad (95)$$

Общая (усредненная) вытяжка в калибре равна

$$\mu_\text{ср} = \frac{2\mu_1 p_1 + \mu_2 q_2}{2q_1 + q_2} = \frac{H_0 B_0}{q_\text{р}}, \quad (96)$$

где $\mu_1$, $\mu_2$ и $q_1$, $q_2$ — коэффициенты естественной вытяжки и площади фланцев (включая участок стенки между ними) и стенки (см. рис. 148).

При свободном уширении вследствие выравнивания вытяжки из стенки во фланцы перетекает следующее количество металла:

$$\Delta q = q_2 \left(\frac{\mu_2}{\mu_\text{ср}} - 1\right). \quad (97)$$

Подставляя значения $\mu_2$ и $\mu_\text{ср}$, рассчитанные по формулам (92) и (93), в выражение (94), получим:

$$\Delta q = (q_\text{р} - 2H_\text{р}a_\text{р}) \left[\frac{H_0 (B_0 - 2a_\text{р}) q_\text{р}}{(q_\text{р} - 2H_\text{р}a_\text{р}) H_0 B_0} - 1\right] = \frac{2a_\text{р} (B_0 H_\text{р} - |q_\text{р})}{B_0}. \quad (98)$$

При внедрении разрезающего гребня в заготовку за счет бокового обжатия из стенки во фланцы перетекает следующее количество металла:

$$\Delta q_\text{фл} = k\Delta q = \frac{H_\text{р} - d_\text{ст}}{(H_\text{р} - d_\text{ст}) + (B_\text{р} - 2a_\text{р})} \Delta q. \quad (99)$$

Здесь коэффициент формы гребня $k$ представляет собой отношение длины вертикальной проекции образующей гребня к сумме длин вертикальной и горизонтальной проекции образующей. Это отношение, характеризующее степень наклона гребней, позволяет учесть количество металла, поступающего из средней части заготовки во фланцы. Перетекающий металл частично компенсирует утяжку высоты и ширины фланцев, подвергающихся принудительно вытяжке от $\mu_1$ до $\mu_\text{ср}$. Принимая во мнимание выражение (93), согласно которому половина перетекающего металла идет на компенсацию поперечной утяжки, а половина — на компенсацию высотной деформации фланцев, количество металла, идущего на приращение высоты фланцев, определяем по формуле

$$\Delta q'_\text{фл} = 0{,}5k\Delta q.$$

Происходящее за счет этого изменение высоты полного фланца равно

$$\Delta h_\text{фл} = \frac{0{,}5k\Delta q}{4a_\text{р}}. \quad (100)$$

Таким образом, высота заготовки для закрытого разрезного калибра равна

$$H_{\text{р}} = H'_{\text{р}} + 2\Delta h_{\text{фл}} = \frac{H_0}{\sqrt{\mu}} + 2\Delta h_{\text{фл}}, \qquad (101)$$

где $H'_{\text{р}}$ — высота металла в разрезном калибре со свободным уширением

Из выражений (100) и (101) имеем

$$H_0 = H_{\text{р}} \sqrt{\frac{B_0 H_0}{q_{\text{р}}}} - \sqrt{\frac{B_0 H_0}{q_{\text{р}}}} \left(\frac{0{,}25k\Delta q}{a_{\text{р}}}\right),$$

откуда минимальная высота заготовки, по данным А. П. Чекмарева [40], равна

$$H_0 = \frac{B_0}{q_{\text{р}}} \left(H_{\text{р}} - \frac{0{,}25k\Delta q}{a_{\text{р}}}\right)^2, \qquad (102)$$

где $k$ и $\Delta q$ определяем из выражений (98) и (99).

В своем выводе М. С. Мутьев [5] дает также упрощенную формулу для определения высоты исходной заготовки:

$$H_0 = 0{,}5H_{\text{р}} + 0{,}5\frac{B_0 H_{\text{р}}^2}{Q_{\text{р}}}. \qquad (103)$$

Ниже в примерном расчете калибровки двутавровой балки № 24 будет использована изложенная методика калибровки.

На практике для прокатки двутавровых балок № 10—40 обычно применяют заготовки прямоугольного или квадратного сечения, поступающие с заготовочного стана или блюминга. Заготовку задают непосредственно в разрезной калибр или сначала ее прокатывают в ящичных калибрах до требуемого сечения. Только на зигзагообразных станах 500 для балок № 12—16 применяют фасонные заготовки черновой балочной формы, чтобы не увеличивать числа фасонных калибров.

Размеры задаваемой в разрезной калибр заготовки зависят от номера балки и изменяются в пределах от 155×90 *мм* для балки № 10 до 320×320 *мм* для балки № 40.

Для двутавровых балок от № 45 и выше на всех заводах используют фасонные двутавровые заготовки, поступающие с блюминга. В табл. 68 приведены размеры применяемых заготовок.

Фасонную заготовку получают за один проход в открытом разрезном калибре с разъемом по середине. Гребни этого калибра выполняют острыми.

На блюминге балочную заготовку получают за несколько проходов в разрезном калибре также открытого типа с разъемом посередине, но гребни делают тупыми, что связано с большой высотой балок.

Таблица 68

**Размеры заготовок для прокатки двутавровых балок**

| Номер балки | Размеры заготовки, *мм* | | | Размеры заготовки перед разрезным калибром, *мм* | | | Ширина полки балки, *мм* | Отношение высоты заготовки к ширине полки |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | общая высота | высота стеики | ширина | общая высота | высота стеики | ширина | | |
| 10 | 120 | — | 140 | 155 | — | 90 | 55 | 2,82 |
| 12 | 170 | — | 170 | 155 | — | 92 | 64 | 2,42 |
| 14 | 175 | 70 | 125 | 150 | 70 | 100 | 64 | 2,75 |
| 14 | 180 | 90 | 133 | 180 | 90 | 133 | 73 | 2,47 |
| 14 | 210 | — | 280 | 235 | — | 120 | 81 | 2,90 |
| 16 | 190 | 98 | 133 | 190 | 98 | 133 | 81 | 2,35 |
| 16 | 250 | — | 250 | 270 | — | 175 | 81 | 3,33 |
| 18 | 230 | — | 280 | 300 | — | 185 | 90 | 3,34 |
| 20 | 330 | — | 320 | 340 | — | 200 | 100 | 3,40 |
| 22 | 250 | — | 250 | 270 | — | 170 | 110 | 2,46 |
| 24 | 250 | — | 250 | 270 | — | 170 | 115 | 2,35 |
| 27 | 320 | — | 240 | 320 | — | 240 | 125 | 2,56 |
| 27 | 330 | — | 320 | 340 | — | 220 | 135 | 2,52 |
| 30 | 320 | — | 240 | 320 | — | 240 | 135 | 2,37 |
| 36 | 300 | — | 300 | 300 | — | 300 | 145 | 2,07 |
| 40 | 320 | — | 320 | 320 | — | 320 | 155 | 2,06 |
| 45 | 310 | 80 | 380 | 310 | 80 | 380 | 160 | 1,94 |
| 45 | 325 | 105 | 450 | 330 | 110 | 360 | 160 | 2,07 |
| 50 | 335 | 125 | 380 | 335 | 125 | 380 | 170 | 1,97 |
| 50 | 335 | 95 | 480 | 335 | 95 | 480 | 180 | 1,86 |
| 55 | 325 | 105 | 450 | 325 | 105 | 450 | 180 | 1,80 |

## 8. КОНСТРУИРОВАНИЕ И РАСПОЛОЖЕНИЕ КАЛИБРОВ НА ВАЛКАХ

Опыт прокатки крупных двутавровых балок в калибрах с малым выпуском показал, что прямая балочная система калибровки валков не дает положительных результатов из-за невозможности применения больших боковых обжатий в открытых фланцах, неустойчивости размеров профиля и ухудшения всех основных технико-экономических показателей работы стана. Поэтому совершенствование черновых балочных калибров проходило путем увеличения выпуска открытых фланцев с 2—4 до 12%.

Развертывание калибра, как правило, сочетается с изгибом стенки, причем между наружной гранью фланцев и стенкой сохраняется прямой угол. Величина развертывания калибра с изгибом стенки зависит от уклона внутренней грани фланца и для двутавровых балок может достигать 12%. Развертывание калибра получают также путем отгиба одних открытых фланцев без изгиба стенки.

Благодаря развернутой форме калибра при ремонте валков полностью восстанавливаются первоначальные размеры калибра,

а допустимое число переточек увеличивается в 1,5 раза. Диаметр открытого валка в наиболее опасном сечении также увеличивается, что повышает его механическую прочность. Заклинивание металла в калибре уменьшается, что снижает расход энергии и облегчает работу проводок и, следовательно, устраняет причину их выбивания и окова валков полосою.

В настоящее время для прокатки двутавровых балок наибольшее распространение получили черновые калибры с изгибом стенки и одинаковым выпуском открытых и закрытых фланцев в пределах 5—10% (рис. 149, *а*).

Хорошие результаты получены также при прокатке в калибрах, имеющих изгиб стенки и фланцев. При этом выпуск закрытых фланцев равен 2—3%, т. е. такой же, как и у обычных балок, а выпуск открытых фланцев увеличивают до 10% (рис. 149, *б*). В этих калибрах можно достичь наибольшей величины выпуска и, следовательно, бокового обжатия, так как разворот калибра происходит не только за счет изгиба стенки, но и фланцев.

Значительно реже применяют черновые калибры с прямой стенкой, при уклоне закрытых фланцев в пределах 2—3% и увеличенном (до 12%) выпуске открытых фланцев (рис. 149, *в*). Здесь разворот калибра осуществляется только за счет изгиба фланцев.

Черновые калибры старой формы, с прямой стенкой (рис. 149, *г*), в настоящее время применяют только при прокатке балок № 10 и 55.

Калибры, косо (наклонно) расположенные в валках (см. рис. 149, *д*), применяющиеся на ряде зарубежных заводов для прокатки облегченных двутавровых балок, до сих пор не нашли широкого применения в отечественной практике, несмотря на ряд существенных их преимуществ. Одной из причин отказа от этой системы калибровки является низкая стойкость рабочих конусов стальных валков, вызванная большими осевыми усилиями при про-

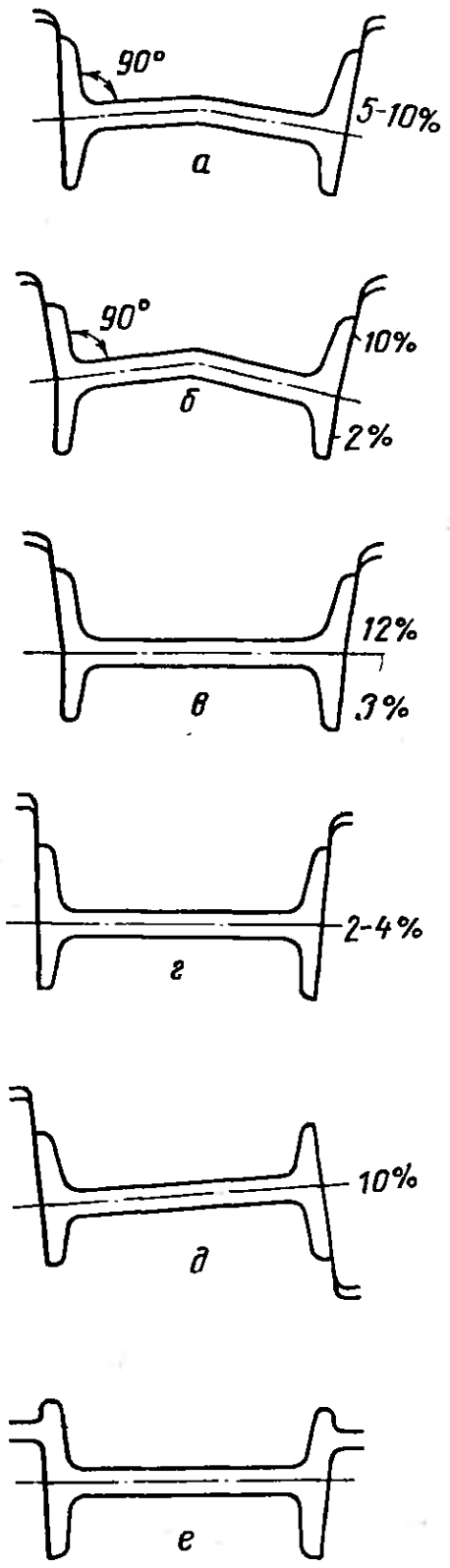



Рис. 149. Форма черновых и предчистовых калибров для прокатки двутавровых балок

катке. Это приводит к быстрому изменению размеров фланцев и соотношения между деформациями элементов профиля. Применение чугунных валков или закалка рабочих конусов стальных валков могут дать вполне удовлетворительные результаты при прокатке облегченных двутавровых балок в косо расположенных калибрах.

Таким образом, относительно выбора рациональной формы черновых балочных калибров еще нет единого мнения, но несомненные преимущества показали калибры с увеличенными уклонами боковых стенок.

В связи с применением чистовой универсальной четырехвалковой клети, деформация фланцев в которой происходит со свободным уширением, возникла необходимость иметь предчистовой контрольный калибр. Лучшим для этой цели оказался полузакрытый калибр, толщину конца полузакрытого фланца которого делают больше на 0,5—0,8 *мм* толщины конца закрытого фланца предшествующего калибра (рис. 149, *е*). Это дает возможность устранить переполнение калибра и связанного с ним заката на готовом профиле. Применение контрольного калибра позволяет обеспечить хорошую стабильность размеров профиля по длине раската. Кроме того, уменьшается утяжка высоты фланцев на обоих концах раската, что сокращает длину обрези и, следовательно, расход металла. Так, на одном из заводов после внедрения контрольного калибра длина обрези уменьшилась с 1,2—1,8 до 0,8—1,0 *м*.

Чистовой калибр на ряде станов выполняют с несколько большим выпуском (до 1,5%), а на некоторых рельсо-балочных и одном крупносортном станах, как указывалось выше, чистовой проход производят в универсальной четырехвалковой клети.

Хорошее заполнение калибров металлом, а следовательно, и выполнение профиля в значительной степени зависят от правильности выбора закруглений углов калибров. Радиусы закруглений углов чистового калибра определяют в зависимости от размеров профиля, приведенных в соответствующих ГОСТах. В предыдущих по ходу прокатки калибрах радиусы закруглений увеличивают пропорционально увеличению толщины прилегающих элементов профиля.

Б. П. Бахтинов [2] рекомендует во всех калибрах сохранять отношение

$$\frac{R_n}{b_n} = c = \text{const},$$

где $R_n$ — радиус закругления между стенкой и фланцем готового профиля;

$b_n$ — толщина фланца у основания готового профиля.

Тогда для каждого искомого калибра

$$R_0' = cb_0';$$

$$R_з' = cb_з'.$$

Радиусы закруглений у вершины закрытого фланца $r_з'$ выбирают по аналогичным формулам

$$\frac{r}{a} = c = \text{const},$$

где $r$ — радиус закругления у вершины фланца готового профиля;
$a$ — толщина фланца на конце.

Откуда радиусы в других калибрах

$$r_з' = ca_з' \text{ и т. д.}$$

Однако с увеличением радиуса закругления $r_з'$ заполнение закрытого фланца металлом затрудняется, вследствие чего взятое по готовому профилю отношение $r_з'/a_з'$ в черновых калибрах следует несколько уменьшать.

Калибры для прокатки двутавровых балок в настоящее время не имеют ограничений движению металла в открытом фланце (рис. 150), поэтому радиус закругления не указывается. Такая конструкция замка предохраняет раскат от образования заусенцев и закатов.

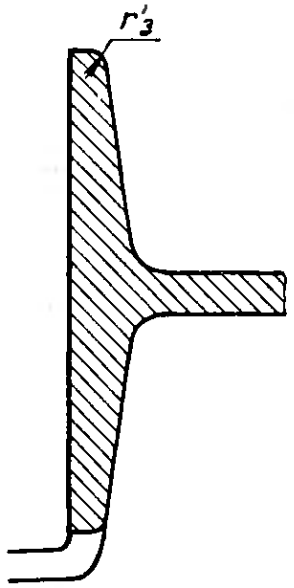



Рис. 150. Балочный калибр без ограничения движения металла в открытом фланце

Калибры располагают таким образом, чтобы центральная линия совпадала со средней линией валков для того, чтобы свести к минимуму разность окружных скоростей валков и полосы. Вследствие того, что балочные калибры врезают в валки несимметрично, валки с закрытым ручьем имеют больший начальный диаметр, а валки с гребнем — меньший.

Бурты между калибрами и крайние бурты должны быть достаточной ширины. При расчете буртов на излом давление на них можно приближенно принимать равным 25—30% вертикального давления металла на валки.

На валках станов дуо-нереверсивных (зигзагообразных, непрерывных) и трио калибры имеют замки с одной стороны (вверху или внизу), бурты между ними одинаковые (рис. 151). При этом на станах трио калибры могут быть несопряженными и сопряженными.

На дуо-реверсивных станах применяют два способа расположения калибров. Последовательное расположение требует изменения мест разъемов валков соседних калибров. (рис. 152). Применение чередующихся буртов увеличенной ширины влечет за собой уве-

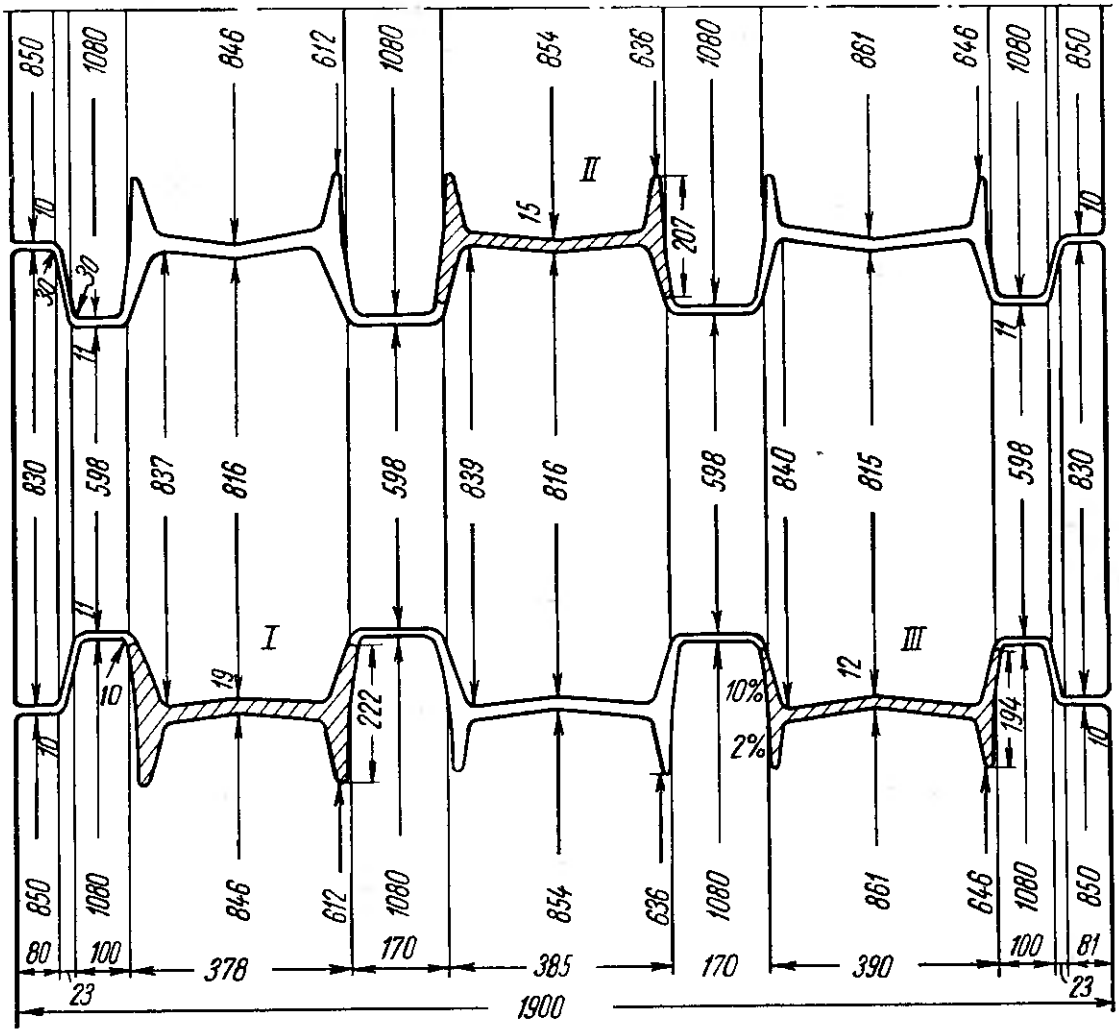



Рис. 151. Валки черновой клети стана 800 трио для прокатки балки № 40

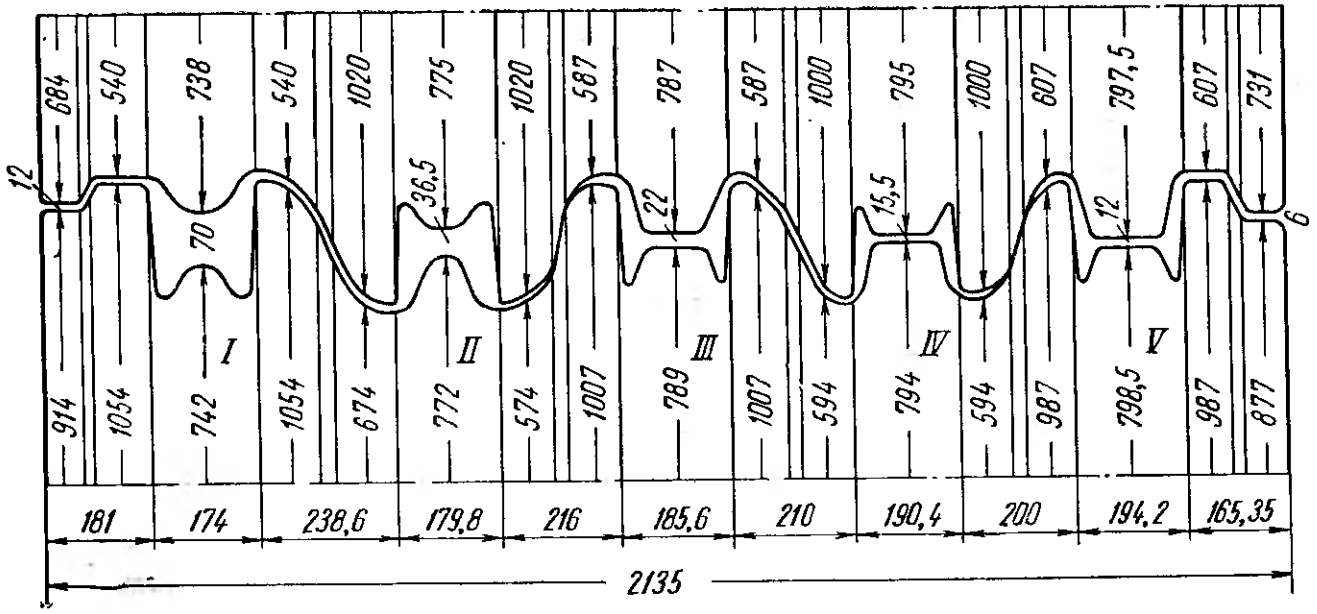



Рис. 152. Валки черновой клети дуо-реверсивного стана 800 для прокатки балки № 20

личение длины бочки валка или уменьшение числа ручьев (при постоянной длине бочки).

При отказе от последовательного расположения калибров (рис. 153) суммарная ширина буртов значительно уменьшается. Недостатком этого метода является увеличение времени перемещения металла от калибра к калибру.

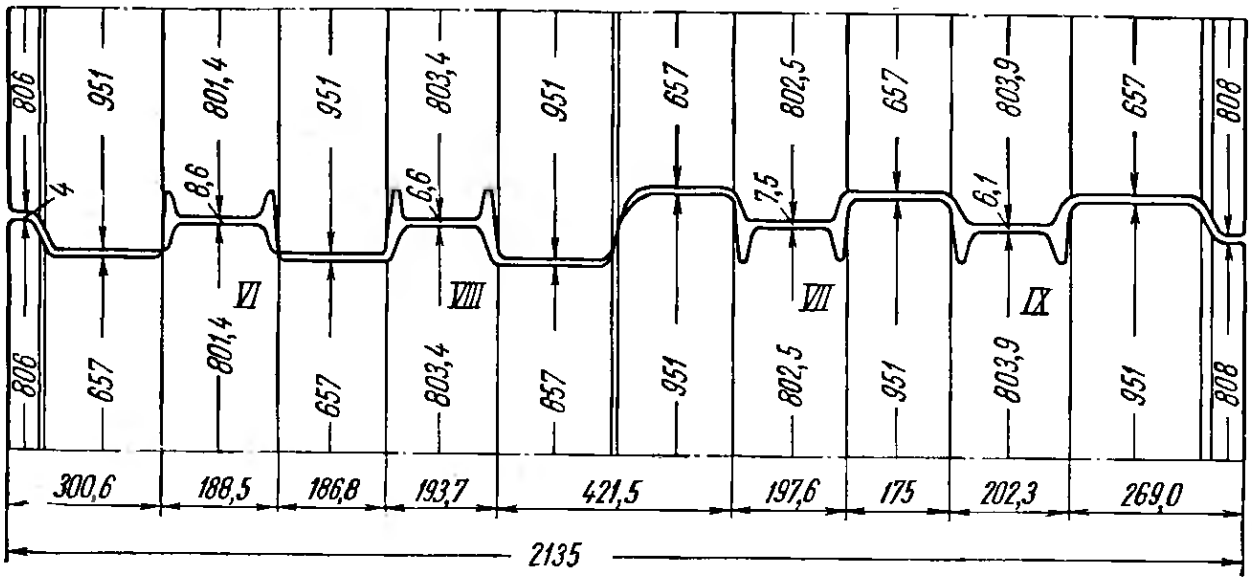



Рис. 153. Валки чистовой клети дуо-реверсивного стана 800 для прокатки балки № 20

## 9. МЕТОДЫ РАСЧЕТА КАЛИБРОВОК ДВУТАВРОВЫХ БАЛОК

Калибровка двутавровых балок — одна из наиболее сложных. Ниже рассмотрены некоторые из известных методов калибровки двутавровых балок [2, 7, 40—43]. Метод А. П. Чекмарева изложен выше (с. 334—349).

### *Метод Б. П. Бахтинова*

При прокатке двутавровых балок Б. П. Бахтинов [2] рекомендует применять одинаковые коэффициенты вытяжки для всех элементов профиля. Предварительно нужно выбрать число фасонных калибров. С учетом опыта эксплуатации различных станов Б. П. Бахтинов рекомендует пользоваться данными, приведенными в табл. 69.

Таблица 69

**Зависимость числа проходов от номера профиля**

| Номер профиля | Число проходов в фасонных калибрах | Диаметр валков, *мм* |
|---|---|---|
| 10—12 | 6—8 | 350—500 |
| 12—18 | 7—9 | 400—650 |
| 18—27 | 8—11 | 500—950 |
| 24—60 | 10—15 | 600—950 |

Часто калибровка балки должна быть связана с определенным, заранее заданным числом проходов, отклонения от которого нежелательны или невозможны. В таких случаях очень важно выдер-

жать общий коэффициент деформации

$$k_{общ} = k_1 k_2 k_3 \ldots k_n,$$

где $k_1$, $k_2$, . . ., $k_n$ — коэффициенты деформации в калибрах против хода прокатки.

Общий коэффициент деформации в фасонных калибрах (без разрезного) определяют по формуле

$$k_{общ} = \frac{B_р}{2b_1}\frac{H_р}{H_1},$$

где $B_р$ — ширина разрезного калибра;
$H_р$ — высота разрезного калибра;
$b_1$ — толщина основания фланца готового профиля;
$H_1$ — высота чистового калибра.

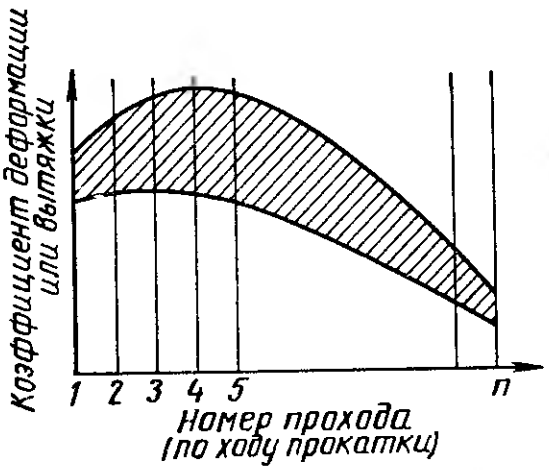



Рис. 154. Типовой график распределения коэффициентов деформации (или вытяжек) по проходам

Характер распределения частных коэффициентов деформации принимают аналогичным показанному на рис. 154.

Утяжку высоты закрытых фланцев определяют по формуле

$$\Delta h_а = \frac{h_з^2}{D_ш - h_з}, \qquad (104)$$

где $h_з$ — высота закрытого фланца;
$D_ш$ — диаметр валка по стенке калибра.

Приращение высоты открытых фланцев $\Delta h_0$ равно

$$\Delta h_0 = -\frac{h_0 d}{D_ш + d}, \qquad (105)$$

где $h_0$ — высота открытого фланца;
$d$ — толщина стенки калибра.

Высота закрытых $h_з'$ и открытых $h_0'$ фланцев следующего по ходу расчета (большего) калибра с учетом чередования открытых и закрытых фланцев составляет

$$h_з' = h_0 + \Delta h_0 = \frac{D_ш h_0}{D_ш + d};$$

$$h_0' = h_з + \Delta h_з = \frac{D_ш h_з}{D_ш - h_з}.$$

Ширину искомого калибра $B'$ определяют по формуле

$$B' = \frac{BF'}{kF},$$

где $B$ — ширина известного калибра;

$F$ и $F'$ — площади поперечного сечения известного и искомого калибров;

$k = \frac{H'_{пр}}{H_{пр}}$ — коэффициент деформации;

$H_{пр} = \frac{F}{B}$ и $H'_{пр} = \frac{F'}{B'}$ — приведенные (средние) значения высот известного и искомого калибров.

Для расчета ширины калибра по указанной формуле необходимо знать величину площади искомого калибра $F'$, которая зависит от уширения (еще не определенного). Для предварительного определения уширения Б. П. Бахтинов рекомендует пользоваться эмпирической формулой, результаты подсчета по которой необходимо корректировать, учитывая конкретные условия прокатки:

$$\Delta B = 0{,}01 \cdot B + (n - 1), \qquad (106)$$

где $n$ — порядковый номер калибра (против хода прокатки).

### *Метод И. И. Кучко*

Метод И. И. Кучко [7] основан на анализе действующих заводских калибровок. Основной коэффициент деформации — коэффициент обжатия стенки $\eta_c$ изменяется по калибрам в соответствии с закономерностью, изображенной на рис. 154.

Число фасонных калибров выбирается на основе практики.

Для расчета задаются коэффициентами обжатия элементов профиля. Коэффициенты обжатия открытых фланцев обычно везде, кроме первых двух-трех черновых калибров, больше коэффициентов обжатия стенки. Коэффициенты обжатия закрытых фланцев меньше остальных коэффициентов (табл. 70).

Таблица 70

**Коэффициенты обжатия элемеитов профиля при прокатке двутавровой балки № 20 в девяти фасоиных калибрах на рельсо-балочном стане 800**

| Элемеиты профиля | Коэффициеиты обжатий элемеитов профиля η по калибрам | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | I | II | III | IV | V | VI | VII | VIII | IX |
| Стенка . . . . . | 1,10 | 1,14 | 1,18 | 1,24 | 1,30 | 1,37 | 1,43 | 1,46 | 1,38 |
| Открытый фланец . . . | 1,11 | 1,17 | 1,22 | 1,30 | 1,40 | 1,50 | 1,55 | 1,40 | 1,30 |
| Закрытый фланец . . . | 0,98 | 1,00 | 1,02 | 1,05 | 1,07 | 1,09 | 1,12 | 1,15 | 1,18 |

При расчете размеров фланцев утяжку закрытых фланцев принимают (против хода прокатки) равной 5—8 *мм*, а приращение высоты открытых фланцев принимают в пределах 0—1,0 *мм*.

Средняя толщина фланцев определяется по коэффициентам обжатий, принимая в соответствующих фланцах:

$$t_{0\,(i)} = t_{з\,(i+1)}\eta_{з\,(i+1)};$$

$$t_{з\,(i)} = t_{0\,(i+1)}\eta_{0\,(i+1)},$$

где $i$ — номер калибра против хода прокатки.

При определении толщины концов фланцев учитывают защемление при прокатке закрытого фланца и обжатие при прокатке открытого фланца. Примерный расчет по этому методу приводится в работе [7].

### *Метод Б. В. Мерекина*

Расчет калибровки двутавровых балок по методу Б. В. Мерекина [7] также основан на закономерностях, полученных при анализе хорошо работающих калибровок.

Б. В. Мерекин считает, что для прокатки балок при внутреннем уклоне полок готового профиля 8% и при выпуске 10% в открытых фланцах промежуточных калибров обжатие (*мм*) стенки раската можно принимать в указанных ниже пределах независимо от номера профиля (против хода прокатки), т. е. для всех балок от № 10 до № 60: I — 0,5; II — 0,5—1,0; III — 1,0—1,5; IV — 1,5—2,0; V — 2,5—3,5 и т. д.

Уширение принимают одинаковым во всех калибрах в пределах 2—3 *мм*.

Так как двутавровые балки прокатывают из прямоугольных или квадратных заготовок, то в первых по ходу прокатки разрезных калибрах прокатку ведут со значительным превышением вытяжки стенки над вытяжкой фланцев. В отдельных случаях вытяжка фланцев в этих калибрах может быть меньше единицы, когда происходит приращение высоты фланцев при разрезке. В промежуточных калибрах обычно наблюдается незначительное превышение вытяжки фланцев над вытяжкой стенки. В последних чисто балочных калибрах вытяжка фланцев равна или несколько больше вытяжки стенки.

Для оценки степени отклонения вытяжек по элементам профиля, а также для облегчения расчета новых и анализа действующих калибровок Б. В. Мерекин предлагает пользоваться коэффициентом подобия $K$ данного калибра чистовому и коэффициентом подобия $K_{фл}$ верхних фланцев нижним.

Коэффициент подобия калибра определяют по формуле

$$K = \frac{F_{фл}}{F_{ст}} : \frac{F_{фл.\,чист}}{F_{ст.\,чист}} \cdot 100\%,$$

где $F_{фл}$ — суммарная площадь фланцев в данном калибре;

$F_{ст}$ — площадь стенки в данном калибре;

$F_{\text{фл. чист}}$ — суммарная площадь фланцев в чистовом калибре;
$F_{\text{ст. чист}}$ — площадь стенки в чистовом калибре.

По коэффициенту подобия судят о сходстве данного калибра с чистовым, а по разности коэффициентов подобия ($\Delta K$) в данном и в следующем против хода прокатки калибре — о взаимосвязи данного калибра соседним. При положительном значении $\Delta K$ в данном калибре сильнее обжимается стенка, а при отрицательном — фланцы.

Калибровку балок ведут с учетом отклонений коэффициента $K$ между соседними калибрами не более 3%, обычно эти отклонения принимают равными 1%. Однако в отдельных случаях, например при калибровке двутавровой балки № 55, допускается наращивание коэффициентов подобия против хода прокатки от 100 до 130—140% в первом (разрезном) балочном калибре.

Коэффициент подобия фланцев равен

$$K_{\text{фл}} = \frac{F_{\text{в. фл}}}{F_{\text{н. фл}}} \cdot 100\%,$$

где $F_{\text{в. фл}}$ и $F_{\text{н. фл}}$ — площади верхних и нижних фланцев в данном калибре.

В чистовом калибре балочный профиль имеет одинаковые верхние и нижние фланцы, т. е. $K_{\text{фл}} = 100\%$. В промежуточных калибрах колебания $\Delta K_{\text{фл}}$ не должны превышать $\pm 3\%$.

Высота открытых фланцев в связи с боковым обжатием в них меняется в незначительных пределах. Поэтому при расчетах калибровок высоту закрытого фланца в данном калибре принимают равной высоте предыдущего по ходу калибровки открытого фланца.

Вертикальное обжатие в закрытых фланцах принимают в пределах от 5—8 до 10—11 *мм*.

Задавшись значениями $\Delta K$ и $\Delta K_{\text{фл}}$, определяют площади закрытых фланцев. По площади и высоте фланца находят его среднюю толщину.

Абсолютные обжатия у вершины открытого фланца несколько больше, чем у его основания. Толщина искомого закрытого фланца у вершины $a_з'$ равна

$$a_з' = a_0 + \frac{3a_0 + b_0}{4}(\mu_0 - 1),$$

где $a_0$ — толщина предыдущего по ходу калибровки открытого фланца у вершины;
$b_0$ — толщина открытого фланца у основания;
$\mu_0$ — коэффициент вытяжки в открытом фланце.

Примерный расчет по этому методу приведен был ранее в работе [7].

### *Метод расчета калибровки балок по коэффициентам деформации*

При расчете калибровки двутавровых балок по предлагаемому методу, описанному Н. В. Литовченко [7], коэффициент деформации полок у конца открытого фланца принимают больше, чем у основания, а в закрытом фланце — наоборот. Коэффициент деформации стенки принимают несколько меньше коэффициента деформации у основания открытого фланца, причем в первых черновых калибрах это соотношение может измениться до обратного в зависимости от размеров исходной заготовки. Абсолютные величины коэффициентов деформации рекомендовать трудно, так как они зависят от многих факторов: типа стана, размеров и формы сечения исходной заготовки, температурного и скоростного режимов прокатки. Обычно коэффициенты деформации различных элементов профиля принимают, исходя из практических данных и конкретных условий. Приращение и утяжку в открытых и закрытых фланцах принимают также на основании практических данных (табл. 71).

Таблица 71

**Приращение и утяжка во фланцах [7]**

| Номер балки | Приращение в открытых фланцах, *мм* | | Утяжка в закрытых фланцах, *мм* | |
|---|---|---|---|---|
| | черновые калибры | предчистовые и чистовые калибры | черновые калибры | предчистовые и чистовые калибры |
| 10—14 | 1—2 | 0,75—1,5 | 4—7 | 4—5 |
| 16—20 | 1,0—1,5 | 0,5—1,0 | 4—7 | 6—8 |
| 22—28 | 0,5—1,0 | 0,5—1,0 | 5—8 | 6—10 |
| св. 28 | 1,0—1,5 | 1,0—1,5 | 5—8 | 7—10 |

Уширение определяют с учетом марки прокатываемой стали по уравнению

$$\Delta B_n = c + \frac{n-1}{2}, \qquad (107)$$

где $\Delta B_n$ — уширение в данном калибре;

$n$ — номер прохода (против хода прокатки);

$c$ — уширение в чистовом калибре (табл. 72).

Анализ калибровок показал, что коэффициент деформации конца открытого фланца больше коэффициента деформации фланца у основания в следующих пределах:

для чистового калибра

$$\eta_0^a = (1{,}005 \div 1{,}01)\,\eta_0^b;$$

для остальных калибров

$$\eta_{\text{о}}^{a} = (1{,}04 \div 1{,}10)\,\eta_{\text{о}}^{b}.$$

Коэффициент деформации основания закрытого фланца больше коэффициента деформации у конца:

$$\eta_{\text{з}}^{b} = (1{,}03 \div 1{,}05)\,\eta_{\text{з}}^{a}.$$

Значения коэффициентов в приведенных уравнениях возрастают в направлении от чистового к черновому калибрам пропорционально числу фасонных калибров. Например, для девяти фасонных калибров при определении значения $\eta_{\text{з}}^{b}$ приращение коэффициента авторы предлагают принимать равным

$$\frac{1{,}05 - 1{,}03}{9} = 0{,}002.$$

Таблица 72

**Уширение в чистовом калибре [7]**

| Номер балки | Величина $c$, мм | |
|---|---|---|
| | при прокатке низкоуглеродистой стали | при прокатке высокоуглеродистой и легированной сталей |
| 10—14 | 1,5 | 0,75—1,0 |
| 18—24 | 2,0—2,5 | 1,25—1,5 |
| 27—40 | 2,5—3,0 | 1,5—2,0 |
| 45—60 | 3,0—4,0 | 2,0—2,5 |

Можно также принять и другой характер изменения коэффициентов, в результате чего несколько изменится форма калибров.

### Примерный расчет калибровки двутавровой балки № 24

Произведем расчет калибровки для прокатки двутавровой балки № 24 на рельсо-балочном стане 800, пользуясь методом А. П. Чекмарева. Размеры холодного профиля балки и допуски принимаем по ГОСТ 8239—56. Уклон внутренней грани полок принимаем $\leqslant 12\%$.

Пользуясь графиком (см. рис. 144), выбираем восемь фасонных калибров. Калибры по клетям распределяются следующим образом. В обжимной клети 950 три фасонных калибра, в первой клети трио 800 — три калибра, во второй клети 800 — один калибр и в третьей клети — один калибр. Учитывая износ валков и целесообразность прокатки на минус, а также температурное расширение профиля примем следующие размеры чистового калибра.

Ширина (высота балки)

$$B_8 = (240 - 2{,}5) \cdot 1{,}012 = 240{,}3 \text{ мм} \approx 240 \text{ мм}.$$

Высота (ширина полки)

$$H_8 = (115 - 2{,}5) \cdot 1{,}012 = 113{,}8 \text{ мм},$$

где 2,5 *мм* — неполный минусовый допуск на высоту и ширину балки.

Средняя толщина фланцев

$$t_8 = (9{,}5 - 0{,}3) \cdot 1{,}012 = 9{,}3 \text{ мм}.$$

Толщина стенки

$$d_8 = 5{,}6 \cdot 1{,}012 = 5{,}7 \text{ мм}.$$

Высота фланца

$$h_8 = \frac{113{,}8 - 5{,}7}{2} = 54{,}0 \text{ мм}.$$

Толщина фланца у основания

$$b_8 = t_8 + 0{,}5 h_8 \operatorname{tg} \varphi_8 = 9{,}3 + 0{,}5 \cdot 5{,}4 \cdot 0{,}12 = 12{,}5 \text{ мм}.$$

Толщина фланца у вершины

$$a_8 = 2t_8 - b_8 = 2 \cdot 9{,}3 - 12{,}5 = 6{,}1 \text{ мм}.$$

Площадь поперечного сечения фланца

$$q_{\text{фл}_8} = t_8 h_8 = 9{,}3 \cdot 54 = 502 \text{ мм}^2.$$

Площадь поперечного сечения чистового калибра

$$q_8 = 4 q_{\text{фл}_8} + B_8 d_8 = 4 \cdot 502 + 240 \cdot 5{,}7 = 3375 \text{ мм}^2.$$

Отношение оснований фланца

$$\frac{a_8}{b_8} = \frac{6{,}1}{12{,}5} = 0{,}49.$$

Уширение предварительно выбираем по графику 3 (см. рис. 145):
для разрезного калибра

$$\Delta B_1 = 5 \text{ мм};$$

для остальных калибров

$$\Delta B_{2-8} = 40 \text{ мм};$$

общее уширение

$$\sum \Delta B_{1-8} = 45 \text{ мм}.$$

Ширина заготовки

$$B_0 = B_8 - \sum \Delta B_{1-8} = 240 - 45 = 195 \text{ мм}$$

Ширина разрезного калибра

$$B_1 = B_0 + \Delta B_1 = 195 + 5 = 200 \text{ мм}.$$

В том случае, если округляем значение ширины заготовки, уширение в балочных калибрах (кроме разрезного) следует определить окончательно:

$$\sum \Delta B_{2-8} = B_8 - B_1.$$

Выбираем утяжку металла в закрытых фланцах $\Delta h_{\text{ут}} = 6$ *мм* и приращение высоты фланца в открытых фланцах $\Delta h_{\text{пр}} = 1{,}0$ *мм* (см. табл. 71).

В табл. 73 приведены значения высоты фланцев всех калибров с учетом чередования мест разъема валков. В чистовом калибре открытым фланцем является верхний, закрытым — нижний.

Таблица 73

**Высоты, *мм*, фланцев по калибрам**

| Фланцы | Калибры | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | I | II | III | IV | V | VI | VII | VIII |
| Верхние . . . . . | 68 | 69 | 63 | 64 | 58 | 59 | 53 | 54 |
| Нижние . . . . . | 75 | 69 | 70 | 64 | 65 | 59 | 60 | 54 |

Толщину у основания открытого фланца разрезного калибра принимаем в пределах

$$b_1 \approx (0{,}35 \div 0{,}45)\ B_1.$$

Радиус закруглений определяет плавную форму гребня. Кроме того, после расчета размеры разрезного калибра корректируют, чтобы обеспечить надежный захват. С этой целью толщину стенки увеличивают за счет высоты фланцев. Корректировка размеров разрезного и второго (по ходу прокатки) калибров не повлияет на условия деформации, учитывая массивные размеры фланцев и стенки, так как распределение металла по элементам будет проходить без особых затруднений.

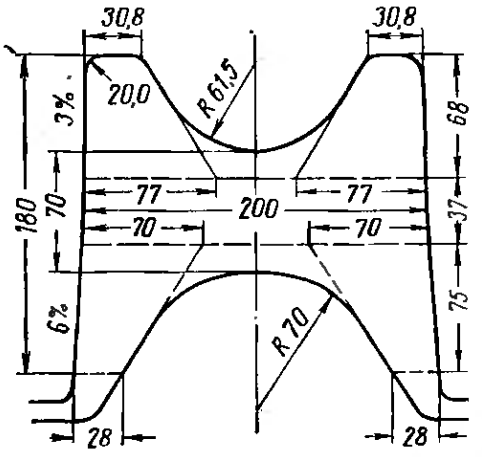



Рис. 155. Расчетные размеры резрезного калибра для прокатки балки № 24

На основании практических данных

$$a_1 \approx (0{,}4 \div 0{,}5)\ b_1,$$

считая по открытому фланцу. Можно принимать

$$\frac{a_1}{b_1} \approx \frac{a_n}{b_n},$$

т. е. отношение толщины фланцев $a_1$ и $b_1$ в разрезном калибре можно принимать такое же, как и в чистовом калибре.

Принимаем в нашем случае (рис. 155):

$$b_1 = 0{,}35\ B_1 = 0{,}35 \cdot 200 = 70\ мм;$$

$$a_1 = 0{,}40\ b_1 = 0{,}40 \cdot 70 = 28\ мм.$$

Для определения размеров фланцев остальных калибров будем исходить из следующих положений:

1) площади фланцев устанавливаем по выбранным коэффициентам вытяжки;

2) для определения размеров открытых фланцев воспользуемся точкой $K$ (см. рис. 146), которая даст возможность установить наклон внутренних граней открытых фланцев и, следовательно, размеры $a$ и $b$;

3) для определения размеров закрытых фланцев исходим из размеров большего открытого фланца, причем предусматриваем незначительное защемление в закрытом фланце у края в первых калибрах и свободный заход в закрытый фланец в последних калибрах.

Согласно практическим данным принимаем

$$\frac{a_o}{a_з} = 1{,}15 \div 0{,}95,$$

т. е. коэффициент деформации у вершины закрытого фланца будет изменяться по ходу прокатки от 1,15 (защемление) до 0,05 (свободный заход в закрытый фланец).

В случае необходимости размеры $a$ и $b$ можно скорректировать.

Находим координаты точки $K$ для нашего случая (см. рис. 146), имея в виду, что в разрезном калибре нижний фланец открытый:

$$\operatorname{tg}\varphi_8 = 0{,}12; \quad \operatorname{tg}\varphi_1 = \frac{b_1 - a_1}{h_1} = \frac{70 - 28}{75} = \frac{42}{75} = 0{,}56;$$

$$e = \frac{70 \cdot 0{,}12 - 12{,}5 \cdot 0{,}56}{0{,}56 - 0{,}12} = \frac{8{,}4 - 6{,}83}{0{,}44} = 3{,}18 \text{ мм};$$

$$H_K = \frac{70 + 3{,}18}{0{,}56} = 131 \text{ мм}.$$

Принимаем площадь закрытого фланца равной площади открытого $q_1' = q_1$, тогда размеры закрытого верхнего фланца определим с учетом высоты последнего $h_1' = 68$ мм:

$$a_1' = \frac{75}{68} a_1 = 1{,}1 \cdot 28 = 30{,}8 \text{ мм};$$

$$b_1' = 1{,}1 \cdot 70 = 77{,}0 \text{ мм}.$$

Площадь фланцев

$$q_1 = q_1' = 0{,}5\,(70 + 28)\,75 = 3680 \text{ мм}^2.$$

Толщина стенки разрезного калибра

$$d_1 = \frac{2 \cdot 3680 \cdot 5{,}7}{2 \cdot 502 + 0{,}5 \cdot 5{,}7 \cdot 40} = 37 \text{ мм}.$$

Общая высота калибра

$$H_1 = h_1 + h' + d_1 = 75 + 68 + 37 = 180 \text{ мм}.$$

Корректируя размеры разрезного калибра с учетом закругления и угла захвата в пределах 33—35°, принимаем толщину $d_1' = 70$ *мм*.

Площадь поперечного сечения разрезного калибра $q_1$ с учетом дополнительной площади $q_{доп}$ при толщине $d_1' = 70$ *мм* составляет

$$q_1 = 4 \cdot 3680 + 37 \cdot 200 + q_{доп} =$$
$$= 14\,700 + 7400 + 4500 = 26\,600 \text{ мм}^2.$$

Для определения высоты исходной заготовки находим

$$k = \frac{H_1 - d_1}{(H_1 - d_1) + (B_1 - 2a_{1ср})} = \frac{180 - 70}{(180 - 70) + (200 - 2 \cdot 29{,}4)} = 0{,}46;$$

$$\Delta q = \frac{2a_{1ср}(B_0 H_1 - q_1)}{B_0} = \frac{2 \cdot 29{,}4\,(195 \cdot 180 - 26\,600)}{195} = 2540 \text{ мм}^2;$$

$$H_0 = \frac{B_0}{q_1}\left(H_1 - \frac{0{,}25k\,\Delta q}{a_{1ср}}\right)^2 =$$

$$= \frac{195}{26\,600}\left(180 - \frac{0{,}25 \cdot 0{,}46 \cdot 2540}{29{,}4}\right)^2 = 212 \text{ мм}.$$

По упрощенной формуле

$$H_0 = 0{,}5H_1 + 0{,}5\frac{B_0 H_1^2}{q_1} = 0{,}5 \cdot 180 + 0{,}5\frac{195 \cdot 180^2}{26\,600} = 209 \text{ мм}.$$

Принимаем высоту заготовки $H_0 = 210$ *мм*.
Коэффициент вытяжки в разрезном калибре

$$\mu_1 = \frac{210 \cdot 195 \cdot 0{,}97}{26\,600} = 1{,}49.$$

Угол захвата

$$\alpha_1 = \arccos\left(1 - \frac{215 - 70}{950 - 70}\right) = 33° 30'.$$

*Расчет размеров промежуточных калибров*

Общий коэффициент вытяжки во фланцах (без учета уширения стенки, которое относится к деформации фланцев)

$$\sum_2^8 \mu_{фл_{2-8}} = \frac{q_{фл_1}}{q_{фл_8}} = \frac{3680}{502} = 7{,}32,$$

Выбираем коэффициенты вытяжки во фланцах

$$\sum_{2}^{8}\mu_{фл} = \mu_{фл_2}\mu_{фл_3}\mu_{фл_4}\mu_{фл_5}\mu_{фл_6}\mu_{фл_7}\mu_{фл_8} =$$

$$= 1{,}4 \cdot 1{,}45 \cdot 1{,}45 \cdot 1{,}4 \cdot 1{,}3 \cdot 1{,}25 \cdot 1{,}1 = 7{,}32.$$

Определим площади поперечного сечения фланцев по проходам:

$$q_{фл_1} = 3680 \ мм^2;$$

$$q_{фл_2} = q_{фл_1} : \mu_{фл_2} = 3680 : 1{,}4 = 2630 \ мм^2;$$

$$q_{фл_3} = 2630 : 1{,}45 = 1815 \ мм^2;$$

$$q_{фл_4} = 1815 : 1{,}45 = 1250 \ мм^2;$$

$$q_{фл_5} = 1250 : 1{,}4 = 894 \ мм^2;$$

$$q_{фл_6} = 894 : 1{,}3 = 688 \ мм^2;$$

$$q_{фл_7} = 688 : 1{,}25 = 551 \ мм^2;$$

$$q_{фл_8} = 551 : 1{,}1 = 502 \ мм^2.$$

Общий коэффициент уменьшения толщины стенки, или общий коэффициент вытяжки $\mu$, равен

$$\sum_{2}^{8}\mu = \sum_{2}^{8}\frac{d_1}{d_8} = \frac{37}{5{,}7} = 6{,}5.$$

Общий коэффициент уменьшения толщины стенки меньше общего коэффициента вытяжки фланцев вследствие того, что часть металла из фланцев идет на уширение стенки. Это следует из формулы (83).

Поэтому для стенок принимаем следующий ряд коэффициентов:

$$\mu_2\mu_3\mu_4\mu_5\mu_6\mu_7\mu_8 = 1{,}35 \cdot 1{,}45 \cdot 1{,}40 \cdot 1{,}40 \cdot 1{,}28 \cdot 1{,}20 \cdot 1{,}1 = 6{,}5.$$

Определим значения толщины стенки в калибрах:

$$d_2 = \frac{d_1}{\mu_2} = \frac{37}{1{,}35} = 27{,}4 \ мм; \quad d_3 = \frac{d_2}{\mu_3} = \frac{27{,}4}{1{,}45} = 18{,}9 \ мм;$$

$$d_4 = \frac{d_3}{\mu_4} = \frac{18{,}9}{1{,}40} = 13{,}5 \ мм; \quad d_5 = \frac{13{,}5}{1{,}40} = 9{,}7 \ мм;$$

$$d_6 = \frac{9{,}7}{1{,}28} = 7{,}6 \ мм; \quad d_7 = \frac{7{,}6}{1{,}20} = 6{,}3 \ мм;$$

$$d_8 = \frac{6{,}3}{1{,}1} = 5{,}7 \ мм.$$

Распределение уширения по калибрам принимаем пропорционально деформации по стенке:

$$\sum_{2}^{8}(\mu_{фл}-1)=0{,}35+0{,}45+0{,}40+0{,}40+$$

$$+0{,}28+0{,}20+0{,}10=2{,}18.$$

Коэффициент пропорциональности

$$m=\frac{\sum_{2}^{8}\Delta B}{\sum_{2}^{8}(\mu-1)}=\frac{40}{2{,}18}=18{,}35;$$

$$\Delta B_2=m(\mu_2-1)=18{,}35\cdot 0{,}35=6{,}4\ мм;$$

$$\Delta B_3=18{,}35\cdot 0{,}45=8{,}3\ мм;\quad \Delta B_4=18{,}35\cdot 0{,}40=7{,}3\ мм;$$

$$\Delta B_5=18{,}35\cdot 0{,}40=7{,}3\ мм;\quad \Delta B_6=18{,}35\cdot 0{,}28=5{,}2\ мм;$$

$$\Delta B_7=18{,}35\cdot 0{,}20=3{,}7\ мм;\quad \Delta B_8=18{,}35\cdot 0{,}10=1{,}8\ мм.$$

Сумма уширений по калибрам должна составлять 40 *мм*.

Можно воспользоваться также следующим способом определения уширения. В последнем калибре уширение принимаем $\Delta B_8 = 0{,}1B_8 \approx 2{,}4$ *мм*. В остальных калибрах уширение принимаем на 1 *мм* больше, чем в последующем калибре, считая по ходу прокатки.

Получаем значения уширения по калибрам:

$$\Delta B_8=2{,}4\ мм;\quad \Delta B_7=\Delta B_8+1=2{,}4+1=3{,}4\ мм;$$

$$\Delta B_6=3{,}4+1=4{,}4\ мм;\quad \Delta B_5=5{,}4\ мм;$$

$$\Delta B_4=6{,}4\ мм;\quad \Delta B_3=7{,}4\ мм;$$

$$\Delta B_2=8{,}4\ мм.$$

Сумма уширений составляет

$$\sum_{2}^{8}\Delta B=37{,}8\ мм.$$

Разница значений уширения, рассчитанных этими двумя способами, получилась незначительная.

Определяем ширину калибра, принимая уширение, рассчитанное по первому способу:

$$B_2=B_1+\Delta B_2=200+6{,}4=206{,}4\ мм;$$

$$B_3=206{,}4+8{,}3=214{,}7\ мм;\quad B_4=214{,}7+7{,}3=222\ мм;$$

$$B_5=222+7{,}3=229{,}3\ мм;\quad B_6=229{,}3+5{,}2=234{,}5\ мм;$$

$$B_7=234{,}5+3{,}7=238{,}2\ мм;\quad B_8=238{,}2+1{,}8=240\ мм.$$

*Калибр II*

Определим размеры открытого верхнего фланца, пользуясь точкой $K$.

Средняя толщина фланца

$$t_2 = \frac{q_{фл_2}}{h_2} = \frac{2630}{69} = 38{,}2 \text{ мм}.$$

Тангенс угла наклона стенки

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = \frac{t_2 + e}{H_K - 0{,}5h_2} = \frac{38{,}2 + 3{,}18}{131 - 0{,}5 \cdot 69} = 0{,}428.$$

Толщина фланца у основания

$$b_2 = H_K \operatorname{tg} \varphi_2 - e = 131 \cdot 0{,}428 - 3{,}18 = 52{,}8 \text{ мм}.$$

Толщина фланца у края

$$a_2 = 2t_2 - b_2 = 2 \cdot 38{,}2 - 52{,}8 = 23{,}6 \text{ мм}.$$

Определим размеры закрытого нижнего фланца.

Средняя толщина фланца

$$t_2' = \frac{2630}{69} = 38{,}2 \text{ мм}.$$

Принимаем коэффициент защемления у края закрытых фланцев

$$\eta_2 = 1{,}15$$

и для остальных калибров

$$\eta_k = \frac{a_{k-1}}{a_k'} = 1{,}15;\ 1{,}10;\ 1{,}10;\ 1{,}0;\ 1{,}0;\ 0{,}95.$$

Во втором калибре толщина фланца

$$a_2' = \frac{a_1}{\eta_2} = \frac{28}{1{,}15} = 24{,}4 \text{ мм}.$$

Толщина фланцев у основания

$$b_2' = 2t_2' - a_2' = 2 \cdot 38{,}2 - 24{,}4 = 52{,}0 \text{ мм}.$$

Угол захвата во втором калибре

$$\alpha_2 = \arccos\left(1 - \frac{70 - 27{,}4}{950 - 27{,}4}\right) = 12^\circ 30'.$$

Аналогично определяем размеры фланцев и для остальных калибров (табл. 74).

При определении размеров открытых фланцев предчистового калибра VII можно таже исходить из коэффициента защемления $\eta$ в закрытом фланце чистового калибра. Приняли $\eta_8 = 0{,}95$, следовательно:

$$a_7 = \eta_8 a_8' = 0{,}95 \cdot 6{,}1 = 5{,}8 \text{ мм}.$$

Таблица 74

## Размеры фланцев двутавровой балки № 24 по калибрам

| Номер калибра | Тип фланца | $q$, мм² | $h$, мм | $t = \frac{q}{h}$, мм | $\operatorname{tg}\varphi = \frac{t+3{,}18}{131-0{,}5h}$ | $b_0 = 131\operatorname{tg}\varphi - 3{,}18$, мм | $a_0 = 2t_0 - b_0$, мм | $\eta$ | $a'_з = \frac{b_{к-1}}{\eta_к}$, мм | $b'_з = 2t' - a'_з$, ** мм |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| II * | О | 2630 | 69 | 38,2 | 0,428 | 52,8 | 23,6 | — | — | — |
| | З | 2630 | 69 | 38,2 | — | — | — | 1,15 | 24,4 | 52,0 |
| III | З | 1815 | 63 | 28,8 | — | — | — | 1,15 | 20,5 | 37,1 |
| | О | 1815 | 70 | 25,9 | 0,34 | 36,6 | 15,2 | — | — | — |
| IV | О | 1250 | 64 | 19,5 | 0,23 | 26,8 | 12,2 | — | — | — |
| | З | 1250 | 64 | 19,5 | — | — | — | 1,1 | 13,8 | 25,2 |
| V | З | 894 | 58 | 15,4 | — | — | — | 1,1 | 11,1 | 19,7 |
| | О | 894 | 65 | 13,7 | 0,171 | 19,2 | 8,2 | — | — | — |
| VI | О | 688 | 59 | 11,7 | 0,146 | 15,9 | 7,5 | — | — | — |
| | З | 688 | 59 | 11,7 | — | — | — | 1 | 8,2 | 15,2 |
| VII | З | 551 | 53 | 10,4 | — | — | — | 1 | 7,5 | 13,3 |
| | О | 551 | 60 | 9,2 | 0,122 | 12,9 | 5,5 | — | — | — |

* В первой строке — верхний фланец, во второй строке — нижний фланец.
** $a'$ и $b'$ — размеры фланцев задаваемой полосы.

По точке $K$ определили $a_7 = 5{,}5$ *мм*, что положили в основу расчета.

Радиусы закругления между стенкой и фланцем определяем по формуле

$$R \approx c \frac{b_0 + b_3}{2}, \tag{108}$$

где $c = \frac{R}{b}$ — отношение радиуса закругления к толщине фланца у основания для чистового калибра.

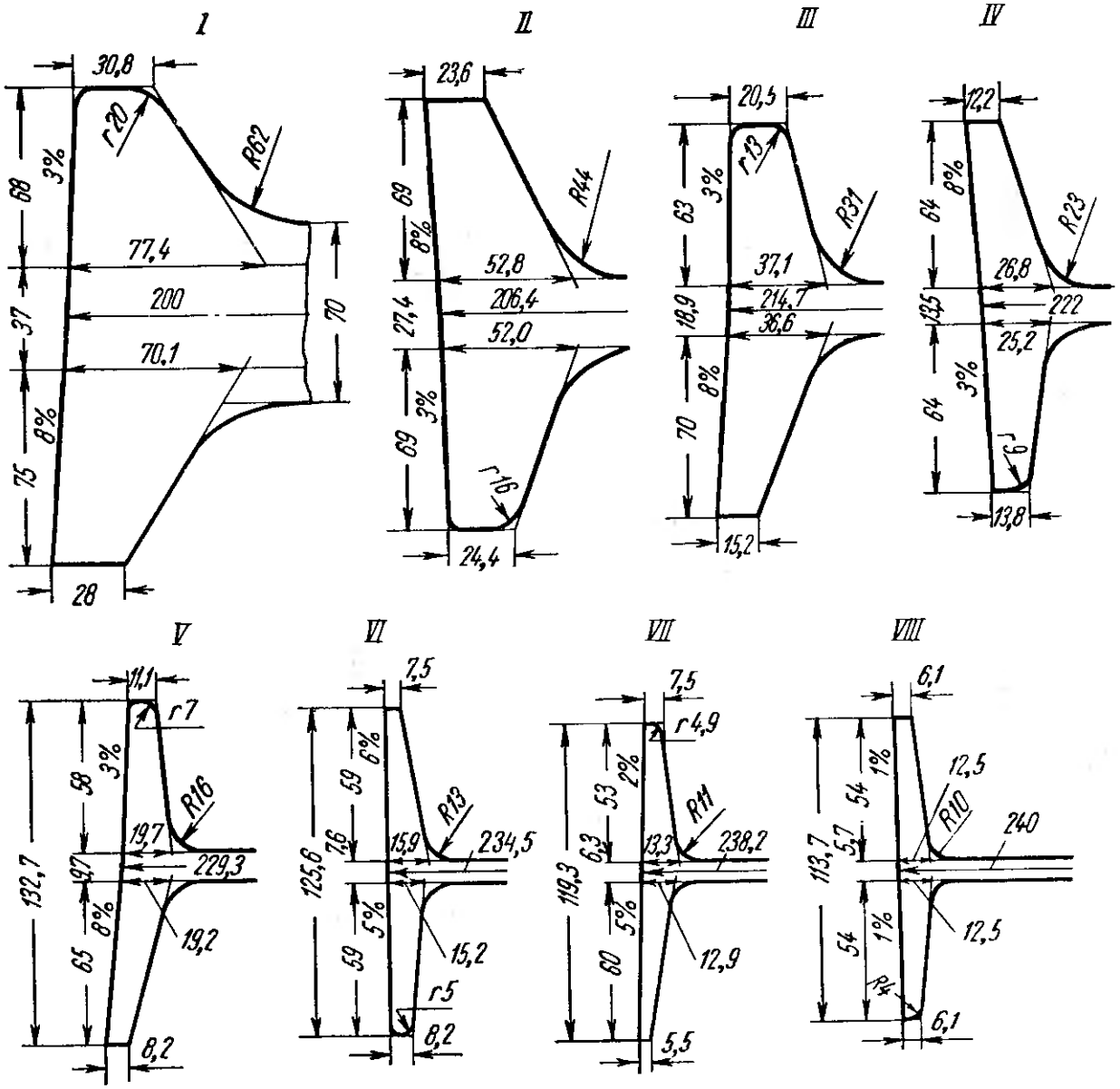



Рис. 156. Расчетная калибровка двутавровой балки № 24

Радиус закругления у вершины закрытого фланца принимаем

$$r \approx ca, \tag{109}$$

где $c = \frac{r}{a}$ — отношение радиуса закругления у вершины закрытого фланца к толщине фланца у вершины чистового калибра.

Таблица 75

## Расчетная калибровка двутавровой балки № 24

| Номер калибра | Тип фланца | Размеры фланцев | | | | | | $\mu_{фл}$ | Размеры стенки | | | | Размеры калибра | | $\mu = \frac{Q_k}{Q_{k+1}}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $h$, мм | $b$, мм | $a$, мм | $q$, мм² | $R$, мм | $r$, мм | | $d$, мм | $B$, мм | $q_{ст}$, мм² | $\frac{d_k}{d_{k+1}}$ | $H$, мм | $Q$, мм² | |
| 0 | | 210×195 мм | | | | | | | | | | | 39 700 | | |
| *I* * | З<br>О | 68<br>75 | 77,4<br>70,1 | 30,8<br>28 | 3680<br>3680 | 61,6 | 20,2 | | 37,0 | 200 | 7400 | | 180 | 26 600 | 1,49 |
| *II* | О<br>З | 69<br>69 | 52,8<br>52,0 | 23,6<br>24,4 | 2630<br>2630 | 44 | 16 | 1,4 | 27,4 | 206,4 | 5655 | 1,35 | 165,4 | 16 175 | 1,64 |
| *III* | З<br>О | 63<br>70 | 37,1<br>36,6 | 20,5<br>15,2 | 1815<br>1815 | 31 | 13,4 | 1,45 | 18,9 | 214,7 | 4058 | 1,45 | 151,9 | 11 318 | 1,43 |
| *IV* | О<br>З | 64<br>64 | 26,8<br>25,2 | 12,2<br>13,8 | 1250<br>1250 | 22,8 | 9,05 | 1,45 | 13,5 | 222 | 2997 | 1,40 | 141,5 | 7 997 | 1,41 |
| *V* | З<br>О | 58<br>65 | 19,7<br>19,2 | 11,1<br>8,2 | 894<br>894 | 16,4 | 7,0 | 1,4 | 9,7 | 229,3 | 2224 | 1,40 | 132,7 | 5 800 | 1,38 |
| *VI* | О<br>З | 59<br>59 | 15,9<br>15,2 | 7,5<br>8,2 | 688<br>688 | 13 | 5,3 | 1,3 | 7,6 | 234,5 | 1782 | 1,28 | 125,6 | 4 534 | 1,28 |
| *VII* | З<br>О | 53<br>60 | 13,3<br>12,9 | 7,5<br>5,5 | 551<br>551 | 11 | 4,9 | 1,25 | 6,3 | 238,2 | 1500 | 1,20 | 119,3 | 3 704 | 1,22 |
| *VIII* | О<br>З | 54<br>54 | 12,5<br>12,5 | 6,1<br>6,1 | 502<br>502 | 10,5 | 4 | 1,1 | 5,7 | 240 | 1368 | 1,1 | 113,7 | 3 376 | 1,1 |

* В первой строке — верхний фланец, во второй строке — нижний фланец.

Радиусы закругления у конца открытых фланцев отсутствуют, так как в открытом фланце движение металла по высоте не ограничивается.

Результаты расчета калибровки балки № 24 приведены в табл. 75. Расчетная калибровка приведена на рис. 156.

## 10. ЗАВОДСКАЯ КАЛИБРОВКА ДВУТАВРОВОЙ БАЛКИ № 45

Двутавровую балку № 45 прокатывают на рельсо-балочном стане 750 из исходной заготовки сечением 310×80×380 *мм*, поступающей с блюминга.

В валках обжимной клети стана врезаны три калибра (рис. 157): первый — открытый, а два других — закрытые. Наличие открытых и закрытых калибров обеспечивает получение балочной заготовки с хорошо выполненными тонкими элементами.

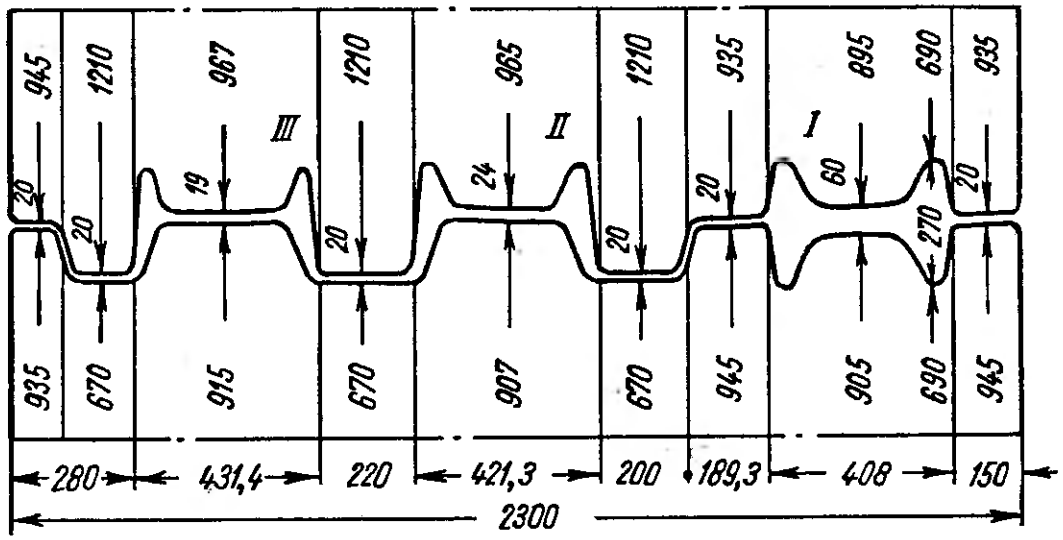



Рис. 157. Валки обжимной клети 900 рельсо-балочного стана 750 для прокатки двутавровой балки № 45

Недостатком конструкции обжимной клети этого стана является то, что размеры окна станины ограничивают диаметр нижнего валка до 945 *мм* и верхнего — до 1215 *мм*, что недостаточно для прокатки крупных балок. При указанном соотношении диаметров валков закрытые фланцы калибров врезают в верхний валок. Так как обжатия по проходам осуществляются за счет вертикального перемещения верхнего валка, то установка выводных проводок крайне затрудняется, в результате чего создается угроза окова валков полосой.

Прокатку в обжимной клети ведут в пять проходов. В первом и втором калибрах производят по два прохода, а в третьем калибре (после кантовки на 180°) — один. Режим обжатий в этой клети приведен в табл. 76.

После прокатки в обжимной клети раскат по рольгангу передают к черновой линии стана, в первой клети которой производят три прохода, а во второй клети — два.

Особенность монтажа калибров в валках первой клети трио состоит в том, что калибры *II* и *III* выполняют сопряженными. Это вызвано большой высотой балки и недостаточной длиной бочки валков. В связи с тем, что на средний валок приходится двойная работа, в нем вытачивают закрытые фланцы, которые изнашиваются меньше открытых. Такой монтаж выравнивает износ отдельных элементов калибров и удлиняет срок службы валков.

Таблица 76

**Режим обжатий заготоаки в обжимной клети рельсо-балочиого стана 750 при прокатке двутаароаой балки № 45**

| Номер калнбра | Номер прохода | Размеры поперечного сечення раската, *мм* | | Обжатне, *мм* | Уширение, *мм* |
|---|---|---|---|---|---|
| | | толщнна стенкн | ширина | | |
| | 0 | 80 | 380 | — | — |
| *I* | 1 | 80 | 400 | 0 | 20 |
| | 2 | 55 | 408 | 25 | 8 |
| *II* | 3 | 40 | 415 | 15 | 7 |
| | 4 | 24 | 421 | 16 | 6 |
| | | Кантовка на 180° | | | |
| *III* | 5 | 19 | 431 | 5 | 10 |

От черновой линии раскат рольгангом передают к чистовой клети, в которой производят один проход.

Таким образом, прокатку балки № 45 на этом стане ведут в девяти балочных калибрах (рис. 158) за одиннадцать проходов.

Все закрытые балочные калибры, за исключением чистового, выполняют с изгибом стенки и уклоном 8%. При этом толщина стенки посередине калибра меньше, чем у фланцев. Чистовой калибр имеет прямую стенку и выпуск 1,5%.

Анализ калибровки двутавровой балки № 45 (табл. 77) показал, что в закрытых ручьях принята осадка фланцев по высоте в пределах 5—10 *мм*. В открытых ручьях приращение высоты фланцев отсутствует, за исключением калибра *VI* (рис. 158). Этот калибр сопряжен с предыдущим и, следовательно, имеет ту же ширину, что и калибр *V*. Прокатку в калибре *VI* производят с защемлением, а поэтому поперечная деформация здесь возможна только за счет приращения высоты открытых фланцев. В остальных

калибрах уширение принимают значительно большим величины обжатия стенки. Особенности данной калибровки следующие: значительная боковая обработка металла в открытых фланцах черновых калибров у вершины и у основания, полное отсутствие бокового обжатия у вершины закрытых фланцев калибров черно-

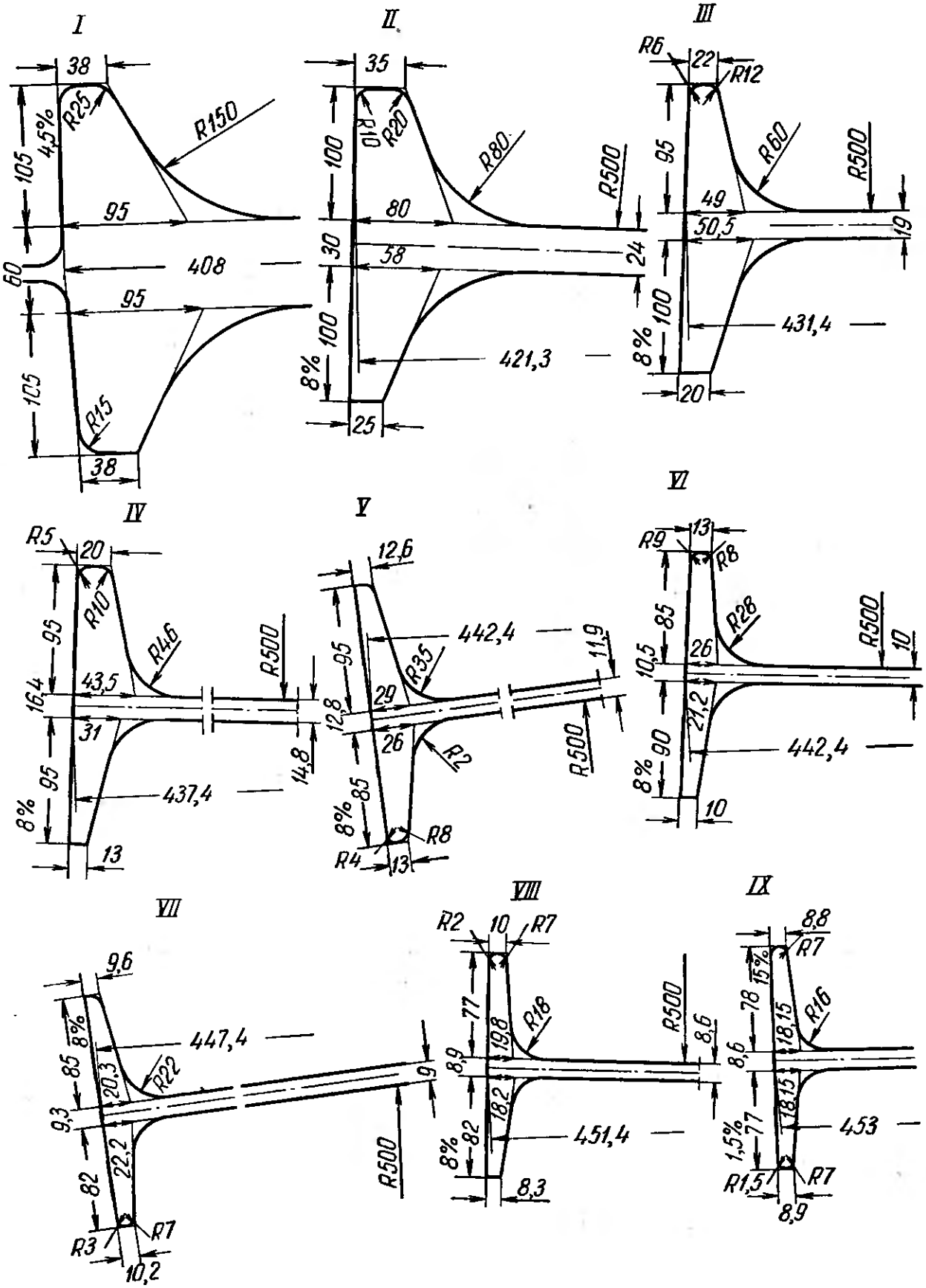



Рис. 158. Калибровка двутавровой балки № 45

Таблица 77

## Данные калибровки двутавровой балки № 45

| Номер калибра | Тип фланцев | Размер фланцев | | | $\mu_{фл}$ | Размеры стенки, | | | $\mu_{ст}$ | Весь калибр | | $\mu$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | высота, *мм* | толщина *, *мм* | площадь, *мм²* | | толщина **, *мм* | ширина, *мм* | площадь, *мм²* | | высота, *мм* | площадь, *мм²* | |
| *II* | З<br>О | 100<br>100 | 80/35<br>58/25 | 5750<br>4150 | — | 30/24 | 421,3 | 11 350 | — | 230 | 31 150 | — |
| *III* | З<br>О | 95<br>100 | 49/22<br>50,5/20 | 3370<br>3520 | 1,23<br>1,64 | 22/19 | 431,4 | 8 850 | 1,28 | 217 | 22 630 | 1,38 |
| *IV* | З<br>О | 95<br>95 | 43,5/20,4<br>31/13 | 3040<br>2090 | 1,16<br>1,61 | 16,4/14,8 | 437,4 | 6 840 | 1,29 | 206,4 | 17 100 | 1,32 |
| *V* | О<br>З | 95<br>85 | 29/12,6<br>26/13 | 1975<br>1660 | 1,54<br>1,26 | 12,8/11,9 | 442,4 | 5 460 | 1,25 | 192,8 | 12 730 | 1,34 |
| *VI* | З<br>О | 85<br>90 | 26/13<br>21,2/10 | 1660<br>1405 | 1,19<br>1,18 | 10,5/10 | 442,4 | 4 540 | 1,20 | 185,5 | 10 670 | 1,19 |
| *VII* | О<br>З | 85<br>82 | 20,3/9,6<br>21,2/10,2 | 1275<br>1290 | 1,30<br>1,09 | 9,3/9 | 447,4 | 4 090 | 1,11 | 176,3 | 9 220 | 1,16 |
| *VIII* | З<br>О | 77<br>82 | 19,8/10<br>18,2/8,3 | 1145<br>1080 | 1,11<br>1,18 | 8,9/8,6 | 451,4 | 8 950 | 1,04 | 167,9 | 8 400 | 1,10 |
| *IX* | О<br>З | 78<br>77 | 18,15/8,8<br>18,15/8,9 | 1055<br>1040 | 1,08<br>1,04 | 8,6 | 453,0 | 8 890 | 1,01 | 163,6 | 8 080 | 1,04 |

* В числителе — толщина фланцев у основания; в знамеиателе — толщнна фланца у вершины.
** В числителе — толщиина стенки у фланцев, в знаменателе — толщина посередиие стенки.

вых и чистовой клетей и сравнительно небольшое обжатие у их основания. Соответственно этому вытяжка открытых фланцев всех калибров, за исключением третьего (сопряженного), значительно больше, чем вытяжка закрытых фланцев. Принятая величина высотной осадки в закрытых фланцах лишь в незначительной степени способствует выравниванию коэффициентов вытяжки в отдельных элементах калибров.

Вытяжка стенки в черновых калибрах также значительно меньше, чем вытяжка открытых фланцев, но больше, чем вытяжка закрытых. В предчистовом и чистовом калибрах вытяжка стенки имеет минимальную величину, что способствует лучшему выполнению фланцев готового профиля. Такого соотношения коэффициентов вытяжки между элементами профиля особенно важно добиваться для крупных балок, в которых площадь стенки равна почти половине площади всего профиля.

## 11. ПРОКАТКА И КАЛИБРОВКА ШИРОКОПОЛОЧНЫХ И ОБЛЕГЧЕННЫХ БАЛОК

Широкополочные балки по ГОСТ 6183—52 делят на балочные, легкие колонные и тяжелые колонные профили. Балочные профили $20Б_2$—$100Б_7$ (рис. 159, *а*) имеют высоту 200—1047,6 *мм* при ширине полок 120—408 *мм*, масса 1 *м* профиля колеблется в пре-

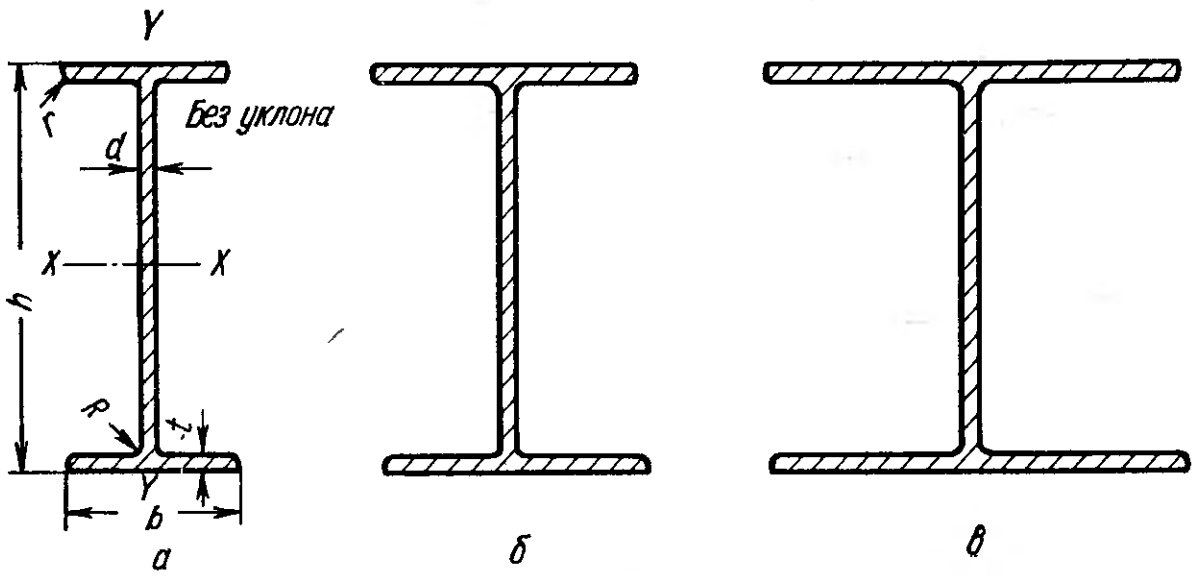



Рис. 159. Виды профилей широкополочных балок:
*а* — балочный; *б* — колонный легкий; *в* — колонный тяжелый

делах 21—454 *кг*. Основной особенностью широкополочных балок является отсутствие внутреннего уклона фланцев, т. е. внутренние и наружные грани фланцев параллельны. В ГОСТе предусмотрено производство широкополочных балок одного номера, имеющих различную толщину стенки и полок и, следовательно, разную массу 1 *м* профиля. В обозначении таких балок стоят соответствующие индексы, например 30Б, $30Б_1$, $30Б_2$, 100Б, $100Б_1$ . . . . $100Б_7$.

Легкие колонные профили 27Л—70$Л_2$ (рис. 159, *б*) имеют высоту 265,7—724 *мм*, ширину полок 220—421,8 *мм* и массу 1 *м* профиля 43,9—263 *кг*. Ширина полки балочного профиля 70$Б_2$ составляет 275,5 *мм*, а масса 1 *м* профиля равна 155 *кг*.

Тяжелые колонные профили 20Т—40$Т_{14}$ (рис. 159, *в*) имеют самые широкие полки, размеры которых в отдельных случаях достигают размеров по высоте. Так, при высоте 203—541 *мм* ширина полок изменяется в пределах 200—417 *мм*. Масса 1 *м* тяжелых колонных профилей изменяется в пределах 36,4—652 *кг*.

Широкополочные балки имеют значительно большие моменты инерции и моменты сопротивления по сравнению с обычными балками. Равнопрочные широкополочные балки приблизительно на 10% легче балок нормального сортамента.

Широкополочные балки можно получать тремя способами:

1) сваркой (или клепкой);

2) прокаткой на обычных рельсобалочных станах в горизонтальных валках с применением универсальных клетей;

3) прокаткой на специальных прокатных станах с главными универсальными и вспомогательными клетями дуо.

Сваркой или клепкой можно получать балки различной формы и размеров. Основными недостатками этого способа являются трудоемкость процесса и высокая стоимость продукции. Составные балки изготавливают из листового проката или универсальных полос. Во избежание деформации балок после сварки полки их делают из специальных профилей (типа низкотаврового), прокатываемых на крупносортных станах.

Прокаткой на обычных станах с применением универсальных клетей получают двутавровые балки с параллельными полками.

Широкополочные балки всего сортамента прокатывают на специальных станах. Принцип прокатки широкополочных балок был заложен в стане Грея, установленном в 1902 *г.* в Люксембурге. Универсальный стан имеет два горизонтальных и два вертикальных валка, расположенных в одной вертикальной плоскости. В непосредственной близости от этой так называемой главной клети устанавливают вспомогательную дуо-реверсивную клеть, предназначенную для вертикального обжатия кромок полок (рис. 160). Применение главной клети с приводными горизонтальными и холостыми вертикальными валками обеспечивает получение балок с широкими полками и более высокого качества, так как все части профиля подвергаются обжатию почти одновременно.

Калибровка широкополочных балок, прокатываемых на универсальных станах, имеет некоторые особенности. Заготовка, поступающая с блюминга на собственно балочный стан, должна иметь симметричные верхние и нижние фланцы и необходимое соотношение размеров стенки и полок. Это особенно важно, так как при прокатке на универсальных клетях коэффициенты вытяжки различных элементов профиля должны быть примерно равными.

Поэтому прокатку на блюминге производят в открытых фасонных симметричных калибрах (обычно на валках имеются два таких калибра). Первые проходы и осадку профиля по ширине производят в ящичном калибре.

При прокатке широкополочных балок и балок с параллельными полками на станах линейного типа, имеющих универсальные клети, в последние также должен задаваться строго симметричный раскат. Для этого используют открытые балочные калибры.

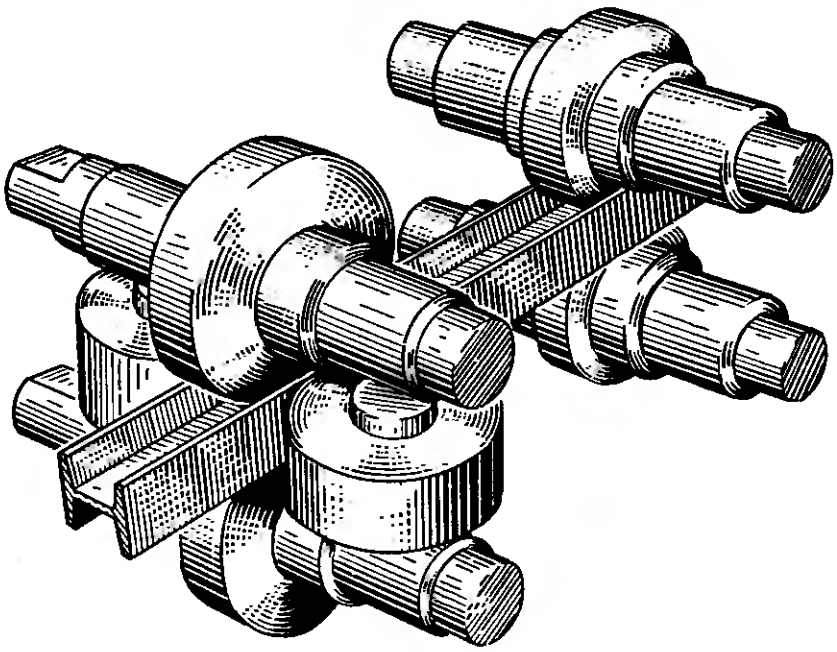


Рис. 160. Схема прокатки широкополочной балки в главной универсальной и вспомогательной клети дуо

В обжимной клети один проход делают в ящичном калибре, три — в закрытом разрезном и по одному проходу — в двух закрытых балочных калибрах. В черновой клети два прохода делают в обычных двутавровых закрытых калибрах, а третий — в открытом контрольном. После этого симметричный раскат передают к универсальной клети.

Захват металла горизонтальными и вертикальными валками универсальной клети происходит более равномерно, чем при прокатке в обычных закрытых или открытых балочных калибрах. Значения длины очага деформации

$$l_д = \sqrt{R\Delta h}$$

по стенке и по фланцам очень близки, так как большему диаметру горизонтальных валков соответствует меньшее абсолютное обжатие стенки и меньшему диаметру вертикальных валков соответствует большее абсолютное обжатие фланцев.

Во избежание нежелательного перетекания металла в очаге деформации из одного элемента профиля в другой при расчете

калибровки следует выдерживать равенство коэффициентов вытяжки фланцев $\mu_{фл}$ и стенки $\mu_{ст}$:

$$\mu_{фл} = \mu_{ст}.$$

Рассчитывая калибровку против хода прокатки, определяют отношение толщины полки $t_2$ к толщине стенки $d_2$ в готовом про-

Таблица 78

**Схема обжатий в универсальных клетях при прокатке широкополочной балки 100Б (ГОСТ 6183—52)**

| Линия стана | Номер прохода | Шейка | | | Фланцы | | | Полный профиль | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $d$, мм | $\Delta d$, мм | $\varepsilon_{ш}$, % | $t$, мм | $\Delta t$, мм | $\varepsilon_{фл}$, % | $\varepsilon_{фл} - \varepsilon_{ш}$, % | $F$, см² | $\mu$ |
| Заготовка | 0 | 88 | | | 170 | | | | 2167 | |
| 1 | 1 | 81,5 | 6,5 | 7,4 | 156,5 | 13,5 | 8,0 | 0,6 | 1985 | 1,09 |
| | 2 | 72,5 | 9,0 | 11,0 | 138,5 | 18 | 11,5 | 0,5 | 1766 | 1,12 |
| | 3 | 63,5 | 9,0 | 12,4 | 120,0 | 18,5 | 13,4 | 1,0 | 1530 | 1,16 |
| | 4 | 55,0 | 8,5 | 13,4 | 102,5 | 17,5 | 14,6 | 1,2 | 1321 | 1,16 |
| | 5 | 48,0 | 7,0 | 12,7 | 88,0 | 14,5 | 14,2 | 1,5 | 1133 | 1,17 |
| | 6 | 42,0 | 6,0 | 12,5 | 76,0 | 12,0 | 13,6 | 1,1 | 989 | 1,15 |
| | 7 | 36,5 | 4,5 | 10,7 | 66,7 | 9,3 | 12,2 | 1,5 | 866 | 1,14 |
| | 8 | 33,5 | 4,0 | 10,7 | 58,7 | 8,0 | 12,0 | 1,3 | 771 | 1,12 |
| | 9 | 30,0 | 3,5 | 10,4 | 51,9 | 6,8 | 11,6 | 1,2 | 679 | 1,14 |
| 2 | 10 | 27,0 | 3,0 | 10,0 | 46,0 | 5,9 | 11,4 | 1,4 | 607 | 1,12 |
| | 11 | 24,5 | 2,5 | 9,3 | 41,1 | 4,9 | 10,7 | 1,4 | 544 | 1,12 |
| | 12 | 22,3 | 2,2 | 9,0 | 36,8 | 4,3 | 10,5 | 1,5 | 491 | 1,11 |
| | 13 | 20,3 | 2,0 | 9,0 | 33,0 | 3,8 | 10,3 | 1,3 | 440 | 1,12 |
| | 14 | 18,6 | 1,7 | 8,4 | 29,7 | 3,3 | 10,0 | 1,6 | 400 | 1,10 |
| | 15 | 17,2 | 1,4 | 7,5 | 27,0 | 2,7 | 9,1 | 1,6 | 364 | 1,10 |
| | 16 | 16,1 | 1,1 | 6,4 | 24,9 | 2,1 | 7,8 | 1,4 | 339 | 1,08 |
| 3 | 17 | 15,3 | 0,8 | 5,0 | 23,3 | 1,6 | 6,4 | 1,4 | 317 | 1,07 |
| | 18 | 14,7 | 0,6 | 3,9 | 22,0 | 1,3 | 5,6 | 1,7 | 302 | 1,05 |
| | 19 | 14,2 | 0,5 | 3,4 | 20,8 | 1,2 | 5,4 | 2,0 | 289 | 1,04 |
| 4 | 20 | 13,8 | 0,4 | 2,8 | 19,8 | 1,0 | 4,8 | 2,0 | 277 | 1,04 |

филе и затем стараются сохранять его постоянным во всех проходах на универсальных клетях:

$$\frac{t_2}{d_2} = \cdots = \frac{t_n}{d_n} = \text{const}. \qquad (110)$$

Калибровка широкополочных балок рассмотрена в работах [7, 21, 42].

Намечаемый к установке в СССР универсальный стан для прокатки широкополочных балок будет состоять из блюминга 1500, обжимной реверсивной клети 1500 и собственно универсального стана, состоящего из четырех линий: черновой, средней, предчистовой и чистовой.

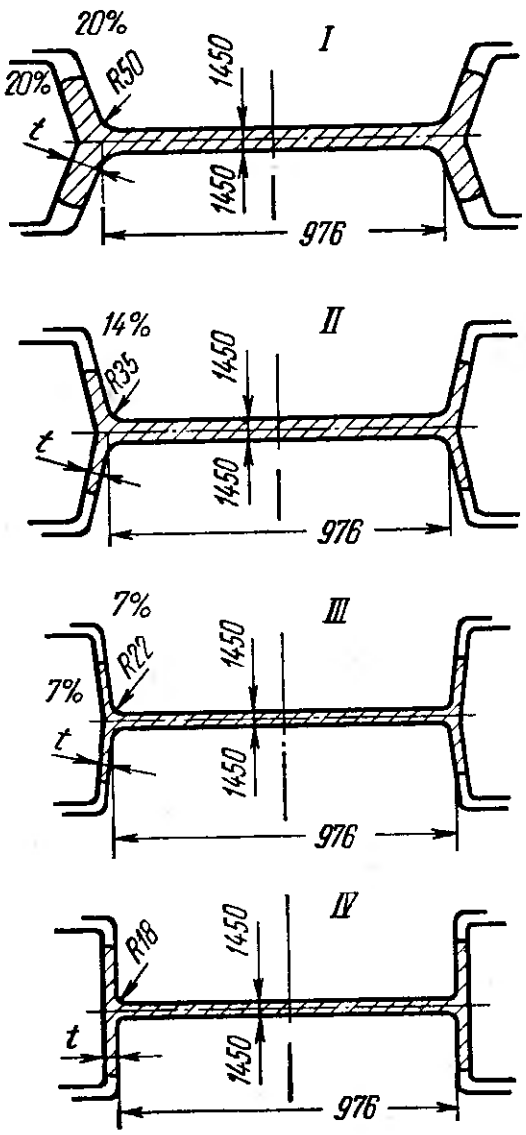



Рис. 161. Валки главных клетей четырех линий универсального стана для прокатки широкополочной балки 100Б

В каждой линии — черновой, средней и предчистовой — имеется универсальная клеть с горизонтальными $D_{гор} = 1250 \div 1450$ *мм* и вертикальными валками $D_{верт} = 950 \div 1100$ *мм*.

Чистовая линия представляет собой универсальную клеть.

В табл. 78 приведена схема обжатий[1] в универсальных клетях при прокатке широкополочной балки 100Б в соответствии с ГОСТ 6182—52 (рис. 161). Балку 100Б прокатывают из фасонной заготовки, получаемой с блюминга и обжимной реверсивной клети. В четырех линиях универсального стана прокатку ведут за 20 проходов. По фланцам обжатие принимают несколько большим, чем по шейке, во избежание образования волны на шейке.

В ГОСТ 6184—52 предусмотрено производство семи размеров (№ 16—30) тонкостенных двутавровых балок. Эти балки характеризуются очень тонкой стенкой (2,8—4,2 *мм*), небольшой шириной полок (55—80 *мм*) и малой массой 1 *м* профиля (7,86—18,2 *кг*). Ужесточены допускаемые отклонения по высоте ($\pm 2{,}5$ *мм*), по ширине полок ($\pm 1{,}5$ *мм*) и по толщине стенки и полок ($\pm 0{,}3$ *мм*).

---

[1] Н. Ю. Вавилов. Исследование закономерностей процесса прокатки широкополочных балок в универсальной клети, Харьков, 1968.

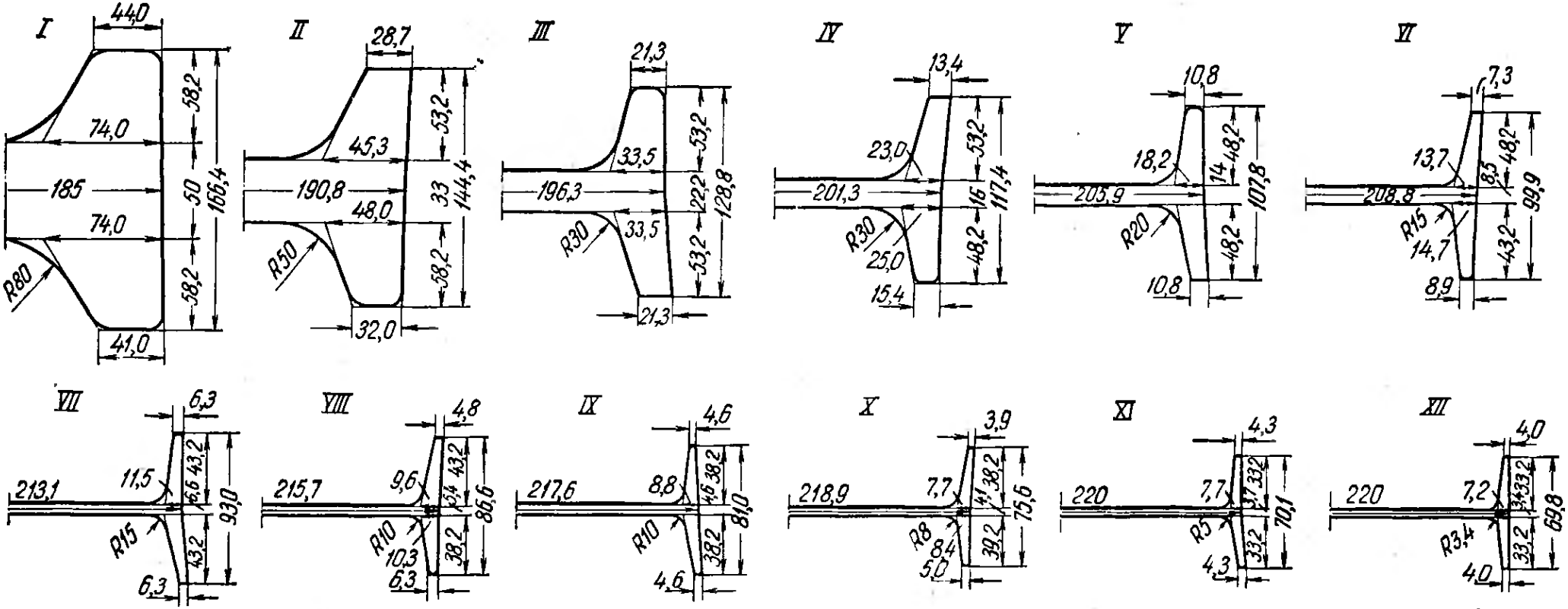



Рис. 162. Калибровка для прокаткн тонкостенной балки № 22 на непрерывном крупносортном стане 450

Применение облегченных (тонкостенных) балок в металлических конструкциях, в гражданском строительстве, дает экономию металла до 20% по сравнению с обычными балками.

Прокатка тонкостенных балок на станах линейного типа затруднена, так как из-за малой толщины стенки сильно снижается температура конца прокатки, увеличиваются давление металла на валки и деформация деталей рабочих клетей.

Освоение производства облегченных балок намечено на непрерывном крупносортном стане 450. На рис. 162 приведена калибровка тонкостенной балки № 22, разработанная для прокатки ее на стане 450.

Глава X

# ПРОКАТКА И КАЛИБРОВКА ШВЕЛЛЕРОВ

## 1. ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОФИЛЯ

Швеллеры (или корытообразную сталь) по ГОСТ 8240—56 применяют в машиностроении и строительстве так же широко, как и двутавровые балки. Кроме этого, прокатывают специальный корытообразный профиль в соответствии с ГОСТ 5422—50 для тракторостроения.

Характеристика швеллеров, прокатываемых в соответствии с ГОСТ 8240—56, приведена в табл. 79. Профиль швеллера и обозначение размеров показаны на рис. 163. Уклон внутренних

Таблица 79

**Характеристика швеллеров по ГОСТ 8240—56**

| Номер профиля | Размеры, *мм* | | | | | | Площадь поперечного сечения *см²* | Масса 1 *м* профиля, *кг* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | *h* | *b* | *d* | *t* | *R* | *r* | | |
| 5 | 50 | 32 | 4,4 | 7,0 | 6,0 | 2,5 | 6,16 | 4,84 |
| 6,5 | 65 | 36 | 4,4 | 7,2 | 6,0 | 2,5 | 7,51 | 5,90 |
| 8 | 80 | 40 | 4,5 | 7,4 | 6,5 | 2,5 | 8,92 | 7,05 |
| 10 | 100 | 46 | 4,8 | 7,5 | 7,0 | 3,0 | 11,90 | 8,59 |
| 12 | 120 | 52 | 5,0 | 7,7 | 7,5 | 3,0 | 13,30 | 10,4 |
| 14 | 140 | 58 | 5,0 | 8,0 | 8,0 | 3,0 | 15,60 | 12,3 |
| 14а | 140 | 62 | 5,0 | 8,5 | 8,0 | 3,0 | 17,00 | 13,3 |
| 16 | 160 | 64 | 5,0 | 8,3 | 8,5 | 3,5 | 18,10 | 14,2 |
| 16а | 160 | 68 | 5,0 | 8,8 | 8,5 | 3,5 | 19,50 | 15,3 |
| 18 | 180 | 70 | 5,0 | 8,7 | 9,0 | 3,5 | 20,70 | 16,3 |
| 18а | 180 | 74 | 5,0 | 9,2 | 9,0 | 3,5 | 22,20 | 17,4 |
| 20 | 200 | 76 | 5,2 | 9,0 | 9,5 | 4,0 | 23,40 | 18,4 |
| 20а | 200 | 80 | 5,2 | 9,6 | 9,5 | 4,0 | 25,20 | 19,8 |
| 22 | 220 | 82 | 5,3 | 9,6 | 10,0 | 4,0 | 26,70 | 21,0 |
| 22а | 220 | 87 | 5,3 | 10,2 | 10,0 | 4,0 | 28,80 | 22,6 |
| 24 | 240 | 90 | 5,5 | 10,0 | 10,5 | 4,0 | 30,60 | 24,0 |
| 24а | 240 | 95 | 5,6 | 10,7 | 10,5 | 4,0 | 32,90 | 25,8 |
| 27 | 270 | 95 | 6,0 | 10,5 | 11 | 4,5 | 35,20 | 27,7 |
| 30 | 300 | 100 | 6,5 | 11,0 | 12 | 5 | 40,50 | 31,8 |
| 33 | 330 | 105 | 7,0 | 11,7 | 13 | 5 | 46,50 | 36,5 |
| 36 | 360 | 110 | 7,5 | 12,6 | 14 | 6 | 53,40 | 41,9 |
| 40 | 400 | 115 | 8,0 | 13,5 | 15 | 6 | 61,50 | 48,3 |

граней полок составляет до 10%, уклон наружной грани каждого фланца швеллера не должен превышать 1,5%, а по требованию заказчика — не более 1,25%.

В ГОСТ 8240—56 предусмотрена прокатка швеллеров высотой 50—400 *мм* (№ 5—40). Швеллеры № 14, 16, 18, 20, 22 и 24 имеют два профиля — основной и литерный. Литерные профили, в обозначении которых рядом с номером швеллера ставится буква «а», отличаются от основных несколько увеличенными размерами ширины и средней толщины фланцев (полок). В связи с этим литерные профили имеют увеличенные площадь попе-

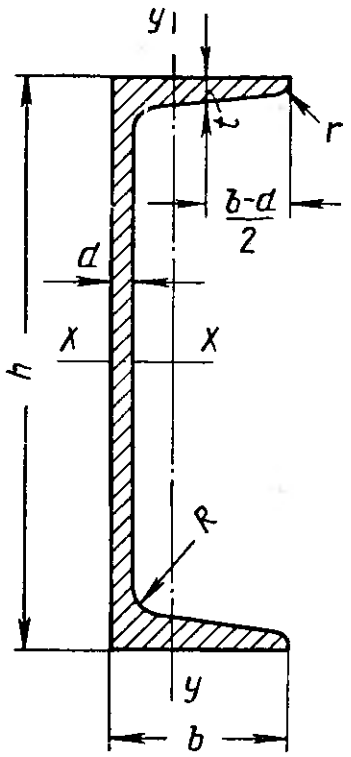



Рис. 163. Профиль швеллера

Таблица 80

**Допускаемые отклонения по размерам швеллеров (ГОСТ 8240—56)**

| Номер профиля | Допускаемые отклонения *мм* | |
|---|---|---|
| | по высоте | по ширине |
| 5—8 | ±1,5 | ±1,5 |
| 10—14 | ±2,0 | ±2,0 |
| 16—18 | ±2,5 | ±2,5 |
| 20—30 | ±3,0 | ±3,0 |
| 33—40 | ±3,5 | ±3,5 |

речного сечения и массу 1 *м* и лучшие прочностные характеристики.

Швеллеры № 5—8 поставляют длиной 5—12 *м*, № 10—18 — длиной 5—19 *м*, а № 20—40 — длиной 6—19 *м*. По требованию заказчика швеллеры поставляют в мерных и кратных длинах. Допускаемые отклонения составляют +40 *мм* при длине швеллеров до 8 *м* включительно и +80 *мм* при длине >8 *м*. Допускаемые отклонения по размерам швеллеров приведены в табл. 80.

Допускаемые отклонения по массе в пределах от +3 до —5% контролирует завод-изготовитель взвешиванием партии швеллеров массой 20—60 *т* от каждых 400—500 *т* проката или взвешиванием кусков швеллеров длиной не менее 300 *мм*, отбираемых при прокатке не реже, чем через каждые 100 прокатанных полос.

Допускается уменьшение толщины фланцев швеллера $t$ на величину не более $0{,}06t$. Толщину фланцев швеллеров контролируют по калибрам в валках при их расточке. Радиус притупления углов наружных кромок фланцев и радиус наружного закругления допускаются $\leqslant 0{,}3t$ *мм* для швеллеров № 5—20 и $\leqslant 3$ *мм* для швеллеров № 22—40.

На облегченные (тонкостенные) швеллеры имеется ГОСТ 6185—52. Эти профили еще не прокатывают по тем же причинам, из-за которых не прокатывают облегченные двутавровые балки.

## 2. СПОСОБЫ ПРОКАТКИ ШВЕЛЛЕРОВ

Известно несколько методов калибровки швеллеров. Все их можно свести к следующим основным: калибровка валков по балочному методу, корытный метод (рис. 164, *а*), современный метод

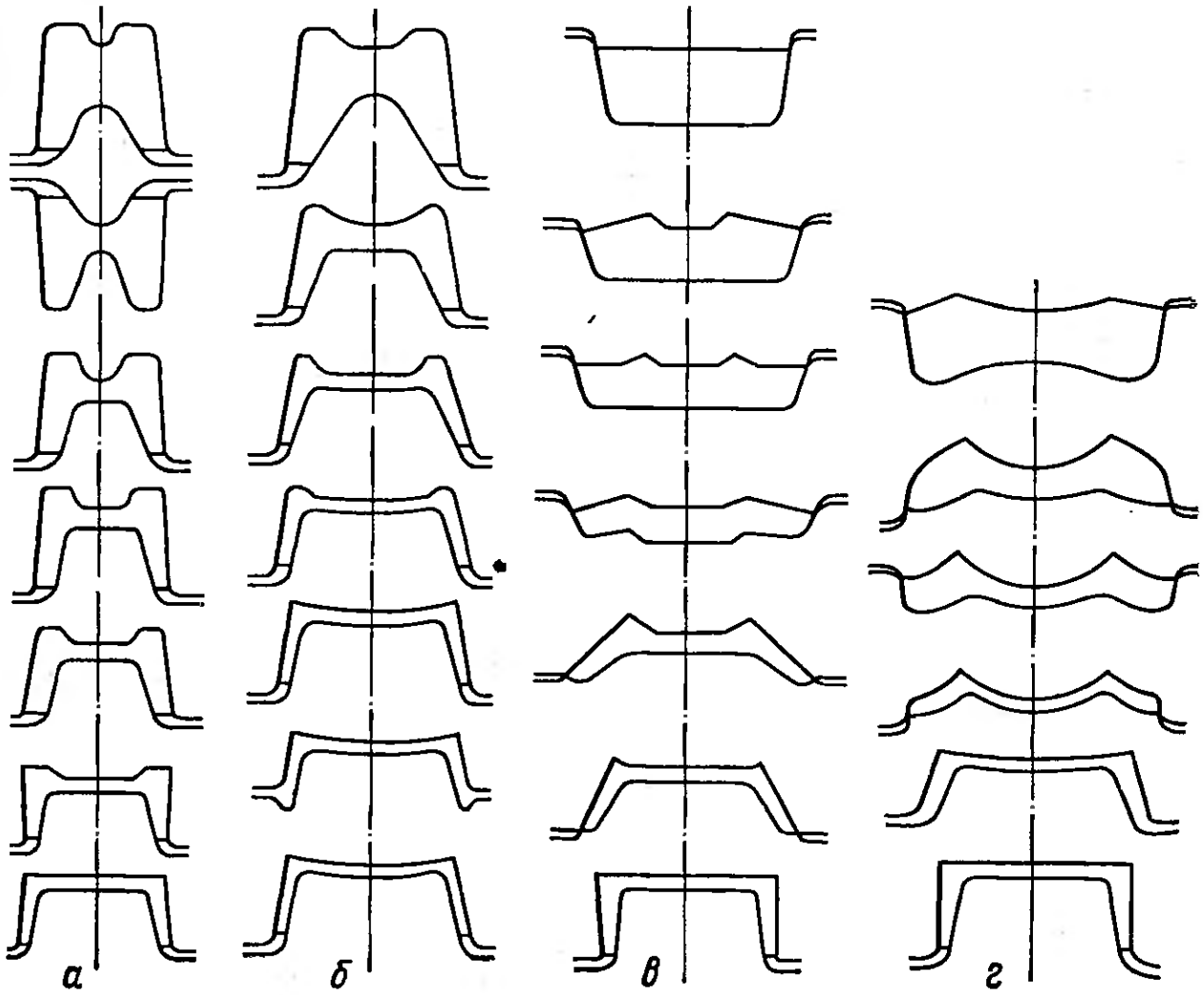



Рис. 164. Способы прокатки швеллеров

(при калибровке *а* в предпоследием калибре разъем валков следует предусматривать по ложиым флаицам)

с увеличенным уклоном фланцев и изогнутой стенкой (рис. 164, *б*), метод сгибания фланцев (рис. 164, *в*) и развернутая калибровка (рис. 164, *г*).

При калибровке валков по балочному методу разрезной и несколько первых черновых калибров используют для прокатки двутавровых балок и швеллеров одних номеров. Балочный метод предусматривает наличие открытых и закрытых фланцев в черновых калибрах, но в этом случае различают действительные фланцы, в которых формируются фланцы швеллера, и ложные

фланцы (противофланцы). Ложные фланцы служат для питания действительных фланцев металлом и сохранения температуры углов швеллера. Ложные фланцы уменьшаются по мере приближения к предчистовому калибру, в чистовом калибре они отсутствуют. В отличие от балок швеллеры прокатывают без строгого чередования открытых и закрытых фланцев. Обычно все действительные фланцы делают открытыми, и только в одном-двух контрольных калибрах предусматривают закрытые или полузакрытые фланцы.

Основным преимуществом рассматриваемого метода калибровки является возможность использования разрезных и первых черновых калибров для прокатки швеллера и для прокатки двутавровой балки того же номера. Это позволяет сократить парк валков и время перевалки при переходе с одного профиля на другой. На некоторых заводах одни и те же разрезные калибры применяют для прокатки двух смежных швеллеров и двух балок тех же номеров.

Недостаток балочного метода калибровки заключается в малом уклоне наружных граней фланцев, что не дает возможности восстанавливать ширину калибров при переточках, снижает общее число переточек и, следовательно, увеличивает расход валков. Кроме того, излишняя высота ложных фланцев в первых по ходу прокатки калибрах приводит к увеличению расхода энергии, затрачиваемой на деформацию металла. Малый выпуск способствует быстрому износу фланцев калибров и ухудшает условия работы проводок. Наблюдаются частые случаи откола буртов из-за повышенного бокового давления; ограничена возможность уменьшения зазора между валками по мере износа калибров, что затрудняет получение толщины стенки профиля заданных размеров или в пределах минусового допуска.

В настоящее время для прокатки швеллеров применяют отдельные калибры независимо от балочных калибров, причем противофланцы в разрезном калибре делают существенно меньшими, чем действительные фланцы. Такой метод прокатки швеллеров называют корытным (см. рис. 164, *а*).

Наибольшее распространение сейчас получил метод, отличающийся увеличенным уклоном фланцев и изогнутой стенкой при условии сохранения прямого угла между стенкой и полкой раската; размеры ложных фланцев в этом случае меньше (см. рис. 164, *б*). При калибровке по этому методу можно более интенсивно деформировать металл, что сокращает общее число проходов. Износ калибров с увеличением их выпуска уменьшается. Полное восстановление ширины калибров при сравнительно небольшом съеме по диаметру снижает расход валков. Подробно этот метод будет рассмотрен ниже.

Калибровка валков методом сгибания (см. рис. 164, *в*) совмещает прокатку сначала в калибрах полосового типа, а затем в фа-

сонных калибрах с постепенным сгибанием фланцев. Разновидностью этой схемы является полосовая прокатка во всех калибрах, кроме чистового, в котором производится сгибание профиля.

Преимущества этого способа: более равномерное обжатие всех элементов профиля и меньшая глубина среза калибров, благодаря чему увеличивается износостойкость и прочность валков. Следует, однако, отметить,что сгибание полосы в швеллер, даже если в местах сгиба предусмотрены утолщения для образования углов швеллера, является трудновыполнимой операцией, требующей тщательной настройки вводной арматуры. На боковой поверхности швеллера остаются заметные риски от буртов валков, размеры профиля неустойчивы. Задача полосы в чистовой калибр затруднена. Поэтому прокатка швеллера по методу сгибания на отечественных заводах распространения не получила.

Развернутая калибровка швеллеров (см. рис. 164, *г*) в практике прокатного производства известна давно, но теоретически обоснованная методика расчета калибров предложена Д. И. Старченко в 1952 г. [11]. Эта калибровка благодаря отсутствию бокового обжатия по фланцам позволяет: а) интенсифицировать процесс деформации металла в калибрах; б) сократить число фасонных калибров; в) устранить опасность образования складок у основания фланцев; г) добиться полной восстановимости размеров калибров в процессе переточек валков; д) относительно снизить степень износа калибров за счет уменьшения разности окружных скоростей в различных точках калибра; е) создать более равномерный режим деформации в различных элементах профиля.

Применение развернутой калибровки швеллера № 12 на Верхне-Салдинском металлургическом заводе позволило сдавать около 75% металла по минусовым допускам. Однако, несмотря на очевидные преимущества такой калибровки, этот способ не получил широкого распространения из-за того, что при развертке фланцев швеллера ширина калибра увеличивается и на бочке валка невозможно расположить необходимое число калибров.

На заводе «Азовсталь» успешно применяют прокатку швеллеров по развернутой калибровке с предчистовым контрольным калибром.

На практике в каждом конкретном случае в зависимости от типа стана следует выбирать тот или иной метод прокатки швеллера.

### 3. МЕТОДЫ РАСЧЕТА КАЛИБРОВКИ ШВЕЛЛЕРОВ

Расчет калибров швеллера по балочному и корытному способам сходен с расчетом калибров балок. Так, например, по методу Б. П. Бахтинова [2] высоту фланцев рассчитывают по тем же формулам, что и при расчете калибровки балок.

Толщину стенки по отдельным калибрам определяют по формуле

$$d' = kd,$$

где $k$ — коэффициент деформации для стенки, который выбирают на основе практических данных.

Например, при расчете калибровки швеллера № 16 за восемь проходов [2] принимают следующие значения коэффициентов деформации по калибрам (считая против хода прокатки):

$$k_{\text{общ}} = 5{,}3 = 1{,}1 \cdot 1{,}33 \cdot 1{,}25 \cdot 1{,}35 \cdot 1{,}4 \cdot 1{,}265 \cdot 1{,}42.$$

Второй и шестой калибры являются контрольными, а восьмой калибр — разрезным, в котором коэффициент вытяжки вычисляют после определения исходного сечения прямоугольной заготовки.

Таким образом, зная коэффициенты деформации по калибрам, находим толщину стенки калибра.

Коэффициенты обжатий высоты и толщины в открытых фланцах определяют так же, как и при калибровке балок. Для этого находят коэффициент обжатия высоты в открытом фланце

$$\eta_{\text{о}} = \frac{h'_{\text{с. з}}}{h_{\text{с. о}}} = \frac{h'_{\text{з}} + \frac{d'}{2}}{h_{\text{о}} + \frac{d}{2}} \qquad (111)$$

и коэффициент обжатия толщины

$$\lambda_{\text{о}} = \frac{k}{\eta_{\text{о}}}. \qquad (112)$$

Для определения размеров ложных фланцев рекомендуются следующие формулы:

$$h'_{\text{л. фл}} = (0{,}03 \div 0{,}05)\, h' \cdot (n - 1); \qquad (113)$$

$$b'_{\text{л. фл}} = (1{,}0 \div 1{,}3)\, b; \qquad (114)$$

$$a'_{\text{л. фл}} = (0{,}6 \div 0{,}65)\, b'_{\text{л. фл}}, \qquad (115)$$

где $n$ — порядковый номер калибров против хода прокатки (обозначения со штрихом относятся к размерам задаваемого, т. е. следующего по ходу калибровки, профиля).

В работе [2] приведен пример расчета калибровки швеллера № 16 на стане 500.

В работе [7] предложен расчет калибровки швеллера № 12 по графоаналитическому методу, согласно которому предварительно строят графики распределения коэффициентов деформации элементов по отдельным калибрам. Для построения этих графиков необходимо иметь практические данные применительно к конкретному стану.

Расчет калибров швеллеров по методу Б. В. Мерекина [7] сводится к установлению коэффициентов подобия калибров. Коэффициент подобия профиля $k_п$ представляет собой отношение суммарного коэффициента вытяжки фланцев к суммарному коэффициенту вытяжки стенки

$$k_п = \frac{\left(\frac{F_{фл}}{F_{ст}}\right)_n}{\frac{F_{фл}}{F_{ст}}} = \frac{\mu_{фл_1}\mu_{фл_2}\mu_{фл_3} \cdot \cdot \cdot \mu_{фл_{n-1}}}{\mu_{ст_1}\mu_{ст_2}\mu_{ст_3} \cdot \cdot \cdot \mu_{ст_{n-1}}}, \qquad (116)$$

где $\mu_{фл}$ — коэффициент вытяжки фланцев;

$\mu_{ст}$ — коэффициент вытяжки стенки.

В работе [7] приведен пример расчета швеллера № 24 по методу Б. В. Мерекина.

По коэффициентам подобия определяют площади действительных и ложных фланцев по калибрам. Для определения площади стенки используют практические данные обжатий и уширения.

Расчет калибров швеллеров по методу И. И. Кучко [7] сводится к использованию предлагаемых им графиков:

а) графика зависимости среднего коэффициента вытяжки от размера профиля;

б) графика изменения коэффициента деформации стенки швеллера по проходам;

в) графика зависимости отношения коэффициентов обжатия от размера профиля.

В работе [7] приведен пример расчета калибровки швеллера № 40 по методу И. И. Кучко.

Д. И. Старченко [11] разработал развернутую калибровку швеллера, основанную на последовательном сгибании полосы по ходу прокатки.

Калибровка по развернутому методу сводится к следующему. Определяют размеры чистового швеллерного калибра, пользуясь коэффициентом термического расширения, равным 1,012—1,015, с учетом минусовых допусков.

По размерам чистового калибра определяют размеры предчистового калибра, пользуясь коэффициентами обжатия по стенке $\lambda = 1{,}1 \div 1{,}15$.

Предчистовой калибр принимают полуразвернутым с уклоном фланцев до 20%. Третий и последующие против хода прокатки калибры являются развернутыми, в которых предусматривают значительный коэффициент обжатия $\lambda \approx 1{,}7$. В развернутом калибре стенка и фланцы имеют прямые участки (как при прокатке уголка) и изогнутые участки с радиусом изгиба $R$, которые определяют из геометрических соотношений.

Коэффициент обжатия по стенке составляет $\lambda \approx 1{,}7$, для фланцев коэффициенты обжатия у края принимают такие же, как

и для стенки, а у основания коэффициенты вытяжки принимают меньшие ($\lambda \approx 1{,}4$). В работе [11] приведены подробные расчеты калибровки для швеллера № 12.

## 4. ОСНОВЫ РАСЧЕТА КАЛИБРОВКИ ШВЕЛЛЕРОВ

### *Исходная заготовка*

Швеллеры № 5—40 прокатывают из заготовки квадратного и прямоугольного сечения, поступающей с блюминга или с заготовочного стана. Только на крупносортный зигзагообразный стан 500 для прокатки швеллеров № 14—18 поступают фасонные заготовки балочной формы с заготовочного стана 900.

Как и при прокатке двутавровых балок, исходную заготовку задают непосредственно в разрезной калибр или предварительно прокатывают в прямоугольных калибрах до необходимого поперечного сечения, зависящего от номера швеллера. Так, если для прокатки швеллера № 5 требуется заготовка сечением 58 × × 58 *мм*, то для наиболее крупного швеллера № 40 необходим блюм сечением 280×350 *мм* (табл. 81).

Таблица 81

**Размеры сечения заготовки для прокатки швеллеров в соответствии с ГОСТ 8240—56**

| Номер швеллера | Сечение исходной заготовки, *мм* | Сечение заготовки перед разрезным калибром, *мм* | Ширина флаица, *мм* | Отношение высоты заготовки к ширине флаица |
|---|---|---|---|---|
| 5 | 58×58 | 58×58 | 32 | 1,81 |
| 8 | 180×180 | 78×78 | 40 | 1,95 |
| 8 | 106×106 | 90×66 | 40 | 2,25 |
| 12 | 140×120 | 155×90 | 52 | 2,98 |
| 14 | 180×88×133 * | 180×88×133 * | 58 | 3,10 |
| 14 | 150×115 | 150×115 | 58 | 2,59 |
| 16 | 250×250 | 270×160 | 64 | 4,22 |
| 18 | 190×98×133 * | 190×98×133 * | 70 | 2,72 |
| 20 | 168×160 | 168×160 | 76 | 2,21 |
| 24 | 280×220 | 280×220 | 90 | 3,11 |
| 30 | 280×245 | 255×255 | 100 | 2,55 |
| 30 | 330×320 | 340×205 | 100 | 3,40 |
| 30 | 320×240 | 320×240 | 100 | 3,20 |
| 40 | 280×350 | 280×350 | 115 | 2,43 |

* Фасонные заготовки.

Из табл. 81 видно, что отношение высоты заготовки, задаваемой в разрезной калибр, к ширине фланца швеллеров находится в пределах 1,8—4,2, тогда как для швеллеров, прокатываемых до этого в соответствии с ОСТ 10017—39, указанное отношение,

как правило, составляло 1,5—1,8. Изменение отношения высоты заготовки к ширине фланца готового профиля объясняется тем, что для получения более широких и тонких фланцев швеллеров в соответствии с ГОСТ 8240—56 потребовалась более высокая заготовка.

В зависимости от номера швеллера и типа стана применяют открытые и закрытые разрезные калибры с острыми или тупыми разрезающими гребнями.

### *Действительные и ложные фланцы*

Швеллер напоминает двутавровую балку с фланцами, расположенными с одной стороны стенки (рис. 165, *а*). Фланцы у швеллеров тоньше и шире, чем у балок того же номера. Поэтому черновой калибр для прокатки швеллера состоит из действительных фланцев, ложных фланцев и стенки (рис. 165, *б*). В стенке калибра происходит прямое обжатие профиля. В действительных фланцах формируются полки швеллера. Действительные фланцы, как правило, открытые, образованные двумя валками, и только в контрольных калибрах они могут быть закрытыми или полузакрытыми. Характер деформации металла в действительных фланцах аналогичен деформации в открытых фланцах балочных калибров.

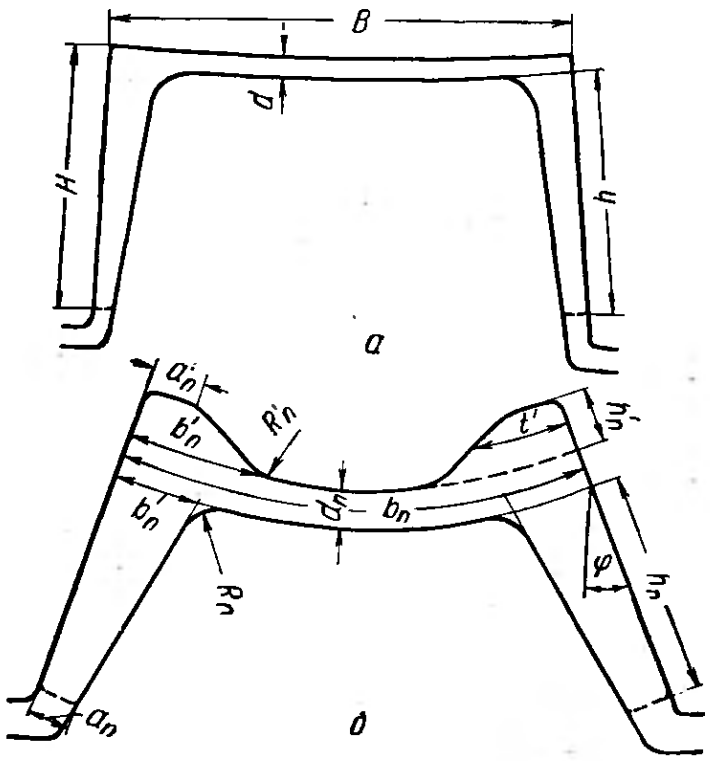



Рис. 165. Калибры для прокатки швеллеров: *а* — чистовой; *б* — черновой

Ложные фланцы предназначены для создания дополнительного объема металла во фланцах. Они представляют собой уменьшающиеся по ходу прокатки фланцы. Массивные ложные фланцы лучше сохраняют тепло и предохраняют углы профиля от охлаждения и тем самым от образования остаточных внутренних напряжений в готовом прокате. При прокатке металл из ложных фланцев частично перетекает в стенку и действительные фланцы, способствуя выполнению углов профиля и получению тонких и длинных фланцев. Однако наличие ложных фланцев приводит к увеличению неравномерности деформации. Поэтому при расчете калибровки швеллера необходимо принимать минимальные размеры этих фланцев.

При прокатке швеллера заготовка вначале разрезается так же, как и при прокатке двутавровой балки. При прокатке только швеллеров (корытный метод) со стороны действительных фланцев врез делают больше, а со стороны ложных фланцев — меньше. Обычно площадь ложных фланцев в разрезном калибре составляет до 70% площади действительных фланцев, в чистовом калибре ложные фланцы отсутствуют. В промежуточных калибрах площади ложных фланцев принимают уменьшающимися по ходу прокатки от 70% до 0.

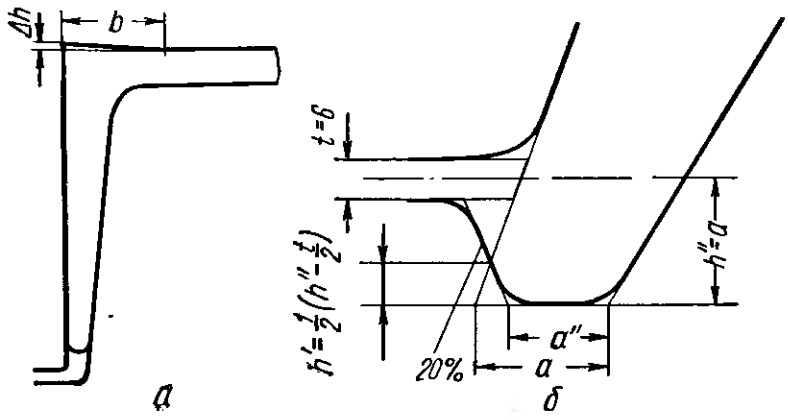


Рис. 166. Построение швеллерных калибров:
*а* — чистовой калибр; *б* — контрольный калибр

Некоторые исследователи считают, что наличие небольшого ложного фланца в чистовом калибре предупреждает утяжку внешних углов стенки готового профиля после охлаждения (особенно швеллеров больших размеров) и улучшает условия правки в холодном состоянии на правильной машине. Форма ложных фланцев на чистовом профиле представляет собой треугольник (рис. 166). Размеры его принимают в пределах:

$$h' = 0{,}15 \div 0{,}3 \text{ мм}; \tag{117}$$

$$b' = (1{,}25 \div 1{,}5)\, b. \tag{118}$$

Основные положения деформации металла в двутавровых калибрах справедливы и для прокатки швеллеров по балочной калибровке, в том числе и с увеличенными выпусками. При определении коэффициента деформации элементов швеллерного раската необходимо исходить из того, что часть обжимаемого металла из действительных и ложных фланцев перемещается в область стенки. При расчете калибров будем, как и для двутавровых балок, принимать отдельно коэффициенты вытяжки для действительного и ложного фланцев и для стенки.

Для определения площади ложных фланцев $q'_{фл}$ рекомендуется формула, полученная на основе данных хорошо работающих калибровок:

$$q'_{фл} = kq_{фл} = (0{,}03 \div 0{,}05)\left(1 + \frac{n-2}{m}\right) q_{фл}, \tag{119}$$

где $n$ — порядковый номер клети против хода прокатки;
$m = 1 \div 0{,}5$ — постоянный коэффициент, бо́льшие значения которого принимают для развернутых калибров и швеллеров крупных размеров, меньшие — для двутавровых калибров и малых швеллеров.

Из выражения (119) имеем

$$q_{фл} = \frac{q_{фл} + q'_{фл}}{1 + k}. \qquad (120)$$

Выражение (120) удобно применять, когда известна общая площадь действительного и ложного фланца и ее необходимо распределить между ними.

Приращение $\Delta h_{пр}$ высоты открытого фланца швеллерных калибров, как и в балочных калибрах, находится в пределах 0—2 *мм*. Приращение (выдавливание) высоты действительных фланцев $\delta$ в результате перетекания металла из области ложных фланцев можно принимать во всех калибрах, кроме чистового, в пределах 1—3 *мм*. Осадку $\varepsilon$ действительных фланцев в полузакрытых контрольных калибрах выбирают в пределах 4—6 *мм*.

Таким образом, высота действительного фланца $h_р$ в разрезном калибре равна

$$h_р = h_ч - \sum \Delta h_{пр} - \sum \delta + \sum \varepsilon, \qquad (121)$$

где $h_ч$ — высота фланца в чистовом калибре.

Для любого калибра имеем

$$h_{i-1} = h_i - \Delta h_{пр\,i} - \delta_i + \varepsilon_i. \qquad (122)$$

### *Контрольные калибры*

Прокатку швеллеров можно осуществить во всех калибрах с открытыми действительными фланцами. Однако для обеспечения заданной высоты фланцев готового профиля с учетом допусков применяют контрольные калибры, в которых фланцы немного обжимаются по высоте. Обычно применяют один или два контрольных калибра, один из которых обязательно является предчистовым. Второй контрольный калибр проектируют ближе к разрезному калибру.

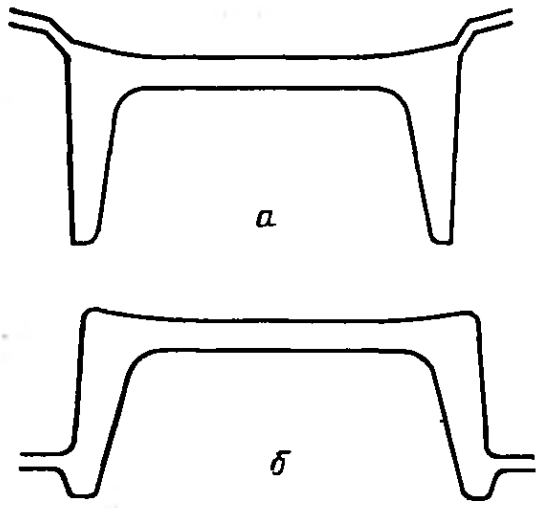



Рис. 167. Виды контрольных калибров:

*а* — закрытого типа; *б* — полузакрытого типа

Разрезные калибры открытого типа, как правило, обеспечивают получение фланцев расчетной высоты, поэтому в ряде случаев можно обойтись без второго контрольного калибра.

Контрольные калибры бывают двух типов (рис. 167): закрытые и полузакрытые. На отечественных заводах в настоящее время применяют в основном калибры второго типа в связи со следующими недостатками закрытых контрольных калибров.

Захват металла валками в закрытом контрольном и следующим за ним калибрах затруднен из-за противоположных уклонов фланцев. Деформация металла в закрытых фланцах носит характер волочения, выход раската затруднен, поэтому даже при небольших обжатиях износ валков значительный. Кроме того, при наличии разъемов в углах ложных фланцев в связи с колебанием температуры прокатываемого металла возможно образование заусенцев, приводящих к закатам на готовом профиле. С другой стороны, если для предотвращения образования заусенцев в предшествующем калибре увеличить в ложных фланцах закругления, то это может привести к невыполнению углов на готовом профиле.

Из-за заклинивания металла в закрытых фланцах контрольного калибра в связи с выработкой открытых фланцев предыдущего калибра бывают частые случаи поломки выводных проводок и окова валков. Глубокий врез закрытых фланцев уменьшает прочность валков. Наконец, применение закрытых контрольных калибров усложняет переточку валков, снижает срок их службы (из-за большого съема металла при переточках).

Конструкция полузакрытого контрольного калибра не ухудшает условий захвата, так как уклон фланцев в нем и в смежных с ним калибрах одинаков. Последнее обстоятельство позволяет увеличить выпуск действительных фланцев смежных калибров. Деформация металла в полузакрытых контрольных калибрах осуществляется не только по высоте фланцев, но и по ширине, так как большая часть их является открытой, замкнутой верхним и нижним валками. Глубину нижней закрытой части фланца принимают в пределах 4—20 *мм* в зависимости от номера швеллера.

Ширину малого основания фланца принимают на 4—6% больше, чем в предыдущем по ходу прокатки калибре. Построение контрольных калибров производят согласно рис. 166, *б*.

Благодаря малой глубине среза полузакрытых контрольных калибров повышается прочность и упрощается ремонт валков. Стойкость между переточками и общий срок службы валков повышается.

## Примерный расчет калибровки швеллера № 24

Необходимо произвести расчет калибровки для прокатки швеллера № 24 на типовом рельсо-балочном стане 800, состоящем из обжимной реверсивной клети 950, двух клетей трио 800 и чистовой клети 750 дуо. Размеры холодного профиля швеллера № 24 приведены в ГОСТ 8240—56. Уклон внутренней грани фланцев принимаем 8% (допускается $\leqslant 12\%$).

Число фасонных калибров $n$ для прокатки швеллера № 24 принимаем по графику (см. рис. 144): $n = 9$. В клети 950 — три калибра, в первой клети 800 — три, во второй — два; в третьей — один.

Горячие размеры профиля (частично с учетом отрицательных допусков) следующие:

Ширина (высота швеллера)

$$B_г = (240 - 2{,}0) \cdot 1{,}012 = 241 \text{ мм}.$$

Высота (ширина фланца)

$$H_г = (90 - 1{,}5) \cdot 1{,}012 = 89{,}6 \text{ мм}.$$

Толщина стенки

$$d_г = 5{,}6 \cdot 1{,}012 = 5{,}7 \text{ мм}.$$

Средняя толщина фланцев

$$t_г = 10 \cdot 1{,}012 = 10{,}1 \text{ мм}.$$

Высота действительного фланца

$$h_г = H_г - d_г = 89{,}6 - 5{,}7 = 83{,}9 \approx 84 \text{ мм}.$$

Размеры основания действительного фланца

$$b_г = t_г + 0{,}5 h_г \operatorname{tg} \varphi_г;$$

$$a_г = t_г - 0{,}5 h_г \operatorname{tg} \varphi_г,$$

где $\varphi$ — угол наклона внутренней поверхности фланца

$$(\operatorname{tg} \varphi_г = 0{,}08);$$

$$b_г = 20{,}1 + 0{,}5 \cdot 84{,}0 \cdot 0{,}08 \approx 13{,}5 \text{ мм};$$

$$a_г = 10{,}1 - 0{,}5 \cdot 84 \cdot 0{,}08 \approx 6{,}7 \text{ мм}.$$

Отношение размеров оснований фланца

$$\frac{a_г}{b_г} = \frac{6{,}7}{13{,}5} = 0{,}49.$$

Площадь поперечного сечения действительного фланца

$$q_{фл_г} = t_г h_г = 10{,}1 \cdot 84 = 850 \text{ мм}^2.$$

Площадь поперечного сечения чистового калибра

$$q_г = 2 q_{фл_г} + B_г d_г = 2 \cdot 850 + 241 \cdot 5{,}7 = 3070 \text{ мм}^2.$$

Принимаем два контрольных калибра: пятый и восьмой по ходу прокатки. Приращение в открытых фланцах $\Delta h_{пр} = 1{,}0$ *мм*. Закрытые фланцы не применяем, поэтому утяжки не будет.

Приращение высоты действительных фланцев от выдавливания ложных фланцев принимаем $\delta = 2$ *мм* во всех калибрах, кроме чистового и контрольных. В чистовом калибре выдавливание практически отсутствует. В контрольных калибрах предусматриваем осадку фланцев по высоте на 5 *мм* в каждом.

Определим высоту действительного фланца в разрезном калибре

$$h_р = h_г - \sum \Delta h_{пр} - \sum \delta + \sum \varepsilon;$$

$$h_р = 84 - 6 - 10 + 10 = 78 \text{ мм}.$$

Высота фланца в любом калибре

$$h_{i-1} = h_i - \Delta h_{\text{пр}\,i} - \delta_i + \varepsilon_i.$$

Данные расчета высоты действительных фланцев приведены в табл. 82.

Таблица 82

**Размеры действительных фланцев**

| Номер калибра | Приращение $\Delta h_{\text{пр}}$, *мм* | Осадка $\varepsilon$, *мм* | Выдавливание $\delta$, *мм* | Высота фланца $h$, *мм* | Номер калибра | Приращение $\Delta h_{\text{пр}}$, *мм* | Осадка $\varepsilon$, *мм* | Выдавливание $\delta$, *мм* | Высота фланца $h$, *мм* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *I* | — | — | — | 78 | *VI* | 1 | — | 2 | 85 |
| *II* | 1 | — | 2 | 81 | *VII* | 1 | — | 2 | 88 |
| *III* | 1 | — | 2 | 84 | *VIII* | — | 5 | — | 83 |
| *IV* | 1 | — | 2 | 87 | *XI* | 1 | — | — | 84 |
| *V* | — | 5 | — | 82 | | | | | |

Уширение выбираем по графику (см. рис. 145):
для разрезного калибра

$$\Delta B_1 = 5 \text{ мм};$$

для остальных калибров

$$\sum \Delta B_{2-9} = 40 \text{ мм};$$

общее уширение

$$\sum \Delta B_{1-9} = 45 \text{ мм}.$$

Ширина заготовки

$$B_0 = B_9 - \sum \Delta B_{1-9} = 241 - 45 = 196 \approx 195 \text{ мм}.$$

Ширина разрезного калибра

$$B_1 = 195 + 5 = 200 \text{ мм}.$$

Окончательно определяем уширение в остальных швеллерных калибрах:

$$\sum \Delta B_{2-9} = 241 - 200 = 41 \text{ мм}.$$

Большое основание действительных фланцев разрезного калибра принимаем

$$b_1 = 0{,}5B_1 = 0{,}5 \cdot 200 = 100 \text{ мм}.$$

Малое основание действительного фланца разрезного калибра

$$a_1 = b_1 \frac{a_9}{b_9} = 100 \cdot 0{,}49 = 49 \text{ мм}.$$

Площадь поперечного сечения действительного фланца разрезного калибра

$$q_{фл_1} = \frac{a_1 + b_1}{2} h_1 = \frac{49 + 100}{2} 83 = 6180 \text{ мм}^2.$$

Площадь поперечного сечения фланца разрезного калибра $q'_{фл.1}$ определяем из формулы (119):

$$q'_{фл_1} = 0{,}05 \left(1 + \frac{n-2}{m}\right) q_{фл_1} = 0{,}05 \left(1 + \frac{7}{0{,}5}\right) 6180 = 4640 \text{ мм}^2.$$

Размеры оснований ложных фланцев разрезного калибра принимаем такие же, как и у действительных фланцев:

$$a'_1 = a_1 = 49 \text{ мм}; \quad b'_1 = b_1 = 100 \text{ мм}.$$

Средняя толщина полки ложного фланца

$$t'_1 = \frac{a'_1 + b'_1}{2} = \frac{49 + 100}{2} = 74{,}5 \text{ мм}.$$

Высота ложного фланца

$$h'_1 = \frac{q'_{фл_1}}{t'_1} = \frac{4640}{74{,}5} = 62 \text{ мм}.$$

Толщину стенки разрезного калибра определяем по формуле

$$d_1 = \frac{(q_{фл_1} + q'_{фл_1}) d_9}{q_{фл_9} + q'_{фл_9} + 0{,}5 d_9 \sum \Delta B_{2-9}};$$

$$d_1 = \frac{(6180 + 4640) \cdot 5{,}7}{850 + 0 + 0{,}5 \cdot 5{,}7 \cdot 41} = 64 \text{ мм}.$$

Принимаем толщину стенки с учетом закруглений разрезающих гребней (рис. 168) $d'_1 = 120$ мм.

Площадь поперечного сечения разрезного калибра можно найти планиметрированием или из выражения

$$q_1 = 2 (q_{фл_1} + q'_{фл_1}) + d_1 B_1 + 2 \left(\frac{d'_1 - d_1}{2}\right)^2 \frac{\operatorname{tg} \varphi_1 + \operatorname{tg} \varphi'_1}{2}, \quad (123)$$

где последний член приближенно представляет собой площадь закругления разрезающих гребней:

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{b_1 - a_1}{h_1} = \frac{100 - 49}{78} = 0{,}654;$$

$$\operatorname{tg} \varphi'_1 = \frac{b'_1 - a'_1}{h'_1} = \frac{100 - 49}{62{,}0} = 0{,}823;$$

$$q_1 = 2 (6180 + 4640) + 64 \cdot 200 +$$

$$+ 2 \left(\frac{120 - 64}{2}\right)^2 \frac{0{,}654 + 0{,}823}{2} = 35\,600 \text{ мм}^2.$$

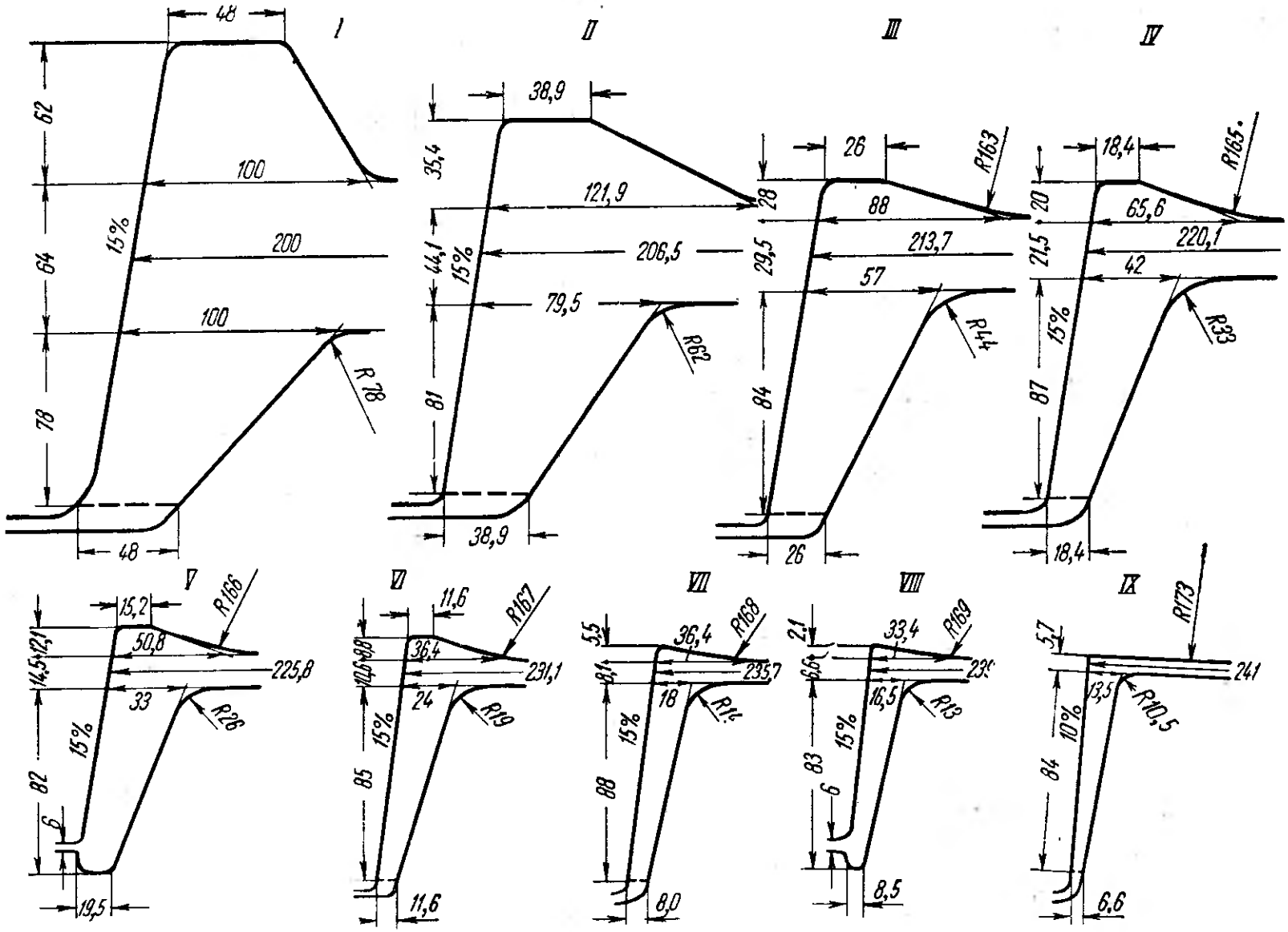



Рис. 168. Расчетная калибровка швеллера № 24

Высота разрезного калибра (рис. 168)

$$H_1 = h_{фл_1} + h'_{фл_1} + d_1 = 78 + 62{,}0 + 64 = 204 \text{ мм}.$$

Определим высоту заготовки по формуле (103), принимая разрезной калибр закрытым:

$$k = \frac{H_1 - d'_1}{H_1 - d'_1 + B_1 - 2a_1} = \frac{204 - 120}{204 - 120 + 200 - 2 \cdot 49} = 0{,}45;$$

$$\Delta q = \frac{2a_1 (B_0 H_1 - q_1)}{B_0} = \frac{98\,(195 \cdot 204 - 35\,600)}{195} = 2100 \text{ мм}^2.$$

$$H_0 = \frac{B_0}{q_1}\left(H_1 - \frac{0{,}25k\,\Delta q}{a_1}\right)^2 =$$

$$= \frac{195}{34\,900}\left(204 - \frac{0{,}25 \cdot 0{,}45 \cdot 2100}{49}\right)^2 = 226 \text{ мм}.$$

Принимаем $H_0 = 225$ *мм*.

Коэффициент вытяжки в разрезном калибре

$$\mu_1 = \frac{q_0}{q_1} = \frac{225 \cdot 195}{35\,600} = 1{,}23.$$

Угол захвата в начальный момент

$$\alpha_1 = \arccos\left(1 - \frac{H_0 - d'_1}{D - d'_1}\right) = \arccos\left(1 - \frac{225 - 120}{800 - 120}\right) = 32°.$$

Угол захвата по усредненному обжатию при установившемся процессе прокатки равен

$$\alpha'_1 = \arccos\left(1 - \frac{H_0 - \frac{q_1}{B_1}}{D - d'_1}\right) = \arccos\left(1 - \frac{225 - \frac{35\,600}{200}}{800 - 120}\right) = 25°.$$

Для улучшения захвата следует произвести насечку или наварку разрезающих гребней.

*Расчет промежуточных калибров*

Общий коэффициент вытяжки фланцев

$$\sum_2^9 \mu_{фл} = \frac{q_{фл_1} + q'_{фл_1}}{q_{фл_9}} = \frac{6180 + 4640}{850} = 12{,}7.$$

Распределим коэффициенты вытяжки фланцев по проходам:

$$\sum_2^9 \mu_{фл} = \mu_2 \mu_3 \mu_4 \ldots \mu_8 \mu_9;$$

$$\sum_2^9 \mu_{фл} = 1{,}42 \cdot 1{,}50 \cdot 1{,}47 \cdot 1{,}45 \cdot 1{,}42 \cdot 1{,}35 \cdot 1{,}25 \cdot 1{,}17 = 12{,}7.$$

Общий коэффициент вытяжки (обжатия) стенки

$$\sum_{2}^{9} \mu_{ст} = \frac{d_1}{d_9} = \frac{64}{5{,}7} = 11{,}2.$$

Коэффициенты вытяжки стенки по проходам:

$$\sum_{2}^{9} \mu_{ст} = 1{,}45 \cdot 1{,}50 \cdot 1{,}45 \cdot 1{,}40 \cdot 1{,}37 \cdot 1{,}32 \cdot 1{,}22 \cdot 1{,}15 = 11{,}2;$$

$$d_2 = \frac{d_1}{\mu_2} = \frac{64}{1{,}45} = 44{,}1 \text{ мм}; \quad d_3 = \frac{44{,}1}{1{,}50} = 29{,}5 \text{ мм};$$

$$d_4 = \frac{29{,}5}{1{,}45} = 21{,}5 \text{ мм}, \quad d_5 = \frac{21{,}5}{1{,}40} = 14{,}5 \text{ мм};$$

$$d_6 = \frac{14{,}5}{1{,}37} = 10{,}6 \text{ мм}; \quad d_7 = \frac{10{,}6}{1{,}32} = 8{,}1 \text{ мм},$$

$$d_8 = \frac{8{,}1}{1{,}22} = 6{,}6 \text{ мм}; \quad d_9 = \frac{6{,}6}{1{,}15} = 5{,}7 \text{ мм}.$$

Сумма дробных частей коэффициентов вытяжки стенки равна

$$\sum (\mu_{ст} - 1) = 0{,}45 + 0{,}50 + 0{,}45 + 0{,}40 + 0{,}37 + 0{,}32 + 0{,}22 + 0{,}15 = 2{,}86.$$

Распределение общего уширения предусматриваем пропорционально дробным частям коэффициентов вытяжки:

$$m = \frac{\Sigma \Delta B_{2-9}}{\Sigma_{(\mu_{ст}-1)_{2-9}}} = \frac{41}{2{,}86} = 14{,}4 \text{ мм}.$$

Уширение по проходам:

$$\Delta B_2 = m(\mu_2 - 1) = 14{,}4 \cdot 0{,}45 = 6{,}5 \text{ мм};$$

$$\Delta B_3 = 14{,}4 \cdot 0{,}50 = 7{,}2 \text{ мм}; \quad \Delta B_4 = 14{,}4 \cdot 0{,}45 = 6{,}6 \text{ мм};$$

$$\Delta B_5 = 14{,}4 \cdot 0{,}40 = 5{,}7 \text{ мм}; \quad \Delta B_6 = 14{,}4 \cdot 0{,}37 = 5{,}3 \text{ мм};$$

$$\Delta B_7 = 14{,}4 \cdot 0{,}32 = 4{,}6 \text{ мм}; \quad \Delta B_8 = 14{,}8 \cdot 0{,}22 = 3{,}3 \text{ мм};$$

$$\Delta B_9 = 14{,}4 \cdot 0{,}15 = 2{,}0 \text{ мм}.$$

Значения ширины калибров:

$$B_2 = B_1 + \Delta B_2 = 200 + 6{,}5 = 206{,}5 \text{ мм};$$

$$B_3 = 206{,}5 + 7{,}2 = 213{,}7 \text{ мм};$$

$$B_4 = 213{,}7 + 6{,}4 = 220{,}1 \text{ мм}; \quad B_5 = 220{,}1 + 5{,}7 = 225{,}8 \text{ мм};$$

$$B_6 = 225{,}8 + 5{,}3 = 231{,}1 \text{ мм}; \quad B_7 = 231{,}1 + 4{,}6 = 235{,}7 \text{ мм};$$

$$B_8 = 235{,}7 + 3{,}3 = 239{,}0 \text{ мм}; \quad B_9 = 239{,}0 + 2{,}0 = 241{,}0 \text{ мм}.$$

Суммарные площади поперечного сечения действительного и ложного фланцев по проходам:

$$q_{фл_8} + q'_{фл_8} = q_{фл_8}\mu_9 = 850 \cdot 1{,}17 = 995 \ мм^2;$$

$$q_{фл_7} + q'_{фл_7} = (q_{фл_8} + q'_{фл_8})\,\mu_8 = 995 \cdot 1{,}25 = 1250 \ мм^2;$$

$$q_{фл_6} + q'_{фл_6} = 1310 \cdot 1{,}35 = 1680 \ мм^2;$$

$$q_{фл_5} + q'_{фл_5} = 1680 \cdot 1{,}42 = 2380 \ мм^2;$$

$$q_{фл_4} + q'_{фл_4} = 2380 \cdot 1{,}45 = 3460 \ мм^2;$$

$$q_{фл_3} + q'_{фл_3} = 3460 \cdot 1{,}47 = 5080 \ мм^2;$$

$$q_{фл_2} + q'_{фл_2} = 5080 \cdot 1{,}50 = 7610 \ мм^2;$$

$$q_{фл_1} + q'_{фл_1} = 7610 \cdot 1{,}42 = 10\,820 \ мм^2.$$

Распределим суммарную площадь поперечного сечения между действительным и ложным фланцами. Площадь поперечного сечения действительного фланца, в соответствии с формулой (120), равна

$$q_{фл} = \frac{q_{фл} + q'_{фл}}{1 + k}.$$

Находим из формулы (119) следующее распределение коэффициента $k$ по проходам: 1 — 0,75; 2 — 0,59; 3 — 0,46; 4 — 0,32; 5 — 0,20; 6 — 0,14; 7 — 0,09; 8 — 0,03; 9 — 0.

Определяем площади поперечного сечения действительных и ложных фланцев:

$$q_{фл_2} = \frac{7610}{1 + 0{,}59} = 4800 \ мм^2; \quad q'_{фл_2} = 7610 - 4800 = 2810 \ мм^2;$$

$$q_{фл_3} = \frac{5080}{1 + 0{,}46} = 3480 \ мм^2; \quad q'_{фл_3} = 5080 - 3480 = 1600 \ мм^2;$$

$$q_{фл_4} = \frac{3460}{1 + 0{,}32} = 2620 \ мм^2; \quad q'_{фл_4} = 3460 - 2620 = 840 \ мм^2;$$

$$q_{фл_5} = \frac{2380}{1 + 0{,}20} = 1980 \ мм^2; \quad q'_{фл_5} = 2380 - 1980 = 400 \ мм^2;$$

$$q_{фл_6} = \frac{1680}{1 + 0{,}14} = 1470 \ мм^2; \quad q'_{фл_6} = 1680 - 1470 = 210 \ мм^2;$$

$$q_{фл_7} = \frac{1250}{1 + 0{,}09} = 1150 \ мм^2; \quad q'_{фл_7} = 1250 - 1150 = 100 \ мм^2;$$

$$q_{фл_8} = \frac{995}{1 + 0{,}03} = 960 \ мм^2; \quad q'_{фл_8} = 995 - 960 = 35 \ мм^2.$$

Средние значения толщины действительных фланцев:

$$t_2 = \frac{q_{фл_2}}{h_2} = \frac{4800}{81} = 59{,}2 \text{ мм};$$

$$t_3 = \frac{3480}{84} = 41{,}5 \text{ мм}; \quad t_4 = \frac{2620}{87} = 30{,}2 \text{ мм};$$

$$t_5 = \frac{1980}{82} = 24{,}1 \text{ мм}; \quad t_6 = \frac{1470}{85} = 16{,}3 \text{ мм};$$

$$t_7 = \frac{1150}{88} = 13{,}0 \text{ мм}; \quad t_8 = \frac{995}{83} = 11{,}9 \text{ мм}.$$

Координаты точки $K$ определяем по имеющимся размерам калибров $I$ и $IX$:

$$\operatorname{tg}\varphi_1 = \frac{b_1 - a_1}{h_1} = \frac{100{,}0 - 49}{78} = 0{,}655;$$

$$e = \frac{b_1 \operatorname{tg}\varphi_9 - b_9 \operatorname{tg}\varphi_1}{\operatorname{tg}\varphi_1 - \operatorname{tg}\varphi_9} = \frac{100 \cdot 0{,}08 - 13{,}5 \cdot 0{,}655}{0{,}655 - 0{,}08} = -1{,}50 \text{ мм};$$

$$H_K = \frac{e + b_1}{\operatorname{tg}\varphi_1} = \frac{-1{,}5 + 100{,}0}{0{,}655} = 150 \text{ мм}.$$

В промежуточных калибрах тангенс угла наклона внутренних стенок фланца определяем по формуле

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{t + e}{H_K - 0{,}5h},$$

$$\operatorname{tg}\varphi_2 = \frac{59{,}2 - 1{,}5}{150 - 0{,}5 \cdot 81} = 0{,}52; \quad \varphi_2 = 28°.$$

Аналогично получили:

$$\operatorname{tg}\varphi_3 = 0{,}37; \quad \operatorname{tg}\varphi_4 = 0{,}27; \quad \operatorname{tg}\varphi_5 = 0{,}21;$$
$$\operatorname{tg}\varphi_6 = 0{,}15; \quad \operatorname{tg}\varphi_7 = 0{,}11; \quad \operatorname{tg}\varphi_8 = 0{,}10.$$

Длины больших оснований действительных фланцев определяем по формуле

$$b = H_K \operatorname{tg}\varphi - e:$$

$$b_2 = 150 \cdot 0{,}52 + 1{,}5 = 79{,}5 \text{ мм};$$
$$b_3 = 150 \cdot 0{,}37 + 1{,}5 = 57{,}0 \text{ мм};$$
$$b_4 = 150 \cdot 0{,}27 + 1{,}5 = 42{,}0 \text{ мм};$$
$$b_5 = 150 \cdot 0{,}21 + 1{,}5 = 33{,}0 \text{ мм};$$
$$b_6 = 150 \cdot 0{,}15 + 1{,}5 = 24{,}0 \text{ мм};$$
$$b_7 = 150 \cdot 0{,}11 + 1{,}5 = 18{,}0 \text{ мм};$$
$$b_8 = 150 \cdot 0{,}1 + 1{,}5 = 16{,}5 \text{ мм}.$$

Длины малых оснований действительных фланцев определяем по формуле

$$a = 2t - b:$$

$$a_2 = 2 \cdot 59{,}2 - 79{,}5 = 38{,}9 \text{ мм};$$
$$a_3 = 2 \cdot 41{,}5 - 57{,}0 = 26{,}0 \text{ мм};$$
$$a_4 = 2 \cdot 30{,}2 - 42{,}0 = 18{,}4 \text{ мм};$$
$$a_5 = 2 \cdot 24{,}1 - 33{,}0 = 15{,}2 \text{ мм};$$
$$a_6 = 2 \cdot 17{,}3 - 24{,}0 = 11{,}6 \text{ мм};$$
$$a_7 = 2 \cdot 13{,}0 - 18{,}0 = 8{,}0 \text{ мм};$$
$$a_8 = 2 \cdot 11{,}9 - 16{,}5 = 7{,}3 \text{ мм}.$$

Радиус закругления $R$ в месте сопряжения действительного фланца и стенки увеличивается от чистового калибра к разрезному пропорционально увеличению большого основания действительного фланца.

Радиус закругления в чистовом калибре $R = 10{,}5$ *мм*. Отношение радиуса к основанию фланца в чистовом калибре

$$\rho = \frac{R_9}{b_9} = \frac{10{,}5}{13{,}5} = 0{,}78.$$

Радиусы закругления по калибрам:

$$R_8 = \rho b_8 = 0{,}78 \cdot 16{,}5 \approx 13 \text{ мм};$$
$$R_7 = \rho b_7 = 0{,}78 \cdot 18{,}0 = 14 \text{ мм};$$
$$R_6 = 0{,}78 \cdot 24{,}0 \approx 19 \text{ мм};$$
$$R_5 = 0{,}78 \cdot 33{,}0 \approx 26 \text{ мм};$$
$$R_4 = 0{,}78 \cdot 42{,}0 \approx 33 \text{ мм};$$
$$R_3 = 0{,}78 \cdot 57{,}0 \approx 44 \text{ мм};$$
$$R_2 = 0{,}78 \cdot 79{,}5 = 62 \text{ мм};$$
$$R_1 = 0{,}78 \cdot 100 = 78 \text{ мм}.$$

Радиусы закругления ложных фланцев $R'$ изменяются в пределах $(1{,}0 \div 1{,}5)\,R$, причем $R' \approx R$ в первых по ходу прокатки калибрах и $R' \approx 1{,}5R$ — в последних:

$$R'_8 = 1{,}5R_8 = 1{,}5 \cdot 13 = 20 \text{ мм};$$
$$R'_7 = 1{,}5R_7 = 1{,}5 \cdot 14 = 21 \text{ мм};$$
$$R'_6 = 1{,}5R_6 = 1{,}5 \cdot 19 = 28 \text{ мм};$$
$$R'_5 = 1{,}25R_5 = 1{,}25 \cdot 26 = 33 \text{ мм};$$
$$R'_4 = 1{,}20R_4 = 1{,}20 \cdot 33 = 40 \text{ мм};$$
$$R'_3 = R_3 = 44 \text{ мм}; \quad R'_2 = R_2 = 62 \text{ мм}.$$

В одном или двух предчистовых калибрах ложный фланец обычно имеет форму треугольника, а в черновых калибрах — форму трапеции.

Принимаем $a'_7 = 0$ и $a'_8 = 0$.

В остальных черновых калибрах $a' = a$.

Так как ложный фланец имеет форму трапеции, для нахождения высоты $h'$ достаточно найти среднюю толщину фланца. Принимаем ее равной длине большого основания действительного фланца:

$$t' = b.$$

Тогда значения высоты ложного фланца в соответствии с формулой $h' = \frac{q'_{фл}}{t'}$ по калибрам:

$$h'_2 = \frac{2810}{79{,}5} = 35{,}4 \text{ мм}; \quad h'_3 = \frac{1600}{57} = 28 \text{ мм};$$

$$h'_4 = \frac{840}{42} = 20 \text{ мм}; \quad h'_5 = \frac{400}{33} = 12{,}1 \text{ мм};$$

$$h'_6 = \frac{210}{24} = 8{,}8 \text{ мм}; \quad h'_7 = \frac{100}{18} = 5{,}5 \text{ мм}; \quad h'_8 = \frac{35}{16{,}5} = 2{,}1 \text{ мм}.$$

Длины большого основания ложного фланца

$$b' = 2t' - a':$$

$$b'_2 = 2 \cdot 79{,}5 - 38{,}9 = 121{,}9 \text{ мм};$$

$$b'_3 = 2 \cdot 57 - 26 = 88 \text{ мм};$$

$$b'_4 = 2 \cdot 42 - 18{,}4 = 65{,}6 \text{ мм};$$

$$b'_5 = 2 \cdot 33 - 15{,}2 = 50{,}8 \text{ мм};$$

$$b'_6 = 2 \cdot 24 - 11{,}6 = 36{,}4 \text{ мм}$$

и для калибров 7 и 8 по формуле

$$b' = \frac{2q'_{фл}}{h'}$$

получили

$$b'_7 = \frac{2 \cdot 100}{5{,}5} = 36{,}4 \text{ мм}; \quad b'_8 = \frac{2 \cdot 35}{12{,}1} = 33{,}4 \text{ мм}.$$

Результаты расчета калибровки приведены в табл. 83, а соответствующие ей калибры — на рис. 168.

На рис. 169 приведена заводская калибровка швеллера № 30, прокатываемого на рельсо-балочном стане 800.

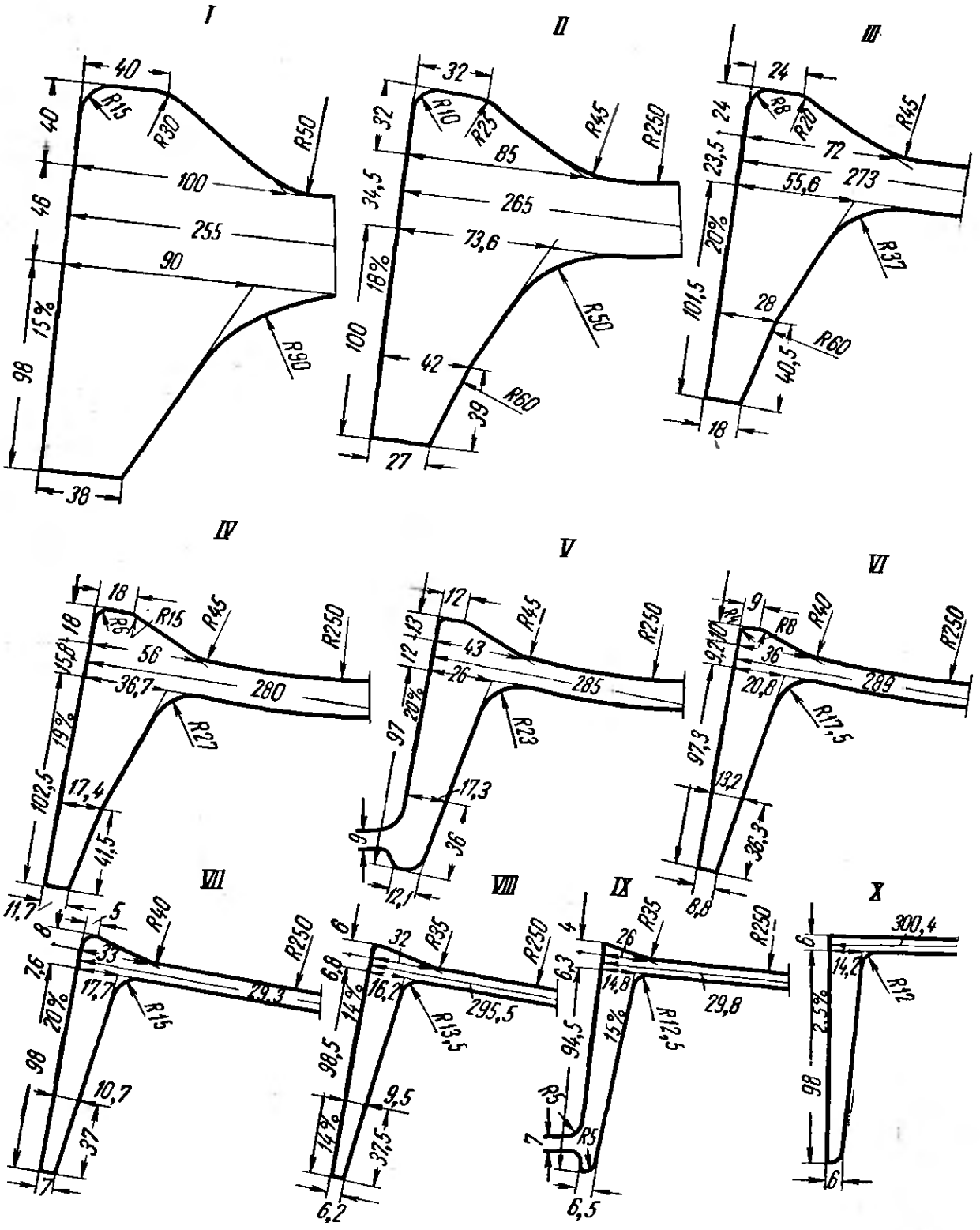



Рис. 169. Калибровка швеллера № 30 на рельсо-балочном стане 800:
*I—III* калибры обжимной клети; *IV—X* — калибры чистовой линии стаиа

Таблица 83

**Калибровка швеллера № 24 (см. рис. 168)**

| Номер прохода | Ширина калибра $B$, мм | Толщина стенки $d$, мм | Площадь калибра $q_1$, мм² | Действительные фланцы | | | | Ложные фланцы | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | площадь поперечного сечения $q_{фл}$, мм² | высота $h$, мм | длина большого основания $b$, мм | длина малого основания $a$, мм | площадь поперечного сечения $q'_{фл}$, мм² | высота $h'$, мм | длина большого основания $b'$, мм | длина малого основания $a'$, мм |
| 0 | 195,0 | 225 | 44 000 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 1 | 200,0 | 64 * | 35 600 | 6180 | 78 | 100,0 | 48,0 | 4640 | 62 | 100,0 | 48,0 |
| 2 | 206,5 | 44,1 ** | 24 300 | 4800 | 81 | 79,5 | 38,9 | 2810 | 35,4 | 121,9 | 38,9 |
| 3 | 213,7 | 29,5 | 16 400 | 3480 | 84 | 57,0 | 26,0 | 1600 | 28 | 88,0 | 26,0 |
| 4 | 220,1 | 21,5 | 11 660 | 2620 | 87 | 42,0 | 18,4 | 840 | 20,0 | 65,6 | 18,4 |
| 5 | 225,8 | 14,5 | 8 040 | 1980 | 82 | 33,0 | 19,5 | 400 | 12,1 | 50,8 | 15,2 |
| 6 | 231,1 | 10,6 | 5 810 | 1470 | 85 | 24,0 | 11,6 | 210 | 8,8 | 36,4 | 11,6 |
| 7 | 235,7 | 8,1 | 4 400 | 1150 | 88 | 18,0 | 8,0 | 100 | 5,5 | 36,4 | — |
| 8 | 239,0 | 6,6 | 3 570 | 960 | 83 | 16,5 | 8,5 | 35 | 2,1 | 33,4 | — |
| 9 | 241,0 | 5,7 | 3 070 | 850 | 84 | 13,5 | 6,6 | — | — | — | — |

* Толщина стенки с учетом закруглений гребней $d'_1 = 120$ мм.

** Толщина стенки с учетом закруглений гребней $d'_2 = 60$ мм.

## 5. РАЗВЕРНУТАЯ КАЛИБРОВКА ШВЕЛЛЕРОВ

Для прокатки швеллеров малых и средних размеров в последние годы все более широкое распространение находит развернутая калибровка с повышенным уклоном наружных граней фланцев и прогибом стенки профиля в чистовом калибре. Окончательные размеры профиля по такой калибровке получают в роликоправильной машине.[1]

Применение развернутой калибровки для прокатки швеллера № 16 на крупносортном стане 650 (рис. 170) показало, что подбором формы развернутых кривополочных и прямополочных калибров можно производить прокатку без применения сложной привалковой арматуры, сократить число проходов, повысить износостойкость валков и получить профиль с размерами, выдержанными в минусовых допусках.

Чистовой калибр по этой калибровке имеет уклон граней наружных фланцев 3,25%. После правки в роликоправильной машине уклон фланцев профиля уменьшается до 1,25%.

[1] Получение окончательного профиля в правильной машине осуществлено на рельсо-балочном стане 800 завода «Азовсталь» в 1950 г. См. также М. П. Сидельковский, Б. М. Шум, М. Д. Фрадин и др. Усовершенствование технологии в прокатных цехах на базе передового опыта. Металлургиздат, 1953, с. 208—219. (*Прим. ред*).

Предчистовой калибр является контрольным полузакрытым с уклоном фланцев 40% и изгибом стенки радиусом 100 *мм* В нем предусматривают обжатие высоты прямых фланцев на 3—4 *мм*,

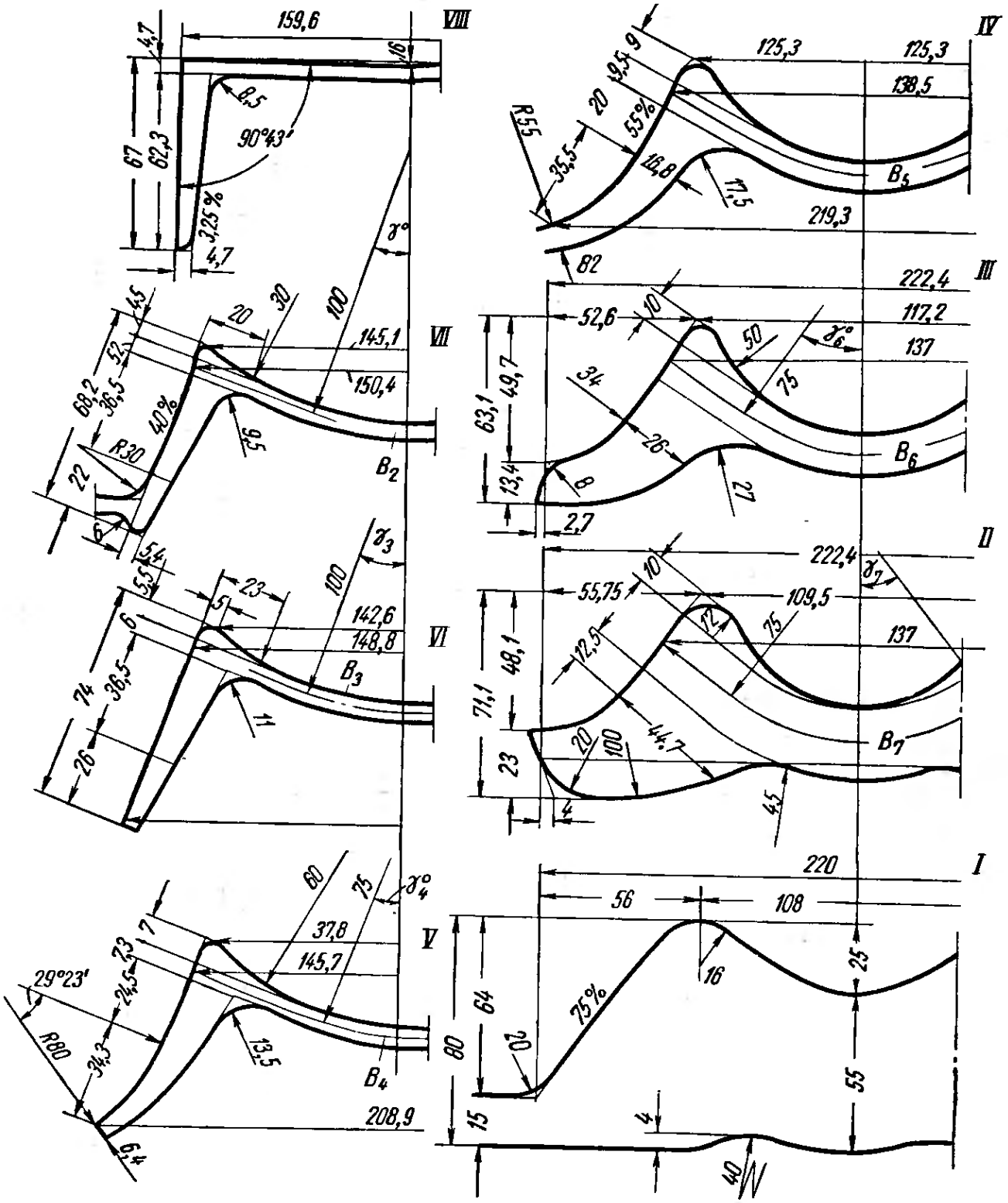



Рис. 170. Развернутая калибровка швеллера № 16 на стане 650:

*I* — калибр в обжимиой клети (в калибре VIII уклон 3,25% относится к внешней стороне фланца)

что обеспечивает постоянство высоты по длине раската и точность размеров фланцев готового профиля. Опыт показал, что при большом обжатии высоты фланцев концы контрольного калибра пере-

полняются и быстро вырабатываются. Это в свою очередь приводит к образованию волнистости фланцев готового профиля и появлению на них продольных складок. Чистовой калибр при этом быстро вырабатывается.

Третий против хода прокатки калибр также имеет прямые фланцы, уклон которых (39%) немного меньше уклона фланцев предчистового калибра при изгибе стенки радиусом 100 *мм*. Это предусматривают для того, чтобы при входе в предчистовой калибр не происходило захватывание концов фланцев буртами этого калибра. Сочетание третьего и предчистового калибров оказалось более удачным, чем третьего кривополочного и предчистового прямополочного.

Между первым фасонным калибром и третьим от конца калибром имеются четыре кривополочных калибра, характерными для построения которых являются постепенное уменьшение наклона прямых участков фланцев от 80 до 40%, увеличение радиуса закругления наружного очертания фланцев от 31,5 до 80 *мм* и постоянство радиуса ($R = 75$ *мм*) закругления стенки по средней линии. Ширину горизонтальной проекции калибра по средней линии, учитывая уширение стенки при ее обжатии, постепенно увеличивают со 137 до 145,7 *мм*.

Все калибры, включая предчистовой, имеют небольшие ложные фланцы, обжатие которых способствует удлинению действительных фланцев. Четвертый и пятый калибры являются открытыми без ограничения течения металла фланцев.

Второй и третий по ходу прокатки калибры имеют значительные выпуски (уклоны боковых стенок) с чередованием верхнего и нижнего замков (мест разъема валков).

В первом фасонном калибре прямоугольную заготовку сечением $120 \times 170$ *мм* подвергают значительному обжатию, достигающему по середине 65 *мм*. В этом калибре заготовка должна быть разрезана симметрично, поэтому требуется точная настройка вводных линеек. Калибр делают такой формы, чтобы обеспечить его заполнение по ширине, соответствующей ширине последующего калибра. Этого достигают некоторым изменением размеров заготовки и регулированием высоты первого калибра, размещенного на валках обжимной клети дуо 800.

Глава XI

# ПРОКАТКА И КАЛИБРОВКА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ РЕЛЬСОВ

## 1. СПОСОБЫ ПРОКАТКИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ РЕЛЬСОВ

В настоящее время, согласно ГОСТ 6726—53, 3542—47, 7173—54, 7174—65 и 8161—63, железнодорожные рельсы для широкой колеи прокатывают следующих типов: Р33, Р38, Р43, Р50 и Р65. Прокатывают также рельсы Р75 двух видов в соответствии с чертежами № 751/ЦП и 737/ЦП. Цифра в обозначении типа рельса показывает приближенно массу погонного метра в килограммах.

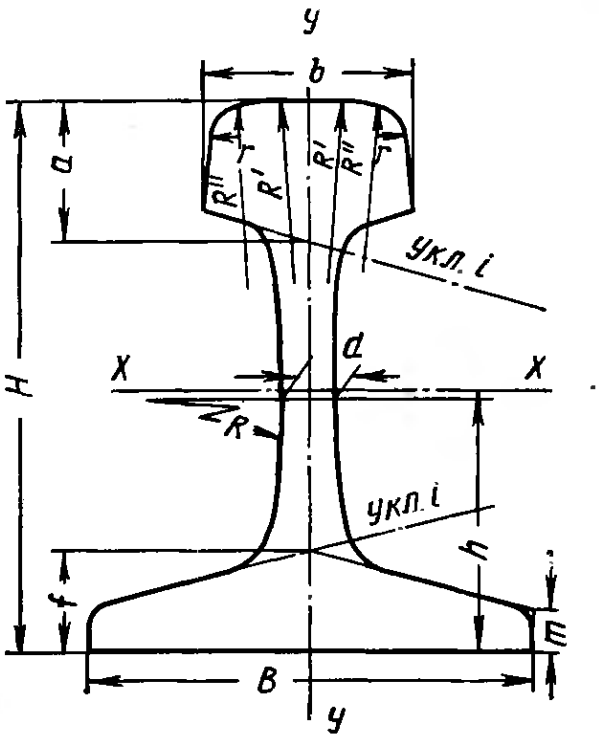


Рис. 171. Железиодорожный рельс

Характеристика железнодорожных рельсов основных типов, прокатываемых в настоящее время на заводах «Азовсталь», имени Дзержинского, на Кузнецком и Нижне-Тагильском металлургических комбинатах, приведена в табл. 84. Обозначения размеров профиля железнодорожного рельса показаны на рис. 171.

На заводе им. Дзержинского имеется рельсо-балочный стан старого типа, состоящий из малого блюминга 950, являющегося обжимной клетью, и чистовой линии реверсивное дуо 900. Прокатку на этом стане ведут с одного нагрева. Такого же типа стан имеется на заводе им. Петровского, на котором прокатывают рельсы типа Р33.

Новые станы состоят из двух или трех линий. Например, рельсо-балочный стан КМК состоит из трех линий: обжимной с реверсивным блюмингом 900, средней линии трио из двух клетей 800 и чистовой клети дуо 750.

На рельсо-балочных станах нового типа применяют два нагрева: перед блюмингом 1150 и перед прокаткой на рельсо-балочном стане. Двойной нагрев обеспечивает повышение качества рельсов благодаря постоянному температурному режиму прокатки и умень-

| Тип рельса | Основиые размеры, *мм* | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | *H* | *B* | *a* | *b* | *d* | *h* | *f* | *m* | *r* | *R* | *R'* | *R''* |
| Р38 | 135 | 114 | 40 | 68 | 13,0 | 67,81 | 24,0 | 9,0 | 13 | — | 300 | — |
| Р43 | 140 | 114 | 42 | 70 | 14,5 | 68,5 | 27,0 | 11,0 | 13 | — | 300 | — |
| Р50 | 152 | 132 | 42 | 70 | 16,0 | 70,5 | 27,0 | 10,5 | 13 | 350 | 300 | 80 |
| Р65 | 180 | 150 | 45 | 75 | 18,0 | 81,3 | 30,0 | 11,2 | 13 | 400 | 300 | 80 |

Примечания: 1. Рельсы Р38 и Р43 имеют иа подошве два уклоиа.
2. Толщина шейкн рельса Р38 по высоте одинаковая ($d = 13$ *мм*).

шению поверхностных пороков. Производительность рельсо-балочных станов нового типа примерно в два раза больше, чем на станах старого типа, и составляет около 1,5 млн. *т* в год рельсов, балок, швеллеров и других профилей.

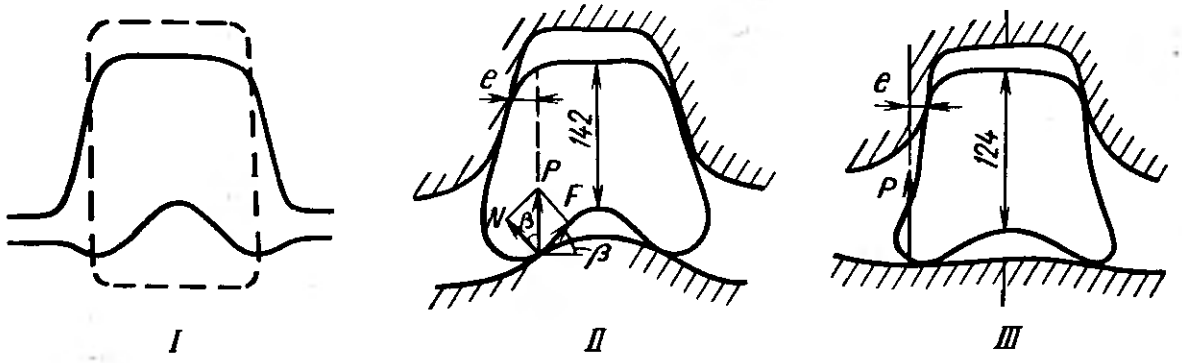



Рис. 172. Трапецеидальные калибры для прокатки рельсов ($\beta = 32°$)

В настоящее время на всех заводах применяют новую усовершенствованную калибровку рельсов, которая обеспечивает лучшее качество рельсов по сравнению со старой калибровкой, применявшейся 15—20 лет тому назад.

Новая калибровка рельсов характеризуется следующими особенностями. Прокатку по этой калибровке ведут из прямоугольной заготовки, у которой одна сторона примерно в 1,5—1,7 раза больше другой [44]. Заготовку задают в первый фасонный разрезной калибр на ребро. Всего имеется 10 фасонных калибров, из которых три-четыре калибра трапецеидальной формы, далее идут шесть косорасположенных рельсовых калибров, включая и чистовой.

Первый трапецеидальный калибр с разрезающим гребнем (рис. 172) предназначен для образования глубокого вреза в рельсовой заготовке, после чего образующиеся фланцы в следующих трапецеидальных (тавровых) калибрах разворачиваются и обжимаются, чем обеспечивается хорошая деформация подошвы и ориен-

Таблица 84

**железиодорожиых рельсов**

| Уклон $i$ | Площадь поперечного сечения, $см^2$ | Масса 1 $м$, $кг$ | Распределение металла по поперечному сеченню, % | | | ГОСТ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | головка | шейка | подошва | |
| 1 : 3 | 49,063 | 38,416 | 45,4 | 19,8 | 34,8 | 3542—47 |
| 1 : 3 | 57,0 | 44,65 | 42,83 | 21,31 | 35,86 | 7173—54 |
| 1 : 4 | 65,93 | 51,63 | 38,2 | 24,4 | 37,4 | 7174—65 |
| 1 : 4 | 82,56 | 64,64 | 34,2 | 28,4 | 37,4 | 8161—63 |

тировка волосовин параллельно подошве. Этим повышается прочность подошвы рельсов и обеспечиваются лучшие результаты по так называемой швейцарской пробе (рис. 173). Сущность этого испытания заключается в том, что рельсовый образец длиной 100 *мм* устанавливают на два ролика, расположенных друг от друга на расстоянии 100 *мм* и нагружают силой $P$, пока стрела прогиба $f$ на подошве не достигнет 4 *мм*. При такой деформации на подошве не должны образовываться поперечные трещины.

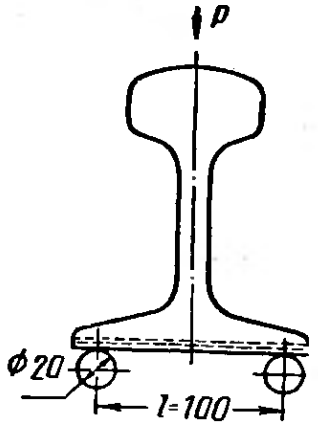


Рис. 173. Швейцарская проба

П. А. Александров и И. С. Тришевский [1] считают, что нужно брать в трапецеидальных калибрах высокие гребни с наклоном при условии, что сила $N_x = N \sin \beta$, разгибающая фланцы в калибре *II*, должна быть больше сдерживающих сил трения $T_x = fN \cos \beta$, откуда $\operatorname{tg} \beta \geqslant f$ (см. рис. 172).

Чтобы избежать защемления вреза и образования складок, необходимо выбирать угол наклона гребня $\beta$ в калибре *II* в пределах 22—35° (см. рис. 172). Высоту гребня трапецеидального калибра рекомендуется брать до 50 *мм*.

В трапецеидальном калибре *III* (см. рис. 172) образуется момент $P \cdot e$ с плечом $e$ вне контура калибра, обеспечивающий окончательное отгибание фланцев.

В. П. Хлебников, М. Д. Фрадин и П. А. Чеховский [2] высказываются за малый врез в трапецеидальном калибре, считая, что большой врез приводит к образованию складок при прокатке во втором и третьем трапецеидальных калибрах. Высокий и острый

[1] П. А. Александров, И. С. Тришевский. Сталь, 1955, № 12, с. 1112.

[2] В. П. Хлебников, М. Д. Фрадин, П. А. Чеховский. Сталь, 1954, № 5, с. 431 и 1957; № 12, с. 1103.

гребень не способствует разрушению первичной структуры, так как гребень скорее разрезает тело заготовки, а не уплотняет металл. Нельзя также рекомендовать очень высокую заготовку, так как при этом в последнем трапецеидальном калибре образуется чрезмерно широкая подошва, ухудшается ее качество.

В. П. Хлебников, М. Д. Фрадин и П. А. Чеховский предложили для завода «Азовсталь» новую конфигурацию калибров на обжимной клети 900, что позволило более интенсивно обрабатывать ме-

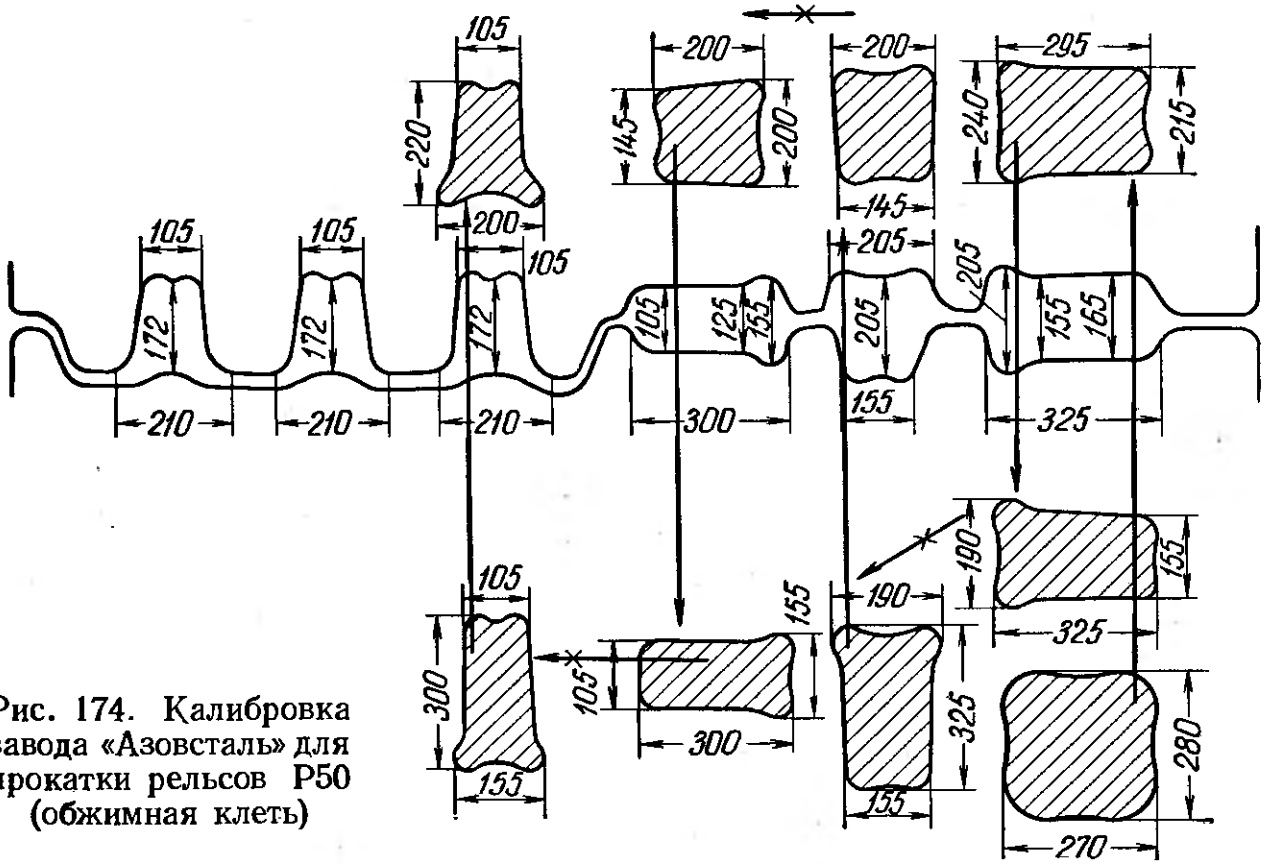



Рис. 174. Калибровка завода «Азовсталь» для прокатки рельсов Р50 (обжимная клеть)

талл подошвы и головки рельсов (рис. 174), чем улучшается качество рельсов и одновременно увеличивается производительность рельсо-балочного стана. По мнению авторов, при новой калибровке обжимной клети достаточно иметь три и даже два трапецеидальных калибра, так как проведенные на заводе опыты показали, что главное значение имеет не число трапецеидальных калибров, а интенсивность деформации в них.

Работники КМК И. И. Кучко, М. Г. Сернин и Л. Н. Сороко [1] высказываются за высокую заготовку и глубокий врез в первом трапецеидальном калибре. Когда применили заготовку 195 × × 130 *мм* вместо 165×155 *мм*, а высоту разрезного гребня в первом трапецеидальном калибре увеличили до 50 *мм* вместо 30 *мм*, то выход первых сортов при прокатке рельса Р43 увеличился. Авторы рекомендуют четыре трапецеидальных калибра.

---

[1] И. И. Кучко, М. Г. Сернин, Л. Н. Сороко. Сталь, 1956, № 5, с. 438.

Рекомендации сводятся к следующему:

1) отношение сторон заготовки $H/B$ следует брать в пределах 1,5÷1,7;

2) высоту гребня в первом трапецеидальном калибре следует брать равной 50 *мм*, а угол в вершине гребня — в пределах ⩽85—87°, чем достигается интенсивная высотная деформация в черновых калибрах и улучшается качество рельсов;

3) предлагаются шесть рельсовых калибров, так как при меньшем числе рельсовых калибров снижается проработка отдельных

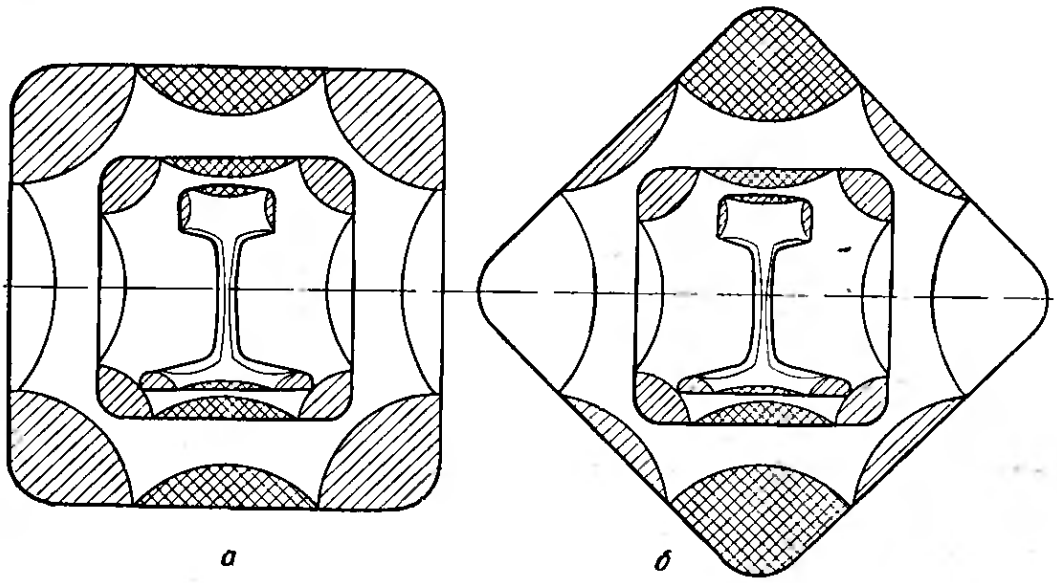



Рис. 175. Схема прокатки рельсов:

*а* — по обычной технологии; *б* — с диагональным обжатием заготовки

элементов профиля, в частности головки и подошвы; при большем числе рельсовых калибров снижается стойкость прокатных валков и производительность стана.

Для улучшения качества рельсов И. И. Кучко, М. Г. Сернин и Л. Н. Сороко предложили диагональное обжатие заготовки (рис. 175), которое способствует уплотнению металла головки и подошвы, так как металл ребер слитка, идуший на середину головки и подошвы, лучшего качества и меньше поражен поверхностными пороками, чем металл на гранях слитка. На рис. 175 одинаково заштрихованы зоны металла, идущего на формирование соответствующих элементов рельса.

А. М. Карпунин [1] на основе опыта прокатки железнодорожных рельсов на заводе им. Дзержинского согласен с рекомендациями работников завода «Азовсталь» и считает, что применение глубокого разрезающего гребня в первом тавровом калибре создает неравномерную деформацию в подошве и может приводить к образованию на последней поверхностных пороков.

Во втором калибре происходит сжатие металла равнодействующей силой $P$, а не разворот фланцев (см. рис. 172). Поэтому

[1] А. М. Карпунин. Сталь, 1957, № 6, с. 536.

необходимо применять низкие гребни высотой около 20 *мм*. Целесообразно иметь два-три трапецеидальных калибра. Пластовых рельсовых калибров достаточно иметь всего пять.

Из приведенной дискуссии можно сделать вывод, что при рациональной форме трапецеидальных калибров, обеспечивающих интенсивную деформацию и надежный разворот фланцев подошвы, достаточно иметь три трапецеидальных калибра, как это имеет место на заводе «Азовсталь».

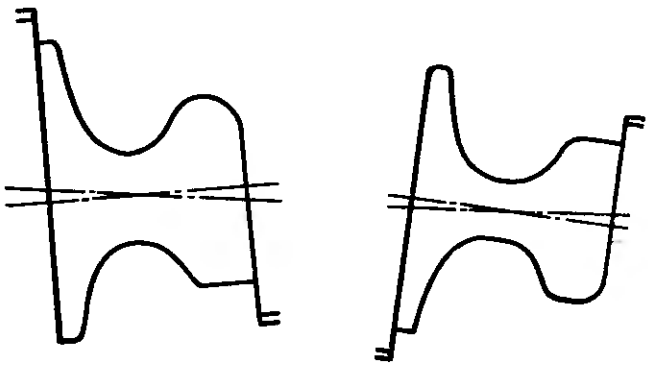


Рис. 176. Косо врезанные калибры

Что касается пластовых рельсовых калибров, то на всех заводах применяют косо расположенные рельсовые калибры (рис. 176), у которых ось калибра расположена под углом к линии прокатки и открытые фланцы (разъем валков) расположены по диагонали.

Косо расположенные рельсовые калибры имеют следующие преимущества:

1) фланцы подошвы всегда перпендикулярны к шейке, поэтому не требуется отгибание их при холодной правке;

2) увеличивается допустимое число переточек, так как уменьшается снимаемый с валка слой за каждую переточку;

3) уменьшается уширение, создается обжатие по ширине калибра, что улучшает качество рельсов;

4) обеспечивается интенсивное обжатие в открытых фланцах, расположенных по диагонали;

5) уменьшается расход энергии за счет более свободного выхода металла из калибров.

Недостатки косого расположения калибров следующие:

а) возникают значительные осевые усилия, для нейтрализации которых необходимо применять конусы на буртах валков, из-за чего уменьшается полезная длина бочки валка;

б) требуется увеличенный диаметр заготовок для изготовления всех калиброванных валков, так как в каждый валок врезают закрытые и открытые элементы косо врезанных калибров.

При прямой калибровке увеличенный диаметр имеют только валки, в которые врезают закрытые ручьи.

Несмотря на указанные недостатки, косая калибровка рельсов повсеместно внедрена на заводах, что объясняется ее существенными преимуществами.

На качество рельсов влияет также режим обжатий на блюминге и прежде всего число кантовок, ограничение уширения в калибрах, величина обжатий, которые должны обеспечивать лучшую проработку металла по глубине и более равномерную деформацию.

## 2. МЕТОДЫ РАСЧЕТА КАЛИБРОВКИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ РЕЛЬСОВ

Б. П. Бахтинов и М. М. Штернов [2] приводят примерный расчет калибровки железнодорожного рельса Р50, общий ход которого состоит в следующем:

1) устанавливают схему прокатки рельсов, например принимают три трапецеидальных калибра и шесть рельсовых калибров;

2) расчет ведут против хода прокатки, начиная от чистового калибра;

3) делят чистовой калибр на три элемента: головку, шейку и подошву с обозначением расчетных размеров (рис. 177, 178);

4) рассчитывают горячие размеры чистового калибра с учетом температурного коэффициента усадки профиля;

5) на основании практических данных хорошо работающих калибровок устанавливают частные и общие коэффициенты деформации для отдельных элементов калибра—головки, шейки и подошвы.

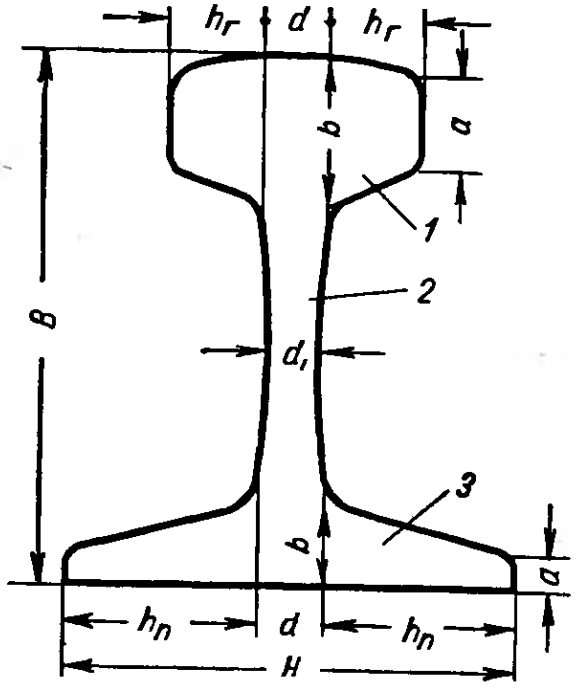



Рис. 177. Расчетные размеры рельса: *1* — головка; *2* — шейка; *3* — подошва

Б. П. Бахтинов и М. М. Штернов рекомендуют общий коэффициент деформации для головки и подошвы $k_{общ} \approx 2{,}3$. Для шейки, учитывая условия захвата, этот коэффициент принят $k_{общ} \approx 3{,}5$. Так как толщина шейки неодинаковая (рис. 178), то общий коэффициент деформации для крайних частей шейки принимают

$$k_{общ} = \frac{3{,}5}{\frac{d}{d_1}} = \frac{3{,}5}{\frac{20}{14{,}5}} = 2{,}54.$$

В табл. 85 приведены частные и общие коэффициенты деформации для отдельных элементов рельсовых калибров;

6) далее рассчитывают размеры отдельных калибров, а именно размеры подошвы, головки и шейки рельса;

7) после расчета шестого (разрезного) калибра необходимо определить размеры трапецеидальных калибров и размеры исходной прямоугольной заготовки.

В работе [3] приведены данные по калибровке и прокатке рельсов Р43 и Р65 с размерами для элементов всех калибров при прокатке за девять проходов. Даны графики изменения коэффициентов вытяжки, уширения, обжатия, утяжки и приращения

высоты фланцев головки и подошвы при прокатке рельсов Р43 и Р65.

В работе [44] приведены подробные данные по прокатке, калибровке и термической обработке рельсов. Прилагается атлас калибровки рельсов.

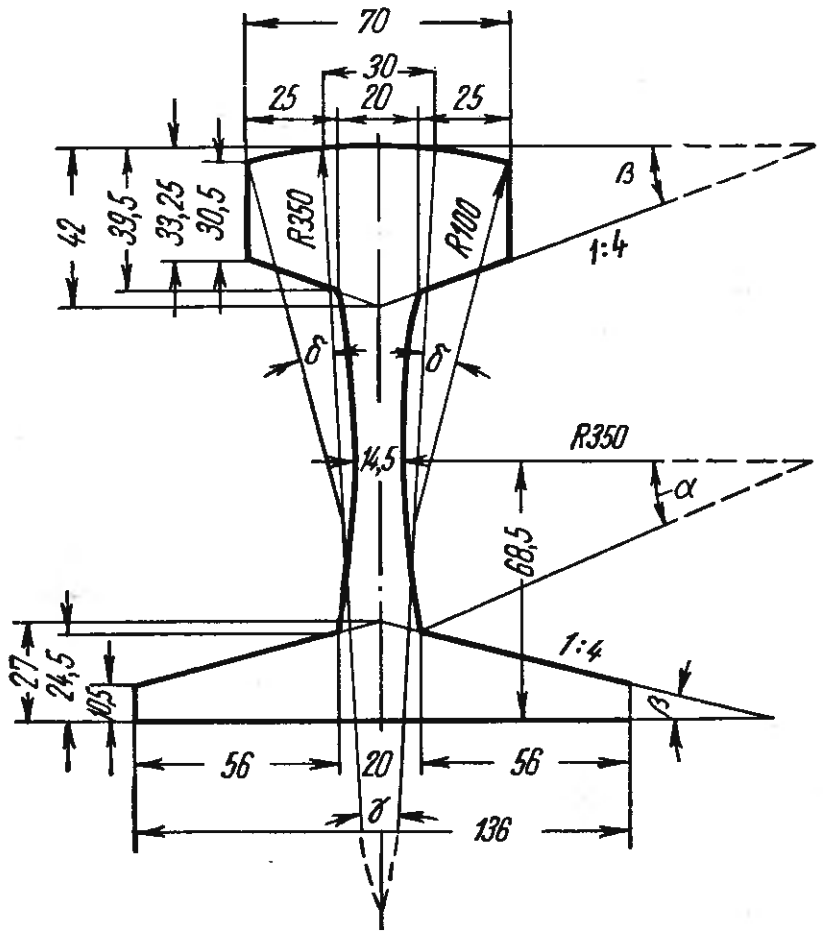



Рис. 178. К определению размеров рельса Р50 ($H = 132$ *мм*)

Расчеты калибровки рельсов различных типов приведены также в работе [7], в которой подробно изложена методика расчета по коэффициентам деформации.

Таблица 85

**Общие и частные коэффициенты деформации элементов профиля в рельсовых калибрах**

| Элементы профиля | Частные коэффициенты в калибрах [1] | | | | | Общий коэффициент $k_{общ}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | I (чистовой) | II | III | IV | V | |
| Головка и подошва . . . . . | 1,07 | 1,12 | 1,18 | 1,24 | 1,3 | 2,3 |
| Средняя часть шейки . . . . | 1,07 | 1,12 | 1,25 | 1,46 | 1,6 | 3,5 |
| Крайние части шейки . . . . | 1,07 | 1,12 | 1,18 | 1,28 | 1,28 | 2,54 |

[1] Нумерация против хода прокатки.

Расчет рельсовых калибров по коэффициентам деформации сводится к следующему:

1. Устанавливают среднее значение коэффициента высотной деформации шейки $\eta_{ш.\,ср} = \frac{d'}{d}$, которое изменяется в пределах 1,25—1,32, причем меньшие значения относятся к рельсам тяжелого типа (Р65), а большие — к рельсам легкого типа (Р38).

2. По величине $\eta_{ш.\,ср}$ принимают ряд коэффициентов, увеличивающихся от чистового к разрезному калибру. Например, в чистовом калибре $\eta'_{ш} = 1{,}1$, в разрезном калибре он увеличивается до $\eta_{ш} = 1{,}5$.

3. Для определения размеров подошвы устанавливают коэффициенты бокового обжатия так, чтобы в открытом фланце эти коэффициенты были несколько больше, чем в закрытом:

$$\eta_{о}^{a} > \eta_{о}^{b} > \eta_{з}^{b} > \eta_{з}^{a}.$$

У основания открытого фланца подошвы коэффициент деформации принимают меньше, чем у конца, т. е. $\eta_{о}^{b} < \eta_{о}^{a}$, а в закрытых фланцах, наоборот, $\eta_{з}^{b} > \eta_{з}^{a}$. Для выбора коэффициентов деформации имеются соответствующие графики.

4. Для установления коэффициентов обжатия головки имеется график, причем

$$\eta_{о.\,г}^{b} > \eta_{о.\,г}^{a} > \eta_{з.\,г}^{b} > \eta_{з.\,г}^{a},$$

т. е. в открытой части головки коэффициенты деформации больше, чем в закрытой части, кроме того, у основания коэффициент деформации больше, чем у конца.

5. Уширение в чистовом калибре принимают в пределах 1,5—3,0 *мм*.

По графикам определяют коэффициенты деформации, а затем рассчитывают размеры элементов рельсового калибра—шейки, подошвы и головки.

А. П. Виноградов и Г. А. Виноградов [25] приводят данные по калибровке рельсов и размеры калибров для рельсов Р43 при прокатке за девять проходов, а также расчеты калибровки рельсов узкой колеи.

### Примерный расчет калибровки рельса типа Р65

На рис. 179 приведены размеры рельса Р65 в соответствии с ГОСТ 8161—63. Принимаем схему прокатки этого рельса в условиях завода «Азовсталь», а именно: исходный блюм, поступающий от блюминга 1150 сечением 282×320 *мм*, после нагрева в нагревательных печах направляют в обжимную клеть 900 рельсобалочного стана 800, в которой дают пять проходов, далее раскат

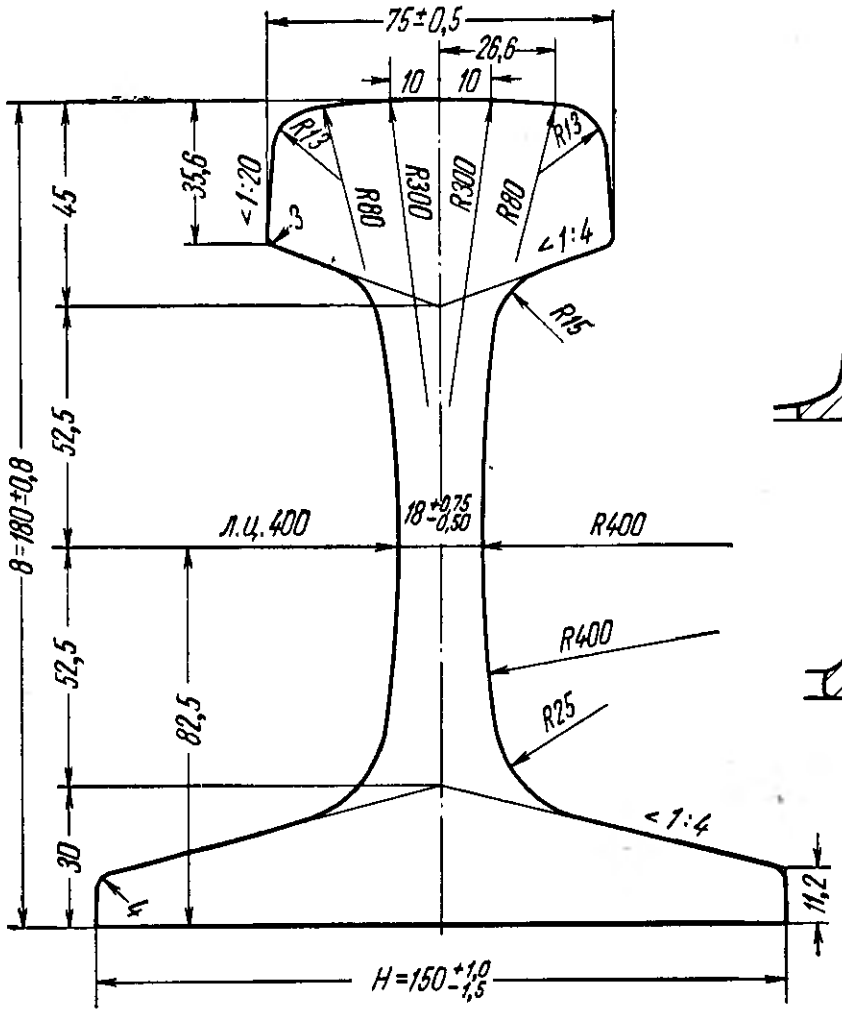



Рис. 179. Железнодорожный рельс Р65 (*Л. Ц.* — линия центра)

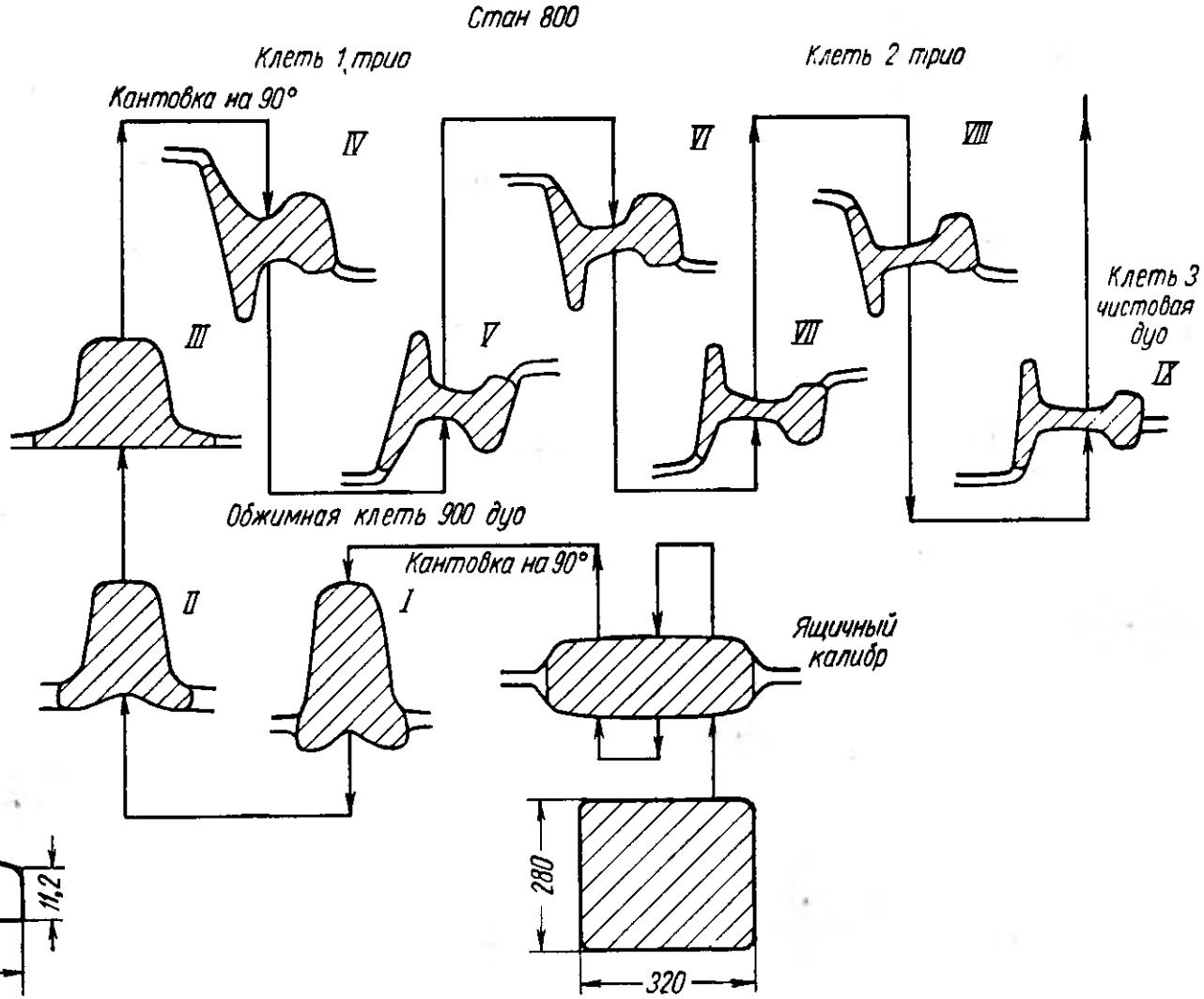



Рис. 180. Схема прокатки железнодорожного рельса Р65 на стане 800 завода «Азовсталь»

поступает в первую клеть трио, где производят три прохода, во второй клети — три прохода, в третьей клети — один проход.

Схема прокатки и калибровки приведена на рис. 180, из которого видно, что заготовку прокатывают сначала в обжимной клети за три прохода в прямоугольном (ящичном) калибре, после чего кантуют и задают в первый и второй трапецеидальный калибры. На чистовой линии прокатку ведут в третьем трапецеидальном и в шести рельсовых калибрах. Таким образом, прокатку рельса Р65 производят в девяти фасонных калибрах.

При расчете рельсовых калибров будем пользоваться методом Б. П. Бахтинова и М. М. Штернова [2]. При определении размеров тавровых калибров используем практические данные и результаты исследований.

Нумерацию калибров в данном случае принимаем по ходу прокатки, начиная с первого таврового калибра.

Определяем размеры отдельных элементов готового рельса.

*Подошва рельса*

Шейка рельса описана радиусом $R = 400$ *мм* (рис. 181).

Приращение толщины шейки у подошвы по сравнению с минимальной толщиной составляет

$$\Delta d = 2R\,(1 - \cos\alpha) = 4R \sin^2 \frac{\alpha}{2}.$$

Следовательно, толщина шейки в месте соединения с подошвой равна

$$d' = d + \Delta d = 18 + \Delta d.$$

Толщина подошвы у шейки

$$b = 30 - \frac{d'}{2} \operatorname{tg}\beta = 30 - \frac{d'}{8} = 30 - \frac{1}{8}(18 + \Delta d),$$

$$b = 82{,}5 - R \sin\alpha.$$

Поэтому можно записать

$$82{,}5 - R \sin\alpha = 30 - \frac{1}{8}\left(18 + 4R \sin^2 \frac{\alpha}{2}\right).$$

Так как угол $\alpha$ — небольшой ($\sim$7—8°), то, заменяя синусы углов на углы в радианах, получаем

$$82{,}5 - R\alpha = 30 - 2{,}25 - \frac{R}{8}\alpha^2.$$

После преобразования получим при $R = 400$ *мм* квадратное уравнение

$$\alpha^2 - 8\alpha + 1{,}106 = 0,$$

откуда

$$\alpha = 4 - \sqrt{16 - 1{,}106} = 0{,}142 \text{ рад.}$$

Следовательно, толщина подошвы у шейки равна

$$b = 82{,}5 - 396 \cdot 0{,}142 \approx 26 \text{ мм.}$$

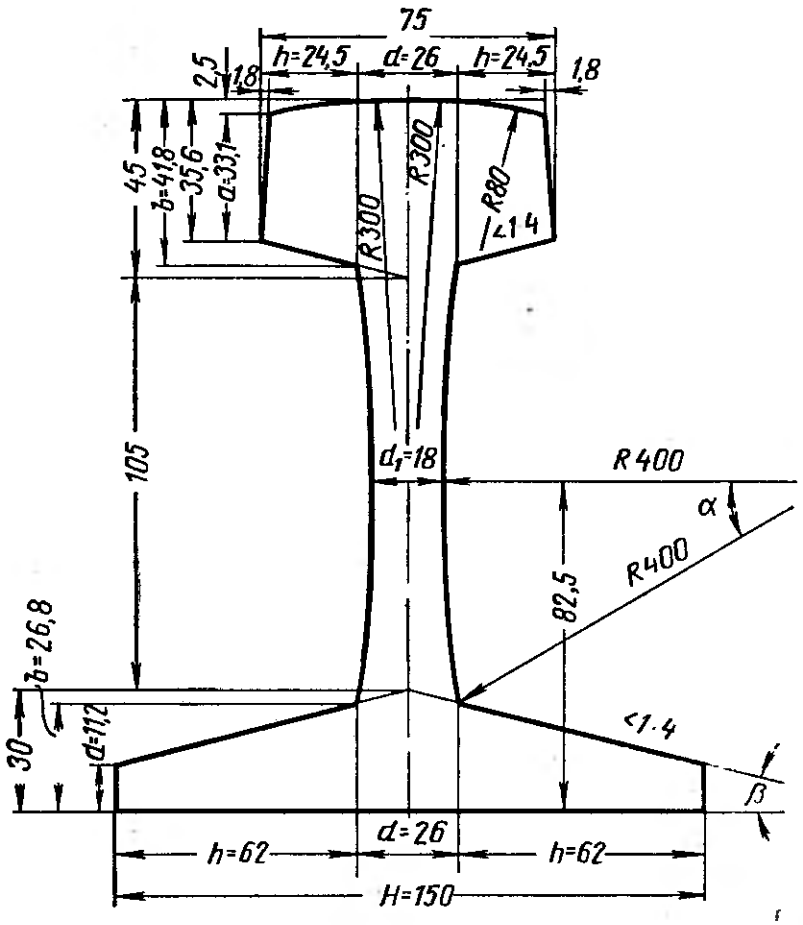



Рис. 181. Размеры рельса Р65 с делением профиля на элементы

Определяем толщину подошвы на конце:

$$a = 30 - \frac{150}{2} \cdot \frac{1}{4} = 11{,}2 \text{ мм.}$$

Высота фланца

$$h = \frac{H - d}{2} = \frac{150 - 26}{2} = 62{,}0 \text{ мм.}$$

### *Головка рельса*

Поскольку шейка симметрична относительно линии, соединяющей центры радиусов (середины ее высоты), то ширина ее в месте соединения с головкой также составляет 26 *мм*.

Толщина головки в месте соединения с шейкой

$$b = 45 - \frac{d}{2}\operatorname{tg}\beta = 45 - \frac{26{,}0}{2}\,\frac{1}{4} = 41{,}8 \text{ мм}.$$

Так как поверхность головки имеет выпуклости ($R' = 300$ *мм* и $R'' = 80$ *мм*), толщина головки на конце без учета закругления $r$ (в соответствии с ГОСТ 8161—63) равна

$$a = 35{,}6 - 2{,}5 = 33{,}1 \text{ мм}.$$

Определяем высоту фланцев

$$h = \frac{H - d}{2} = \frac{75 - 26}{2} = 24{,}5 \text{ мм}.$$

Устанавливаем общие и частные коэффициенты деформации для расчета размеров первых шести рельсовых калибров.

Общий коэффициент деформации для головки и подошвы рельса принимаем на основании заводских данных:

$$k_{\text{общ}} = 2{,}14.$$

Для шейки $k_{\text{общ}}$ принимаем несколько больше, чтобы обеспечить условие захвата в разрезном калибре. Предварительно для шейки принимаем

$$k_{\text{общ}} = 2{,}94.$$

В связи с тем, что у рельса Р65 толщина шейки в середине и у основания фланцев различна, необходимо для крайних частей шейки определить $k_{\text{общ}}$ отдельно. Очевидно, $k_{\text{общ}}$ для крайних частей шейки будет во столько раз меньше $k_{\text{общ}}$ для середины шейки, во сколько раз толщина крайних частей больше толщины средней.

Тогда для крайних частей шейки

$$k_{\text{общ}} = \frac{2{,}94}{\frac{d}{d_1}} = \frac{2{,}94}{\frac{26}{18}} = 2{,}04.$$

На основании принятых общих коэффициентов деформации для каждого из элементов профиля намечаем частные коэффициенты деформации с таким расчетом, чтобы их произведение равнялось общему коэффициенту $k_{\text{общ}}$ (табл. 86).

Для упрощения искомые размеры для каждого калибра обозначают буквами со штрихом.

При определении высоты открытого фланца, задаваемого в закрытый фланец, пользуемся формулой

$$h_0' = \frac{D_{\text{ш}} h_{\text{з}}}{D_{\text{ш}} - h_{\text{з}}},$$

где $D_{\text{ш}} = D - d$ — диаметр валков по шейке;

$h_{\text{з}}$ — высота закрытого фланца.

Таблица 86

**Частные коэффициенты деформации элемеитов профиля в рельсовых калибрах**

| Элементы профиля | Частные коэффициеиты деформации в калибрах [1] | | | | | $k_{общ}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | I (IX) чистовой | II (VIII) | III (VII) | IV (VI) | V | |
| Головка и подошва . . . | 1,069 | 1,12 | 1,152 | 1,2 | 1,29 | 2,14 |
| Средняя часть шейки . . . | 1,12 | 1,14 | 1,205 | 1,28 | 1,47 | 2,94 |
| Крайние части шейки . . | 1,045 | 1,065 | 1,0801 | 1,22 | 1,36 | 2,04 |

[1] Цифры в скобках — нумерация калибров по ходу прокатки.

Высота закрытого фланца, задаваемого в открытый, равна

$$h_з' = \frac{D_ш h_o}{D_ш + d},$$

где $h_0$ — высота открытого фланца;

$d$ — толщина шейки.

Эти формулы выведены из скоростных условий во фланцевых калибрах [2] с учетом того, что утяжка в закрытом фланце получается за счет меньшей скорости прокатки в этом фланце по сравнению со скоростью шейки.

С другой стороны, приращение в открытом фланце получается за счет большей скорости движения этого фланца по сравнению со скоростью шейки, так что вытяжка в открытой части фланца сдерживается за счет меньшей вытяжки шейки, в результате чего возникает приращение высоты. Хотя такая трактовка условий деформаций в открытых и закрытых фланцах не вполне убедительна, в примерном расчете оставляем этот способ определения высот фланцев, не нарушая общую методику расчета Б. П. Бахтинова и М. М. Штернова.

Сохраняем также формулы для определения толщины фланцев у конца ($a_з$ и $a_0'$), которые относятся к особенностям расчета фланцевых профилей, предлагаемого указанными авторами:

$$a_o' = \frac{1}{2}\left[\lambda_o (b_o + a_o)\frac{h_з'}{h_o'} - \lambda_з (b_з - a_з)\right];$$

$$a_з' = \frac{1}{2}\left[\lambda_з (b_з + a_з)\frac{h_o'}{h_з'} - \lambda_o (b_o - a_o)\right],$$

где $\lambda_o$ и $\lambda_з$ — коэффициенты обжатия толщины в открытом и закрытом фланцах.

Эти формулы получены из условия равномерной деформации по всему сечению калибра [2].

### *Калибр IX (чистовой)*

Размеры чистового калибра принимаем равными горячим размерам профиля.

#### *Подошва рельса*

Высота фланцев

$$h_0' = h_3' = 1{,}012h = 1{,}012 \cdot 62{,}0 = 62{,}7 \text{ мм}.$$

Толщина фланцев у основания

$$b_0' = b_3' = 1{,}012b = 1{,}012 \cdot 26{,}8 = 27{,}1 \text{ мм}.$$

Толщина фланцев на конце

$$a_0' = a_3' = 1{,}012a = 1{,}012 \cdot 11{,}2 = 11{,}4 \text{ мм}.$$

Площадь каждого из фланцев

$$F' = \frac{b' + a'}{2} h' = \frac{27{,}1 + 11{,}4}{2} 62{,}7 = 1207 \text{ мм}^2.$$

#### *Головка рельсового калибра*

Высота фланцев

$$h_3' = 1{,}012h = 1{,}012 \cdot 24{,}5 = 24{,}8 \text{ мм}.$$

Толщина фланцев у основания

$$b_3' = 1{,}012b = 1{,}012 \cdot 41{,}8 = 42{,}3 \text{ мм}.$$

Толщина фланцев на конце

$$a_3' = 1{,}012a = 1{,}012 \cdot 33{,}1 = 33{,}4 \text{ мм}.$$

Площадь каждого из фланцев

$$F' = \frac{b' + a'}{2} h' = \frac{42{,}3 + 33{,}4}{2} 24{,}8 = 939 \text{ мм}^2.$$

#### *Шейка калибра*

Толщина в середине шейки

$$d_1' = 1{,}012d_1 = 1{,}012 \cdot 18 = 18{,}2 \text{ мм}.$$

Толщина в местах соединения с подошвой и головкой

$$d' = 1{,}012d = 1{,}012 \cdot 26{,}0 = 26{,}3 \text{ мм}.$$

Ширина шейки

$$B' = 1{,}012B = 1{,}012 \cdot 180 = 182{,}1 \text{ мм}.$$

Площадь шейки с учетом боковых выемок по формуле для параболического сектора

$$F'_{ш} = 182{,}1 \cdot 26{,}3 - \frac{2}{3}(182{,}1 - 42{,}3 - 27{,}1)(26{,}3 - 18{,}2) =$$

$$= 4171 \text{ мм}^2.$$

Общая площадь профиля без учета закруглений

$$F' = 2 \cdot 1207 + 2 \cdot 939 + 4171 = 8463 \text{ мм}^2.$$

*Калибр VIII*

Размеры шейки калибра *VIII* рассчитываем, исходя из принятого в калибре IX коэффициента деформации в середине

$$k = 1{,}12;$$

по краям

$$k = 1{,}045.$$

Толщина шейки в середине

$$d' = kd_1 = 1{,}12 \cdot 18{,}2 = 20{,}4 \text{ мм};$$

в местах соединения с подошвой и головкой

$$d' = kd = 1{,}045 \cdot 26{,}3 = 27{,}5 \text{ мм}.$$

Радиус очертания шейки определяем в процессе построения калибра.

Поскольку максимальная утяжка высоты фланцев будет иметь место при минимальном диаметре валка, дальнейший расчет необходимо вести, исходя из условий прокатки на изношенных (переточенных) валках.

Минимально возможный диаметр переточенных валков в клети 3 можно принять равным 0,9 от номинального, тогда

$$D_{min} = 0{,}9D = 0{,}9 \cdot 850 = 765 \text{ мм}.$$

Определяем размеры и коэффициент обжатия высоты и толщины в каждом элементе профиля.

*Подошва рельсового калибра*

Высота искомого открытого фланца калибра *VIII*

$$h'_0 = \frac{D_{ш} h_з}{D_{ш} - h_з} = \frac{(765 - 26{,}3) \cdot 62{,}7}{765 - 26{,}3 - 62{,}7} = 68{,}4 \text{ мм}.$$

Коэффициент обжатия высоты в закрытой части калибра *IX*

$$\eta_з = \frac{h'_{с.о}}{h_{с.з}} = \frac{h'_0 + \frac{d'}{2}}{h_з + \frac{d}{2}} = \frac{68{,}4 + \frac{27{,}5}{2}}{62{,}7 + \frac{26{,}3}{2}} = 1{,}083.$$

Коэффициент обжатия толщины в закрытой части калибра *IX*

$$\lambda_з = \frac{k}{\eta_з} = \frac{1{,}069}{1{,}083} = 0{,}987,$$

т. е. по толщине фланец не обжимается.

Высота искомого закрытого фланца калибра *VIII*

$$h_з' = \frac{D_ш h_о}{D_ш + d} = \frac{(765 - 26{,}3)\cdot 62{,}7}{765 - 26{,}3 + 26{,}3} = 60{,}6 \text{ мм}.$$

Коэффициент обжатия высоты в открытом фланце калибра *IX*

$$\eta_о = \frac{h_з' + \frac{d'}{2}}{h_о + \frac{d}{2}} = \frac{61 + \frac{27{,}5}{2}}{63 + \frac{26{,}3}{2}} = 0{,}982.$$

Коэффициент обжатия толщины в открытом фланце девятого калибра

$$\lambda_о = \frac{k}{\eta_о} = \frac{1{,}083}{0{,}986} = 1{,}1.$$

По найденным коэффициентам обжатия определяем толщину фланцев.

Толщиа искомого открытого фланца у основания

$$b_о' = b_з\lambda_з = 27{,}1\cdot 0{,}987 = 26{,}6 \text{ мм}.$$

Толщина искомого открытого фланца у края

$$a_о' = \frac{1}{2}\left[\lambda_о (b_о + a_о)\frac{h_з'}{h_о'} - \lambda_з (b_з - a_з)\right] =$$

$$= \frac{1}{2}\left[1{,}1\,(27{,}1 + 11{,}4)\frac{60{,}6}{68{,}4} - 0{,}987\,(27{,}1 - 11{,}4)\right] = 11{,}1 \text{ мм}.$$

Площадь открытого фланца

$$F_о' = \frac{b_о' + a_о'}{2} h_о' = \frac{26{,}6 + 11{,}2}{2} 68{,}4 = 1288 \text{ мм}^2.$$

Толщина искомого закрытого фланца у основания

$$b_з' = b_о\lambda_о = 27{,}1\cdot 1{,}1 = 29{,}8 \text{ мм}.$$

Толщина искомого закрытого фланца у края

$$a_з' = \frac{1}{2}\left[\lambda_з (b_з + a_з)\frac{h_о'}{h_з'} - \lambda_о (b_о - a_о)\right] =$$

$$= \frac{1}{2}\left[0{,}98\,(27{,}1 + 11{,}4)\frac{68{,}4}{60{,}6} - 1{,}1\,(27{,}1 - 11{,}4)\right] = 12{,}7 \text{ мм}.$$

Площадь искомого закрытого фланца

$$F_з' = \frac{b_з' + a_з'}{2} h_з' = \frac{29{,}8 + 12{,}7}{2} 60{,}6 = 1288 \text{ мм}^2.$$

*Головка рельсового калибра*

В чистовом калибре верхний и нижний фланцы головки прокатываются в закрытых частях калибра, следовательно, они находятся в одинаковых условиях деформации. Поэтому фланцы профиля, получаемого из калибра *VIII*, также должны быть одинаковыми, а следовательно, размеры этих фланцев необходимо рассчитывать, учитывая условия последующей деформации в закрытой части калибра.

Высота искомых фланцев

$$h_о' = h_з' = \frac{D_ш h_з}{D_ш - h_з} = \frac{(765 - 26{,}3)\,24{,}8}{765 - 26{,}3 - 24{,}8} = 25{,}7 \text{ мм}.$$

Коэффициент обжатия высоты головки в чистовом калибре

$$\eta_з = \frac{h_о' + \frac{d'}{2}}{h_з + \frac{d}{2}} = \frac{25{,}7 + \frac{27{,}5}{2}}{24{,}8 + \frac{26{,}3}{2}} = 1{,}04.$$

Коэффициент обжатия толщины головки в чистовом калибре

$$\lambda_з = \frac{k}{\eta_з} = \frac{1{,}069}{1{,}04} = 1{,}028.$$

Толщина фланцев у основания

$$b_о' = b_з' = b_з \lambda_з = 42{,}3 \cdot 1{,}028 = 43{,}4 \text{ мм}.$$

Толщина фланцев у края

$$a_о' = a_з' = a_з \lambda_з = 33{,}2 \cdot 1{,}028 = 34{,}3 \text{ мм}.$$

Площадь каждого из фланцев

$$F_о' = F_з' = \frac{b + a}{2} h = \frac{43{,}4 + 34{,}3}{2} 25{,}8 = 1002 \text{ мм}^2.$$

*Шейка*

Толщина шейки определена в начале расчета. Для определения ширины шейки принимаем уширение в калибре *IX* по формуле

$$\Delta b = 0{,}01 \cdot B + (n - 1) = 0{,}01 \cdot 182{,}1 + (1 - 1) = 1{,}82 \text{ мм},$$

где $n$ — номер прохода против хода прокатки.

Тогда ширина шейки в калибре *VIII*

$$B' = B - \Delta b = 182{,}1 - 1{,}82 = 180{,}3 \text{ мм}.$$

Площадь шейки с учетом закруглений

$$F'_{ш} = 180{,}3 \cdot 27{,}5 - \frac{2}{3}(180{,}3 - 26{,}6 - 43{,}6)(27{,}5 - 20{,}2) =$$

$$= 4420 \text{ мм}^2.$$

Общая площадь профиля без учета закруглений

$$F' = 2 \cdot 1288 + 2 \cdot 1002 + 4420 = 9000 \text{ мм}^2.$$

*Седьмой калибр*

Размеры калибра *VII* рассчитываем, исходя из принятого для калибра *VIII* коэффициента деформации $k$:

| | |
|---|---|
| В головке и в подошве рельса | 1,12 |
| По середине шейки рельса | 1,14 |
| По краям шейки рельса | 1,065 |

Определяем толщину шейки в калибре *VII*:

$$d'_1 = kd_1 = 1{,}14 \cdot 20{,}4 = 23{,}2 \text{ мм};$$

$$d' = kd = 1{,}065 \cdot 27{,}5 = 29{,}3 \text{ мм}.$$

Минимальный диаметр переточенных валков

$$D_{min} = 0{,}9D = 0{,}9 \cdot 850 = 765 \text{ мм}.$$

Определяем размеры и коэффициенты обжатия высоты и толщины в каждом из элементов профиля.

*Подошва рельсового калибра*

Высота открытого фланца

$$h'_о = \frac{D_ш h_з}{D_ш - h_з} = \frac{(765 - 27{,}5)\,60{,}6}{765 - 27{,}5 - 60{,}6} = 66 \text{ мм}.$$

Коэффициент обжатия высоты в закрытой части калибра *VIII*

$$\eta_з = \frac{h'_о + \frac{d'}{2}}{h_з + \frac{d}{2}} = \frac{66 + \frac{29{,}3}{2}}{60{,}6 + \frac{27{,}5}{2}} = 1{,}084.$$

Коэффициент обжатия толщины в закрытой части калибра *VIII*

$$\lambda_з = \frac{k_з}{\eta_з} = \frac{1{,}12}{1{,}084} = 1{,}033.$$

Высота закрытого фланца

$$h'_з = \frac{D_ш h_о}{D_ш + d} = \frac{(765 - 27{,}5)\,68{,}4}{765 - 27{,}5 + 27{,}5} = 66{,}0 \text{ мм}.$$

Коэффициент обжатия высоты в открытой части калибра *VIII*

$$\eta_o = \frac{h_з' + \frac{d'}{2}}{h_o + \frac{d}{2}} = \frac{66 + \frac{29,3}{2}}{68,4 + \frac{27,5}{2}} = 0,982.$$

Коэффициент обжатия толщины в открытой части калибра *VIII*

$$\lambda_o = \frac{k}{\eta_o} = \frac{1,12}{0,982} = 1,14.$$

Толщина открытого фланца у основания

$$b_o' = b_з\lambda_з = 29,8 \cdot 1,033 = 30,8 \text{ мм}.$$

Толщина открытого фланца у края

$$a_o' = \frac{1}{2}\left[\lambda_o(b_o + a_o)\frac{h_з'}{h_o'} - \lambda_з(b_з - a_з)\right] =$$

$$= \frac{1}{2}\left[1,14\,(26,6 + 11,1)\frac{66,0}{66} - 1,033\,(29,8 - 12,7)\right] = 12,7 \text{ мм}.$$

Площадь открытого фланца

$$F_o' = \frac{b_0' + a_0'}{2} h_o' = \frac{30,8 + 12,7}{2} 66 = 1432 \text{ мм}^2.$$

Толщина закрытого фланца у основания

$$b_з' = b_o\lambda_o = 26,6 \cdot 1,14 = 30,4 \text{ мм}.$$

Толщина закрытого фланца у конца

$$a_з' = \frac{1}{2}\left[\lambda_з\,(b_з + a_з)\frac{h_o'}{h_з'} - \lambda_o(b_o - a_o)\right] =$$

$$= \frac{1}{2}\left[1,033\,(29,8 + 12,7)\,\frac{66}{60} - 1,14\,(26,6 - 11,1)\right] = 13,0 \text{ мм}.$$

Площадь закрытого фланца

$$F_з' = \frac{b_з' + a_з'}{2} h_з' = \frac{30,4 + 13,0}{2} 66,0 = 1432 \text{ мм}^2.$$

*Головка рельсового калибра*

$$h_o' = \frac{D_ш h_з}{D_ш - h_з} = \frac{(765 - 27,5)\,25,8}{765 - 27,5 - 25,8} = 26,6 \text{ мм}.$$

Коэффициент обжатия высоты в закрытой части калибра *VIII*

$$\eta_з = \frac{h_о + \frac{d'}{2}}{h_з + \frac{d}{2}} = \frac{26{,}6 + \frac{29{,}3}{2}}{25{,}8 + \frac{27{,}5}{2}} = 1{,}043.$$

Коэффициент обжатия толщины в закрытой части калибра *VIII*

$$\lambda_з = \frac{k}{\eta_з} = \frac{1{,}12}{1{,}043} = 1{,}074.$$

Высота закрытого фланца

$$h'_з = \frac{D_ш h}{D_ш + d} = \frac{(765 - 27{,}5)\,25{,}8}{765 - 27{,}5 + 27{,}5} = 24{,}5 \text{ мм}.$$

Коэффициент обжатия высоты в открытой части калибра *VIII*

$$\eta_о = \frac{h'_з + \frac{d'}{2}}{h_о + \frac{d}{2}} = \frac{24{,}5 + \frac{29{,}3}{2}}{25{,}8 + \frac{27{,}5}{2}} = 1{,}01.$$

Коэффициент обжатия толщины в открытой части калибра *VIII*

$$\lambda_о = \frac{k}{\eta_о} = \frac{1{,}12}{1{,}01} = 1{,}1.$$

Толщина закрытого фланца у основания

$$b'_з = b_о\lambda_о = 43{,}4 \cdot 1{,}1 = 47{,}7 \text{ мм}.$$

Толщина закрытого фланца у края

$$a'_з = \frac{1}{2}\left[\lambda_з (b_з + a_з)\frac{h'_о}{h'_з} - \lambda_о (b_о - a_о)\right] =$$

$$= \frac{1}{2}\left[1{,}074\,(43{,}4 + 34{,}3)\,\frac{26{,}6}{24{,}5} - 1{,}1\,(43{,}4 - 34{,}3)\right] = 40{,}4 \text{ мм}.$$

Площадь закрытого фланца

$$F'_з = \frac{b'_з + a'_з}{2} h'_з = \frac{47{,}7 + 40{,}4}{2}\,24{,}5 = 1075 \text{ мм}^2.$$

Толщина открытого фланца у основания

$$b'_о = b_з\lambda_з = 43{,}4 \cdot 1{,}074 = 46{,}4 \text{ мм}.$$

Толщина открытого фланца у края

$$a'_о = \frac{1}{2}\left[\lambda_о (b_о + a_о)\frac{h'_з}{h'_о} - \lambda_з (b_з - a_з)\right] =$$

$$= \frac{1}{2}\left[1{,}12\,(43{,}4 + 33{,}9)\,\frac{24{,}5}{26{,}6} - 1{,}074\,(43{,}4 - 34{,}3)\right] = 34{,}1 \text{ мм}.$$

Площадь открытого фланца

$$F_o' = \frac{b_o' + a_o'}{2} h_o' = \frac{46{,}4 + 34{,}1}{2} 26{,}7 = 1075 \text{ мм}^2.$$

*Шейка калибра*

Определяем уширение в калибре *VIII*:

$$\Delta b_2 = 0{,}01B + (n - 1) = 0{,}01 \cdot 182{,}1 + (2 - 1) = 2{,}8 \text{ мм}.$$

Ширина шейки в калибре *VII*

$$B' = B - \Delta b = 180{,}30 - 2{,}8 = 177{,}5 \text{ мм}.$$

Площадь шейки с учетом выемки посредине

$$F_ш' = 177{,}5 \cdot 29{,}3 - \frac{2}{3}(177{,}5 - 30{,}62 - 46{,}4)(29{,}3 - 23) =$$

$$= 4778 \text{ мм}^2.$$

Общая площадь профиля

$$F' = 2 \cdot 1432 + 2 \cdot 1075 + 4778 = 9792 \text{ мм}^2.$$

*Калибр VI*

Размеры калибра *VI* рассчитываем, исходя из принятых для калибра *VII* коэффициентов деформации $k$:

| | |
|---|---|
| Для головки и подошвы | 1,152 |
| Для средней части шейки | 1,205 |
| Для крайней части шейки | 1,08 |

Определяем толщину шейки в калибре *VI*:

$$d_1' = kd_1 = 1{,}205 \cdot 23{,}2 = 27{,}9 \text{ мм};$$

$$d' = kd = 1{,}08 \cdot 29{,}3 = 31{,}6 \text{ мм}.$$

При определении высоты фланцев подошвы и головки в калибре *VI* необходимо учитывать, что повышение коэффициента деформации в середине шейки должно вызвать их утяжку. Вследствие этого, кроме естественной утяжки и приращения высоты фланцев (вызванных разностью скоростей), необходимо учитывать дополнительную утяжку вызванную неравномерной деформацией.

Если обозначить эту дополнительную утяжку через $e$, то при повышенном коэффициенте деформации в шейке профиля формулы

$$\Delta h_з = \frac{h_з^2}{D_ш - h_з} \quad \text{и} \quad \Delta h_o = \frac{h_o d}{D_ш + d}$$

примут вид

$$\Delta h_з = \frac{h_з^2}{D_ш - h_з} + e \text{ и } \Delta h_о = -\frac{h_о d}{D_ш + d} + e.$$

Учитывая незначительность объема металла, подвергающегося усиленному обжатию, примем для данного случая, что дополнительная утяжка составляет 30% от естественной.

*Подошва рельсового калибра*

Величина естественной утяжки

$$\Delta h_з = \frac{h_з^2}{D_ш - h_з} = \frac{66^2}{765 - 29{,}3 - 66} = 6{,}4 \text{ мм}.$$

Дополнительная утяжка вследствие неравномерности деформации при $e = 0{,}3$ равна

$$\Delta h_з = 0{,}3 \cdot 6{,}4 = 1{,}9 \text{ мм}.$$

Окончательная величина утяжки

$$\Delta h_з = 6{,}4 + 1{,}9 = 8{,}3 \text{ мм}.$$

Высота фланца в открытой части калибра *VI*

$$h_о' = h_з + \Delta h_з = 66 + 8{,}3 = 74{,}3 \text{ мм}.$$

Коэффициент обжатия фланца по высоте в закрытой части калибра *VII*

$$\eta_з = \frac{h_о' + \frac{d'}{2}}{h_з + \frac{d}{2}} = \frac{74{,}3 + \frac{31{,}6}{2}}{66 + \frac{29{,}3}{2}} = 1{,}118.$$

Коэффициент обжатия фланца по толщине в закрытой части калибра *VII*

$$\lambda_з = \frac{k}{\eta_з} = \frac{1{,}152}{1{,}118} = 1{,}03.$$

Высота закрытого фланца

$$h_з' = \frac{D_ш h_о}{D + d} + e = \frac{(765 - 29{,}3)\,66}{765 - 29{,}3 + 29{,}3} + 1{,}9 = 64{,}4 \text{ мм}.$$

Коэффициент обжатия фланца по высоте в открытой части калибра *VII*

$$\eta_о = \frac{h_з' + \frac{d'}{2}}{h_о + \frac{d}{2}} = \frac{64{,}4 + \frac{31{,}6}{2}}{66 + \frac{29{,}3}{2}} = 0{,}99.$$

Коэффициент обжатия фланца по толщине в открытой части калибра *VII*

$$\lambda_o = \frac{k}{\eta_o} = \frac{1{,}155}{0{,}99} = 1{,}162.$$

Толщина открытого фланца у основания

$$b_o' = b_з\lambda_з = 30{,}4 \cdot 1{,}03 = 31{,}6 \text{ мм}.$$

Толщина открытого фланца у конца

$$a_o' = \frac{1}{2}\left[\lambda_o(b_o + a_o)\frac{h_з'}{h_o'} - \lambda_з(b_з - a_з)\right] =$$

$$= \frac{1}{2}\left[1{,}162(30{,}8 + 12{,}6)\frac{64{,}4}{74{,}3} - 1{,}03(30{,}4 - 13{,}0)\right] = 12{,}8 \text{ мм}.$$

Площадь открытого фланца

$$F_o' = \frac{31{,}6 + 12{,}8}{2}74{,}3 = 1645 \text{ мм}^2.$$

Толщина закрытого фланца у основания

$$b_з' = b_o\lambda_o = 30{,}8 \cdot 1{,}162 = 35{,}8 \text{ мм}.$$

Толщина закрытого фланца у конца

$$a_з' = \frac{1}{2}\left[\lambda_з(b_з + a_з)\frac{h_o'}{h_з'} - \lambda_o(b_o - a_o)\right] =$$

$$= \frac{1}{2}\left[1{,}03(30{,}6 + 12{,}8)\frac{74{,}3}{64{,}4} - 1{,}162(30{,}8 - 12{,}7)\right] = 15{,}3 \text{ мм}.$$

Площадь закрытого фланца

$$F_з' = \frac{b_з' + a_з'}{2}h_з = \frac{35{,}8 + 15{,}3}{2}64{,}4 = 1645 \text{ мм}^2.$$

*Головка рельсового калибра*

$$\Delta h_з = \frac{h_з^2}{D_ш - h_з} = \frac{24{,}5^2}{756 - 29{,}3 - 24{,}5} = 0{,}86 \text{ мм}.$$

Дополнительная утяжка вследствие неравномерной деформации равна при $e = 0{,}3$

$$\Delta h_з = 0{,}3 \cdot 0{,}86 = 0{,}26 \text{ мм}.$$

Общая величина утяжки

$$\Delta h_з = 0{,}86 + 0{,}26 = 1{,}12 \text{ мм}.$$

Высота фланца в открытой части калибра *VI*

$$h_o' = h_з + \Delta h_з = 24{,}9 + 1{,}12 = 26 \text{ мм}.$$

Коэффициент обжатия фланца по высоте в закрытой части калибра *VII*

$$\eta_з = \frac{h_о' + \frac{d'}{2}}{h_з + \frac{d}{2}} = \frac{26{,}0 + \frac{31{,}6}{2}}{24{,}5 + \frac{29{,}3}{2}} = 1{,}06.$$

Коэффициент обжатия фланца по толщине в закрытой части калибра *VII*

$$\lambda_з = \frac{k}{\eta_з} = \frac{1{,}152}{1{,}06} = 1{,}09.$$

Высота закрытого фланца

$$h_з' = \frac{D_ш h_о}{D_ш + d} + e = \frac{(765 - 29{,}3)\,26{,}6}{765 - 29{,}3 + 29{,}3} + 0{,}26 = 26 \text{ мм}.$$

Коэффициент обжатия фланца по высоте в открытой части калибра *VII*

$$\eta_о = \frac{h_з' + \frac{d'}{2}}{h_о + \frac{d}{2}} = \frac{26 + \frac{31{,}6}{2}}{26{,}6 + \frac{29{,}3}{2}} = 1{,}01.$$

Коэффициент обжатия фланца по толщине в открытой части калибра *VII*

$$\lambda_о = \frac{k}{\eta_о} = \frac{1{,}152}{1{,}01} = 1{,}14.$$

Толщина открытого фланца у основания

$$b_о' = b_з\lambda_з = 47{,}5 \cdot 1{,}09 = 51{,}7 \text{ мм}.$$

Толщина открытого фланца у конца

$$a_о' = \frac{1}{2}\left[\lambda_о (b_о + a_о)\frac{h_з'}{h_о'} - \lambda(b_з - a_з)\right] =$$

$$= \frac{1}{2}\left[1{,}14(46{,}4 - 34{,}1)\frac{26}{26} - 1{,}09(47{,}7 - 40{,}4)\right] = 41{,}3 \text{ мм}.$$

Площадь открытого фланца

$$F_о' = \frac{b_о' + a_о'}{2} h_о' = \frac{51{,}7 + 41{,}3}{2} 26 = 1208 \text{ мм}^2.$$

Толщина закрытого фланца у основания

$$b_з' = b_о\lambda_о = 46{,}0 \cdot 1{,}14 = 52{,}4 \text{ мм}.$$

Толщина закрытого фланца у конца

$$a'_з = \frac{1}{2}\left[\lambda_з (b_з + a_з)\frac{h'_о}{h'_з} - \lambda_о (b_о - a_о)\right] =$$

$$= \frac{1}{2}\left[1{,}09\,(47{,}5 + 39)\frac{26}{26} - 1{,}14\,(46{,}0 - 34{,}5)\right] = 40{,}6 \text{ мм}.$$

Площадь закрытого фланца

$$F'_з = \frac{b'_з + a'_з}{2} h'_з = \frac{52{,}4 + 40{,}6}{2} 26 = 1208 \text{ мм}^2.$$

*Шейка рельсового калибра*

Уширение в калибре *VII*

$$\Delta b = 0{,}01B + (n - 1) = 0{,}01 \cdot 182{,}1 + (3 - 1) \approx 3{,}8 \text{ мм}.$$

Ширина шейки в калибре *VI*

$$B' = B - \Delta b = 177{,}5 - 3{,}8 \approx 173{,}7 \text{ мм}.$$

Площадь шейки определяем, исходя из прямолинейных ее очертаний и рассматривая обжимаемую часть как две трапеции, соприкасающиеся своими меньшими основаниями:

$$F'_ш = 173{,}7 \cdot 31{,}6 - \frac{1}{2}(173{,}7 - 35{,}6 - 52{,}4)(31{,}6 - 27{,}7) =$$

$$= 5315 \text{ мм}^2.$$

Общая площадь профиля по скелету калибра

$$F' = 2 \cdot 1645 + 2 \cdot 1208 + 5315 = 11021 \text{ мм}^2.$$

*Калибр V*

В калибре *VI* принимаем следующие коэффициенты деформации $k$:

| | |
|---|---|
| В головке и подошве рельса | 1,2 |
| В середине шейки | 1,28 |
| По краям шейки | 1,22 |

Толщина шейки в калибре *V*

$$d'_1 = kd_1 = 1{,}28 \cdot 27{,}9 = 35{,}7 \text{ мм};$$

$$d_1 = kd = 1{,}22 \cdot 31{,}6 = 38{,}6 \text{ мм}.$$

Дополнительную утяжку, вызванную неравномерной деформацией, учитываем таким же образом, как и при расчете калибра *VI*, ориентировочно принимаем величину $e$ равной 50% от естественной утяжки.

*Подошва рельсового калибра*

Естественная утяжка в закрытой части калибра *VI*

$$\Delta h_з = \frac{h_з^2}{D_ш - h_з} = \frac{64{,}4^2}{765 - 31{,}6 - 64{,}4} = 6{,}2 \text{ мм}.$$

Дополнительная утяжка, вызванная неравномерной деформацией, равна

$$e = 0{,}5\,\Delta h_з = 0{,}5 \cdot 6{,}2 = 3{,}1 \text{ мм}.$$

Общая утяжка в закрытой части калибра *VI*

$$\Delta h_з = 6{,}2 + 3{,}1 = 9{,}3 \text{ мм}.$$

Высота открытого фланца калибра *V*

$$h_о' = h_з + \Delta h_з = 64{,}1 + 9{,}3 = 73{,}4 \text{ мм}.$$

Коэффициент обжатия высоты в закрытой части калибра *VI*

$$\eta_з = \frac{h_о' + \frac{d'}{2}}{h_з + \frac{d}{2}} = \frac{73{,}4 + \frac{38{,}6}{2}}{64{,}4 + \frac{31{,}6}{2}} = 1{,}156.$$

Коэффициент обжатия толщины в закрытой части калибра *VI*

$$\lambda_з = \frac{k}{\eta_з} = \frac{1{,}2}{1{,}156} = 1{,}038.$$

Высота закрытого фланца

$$h_з' = \frac{D_ш h_о}{D_ш + d} + e = \frac{(765 - 31{,}6)\,74{,}3}{765} + 3{,}1 = 74{,}3 \text{ мм}.$$

Коэффициент обжатия фланца по высоте в открытой части калибра *VI*

$$\eta_о = \frac{h_з' + \frac{d'}{2}}{h_о + \frac{d}{2}} = \frac{74{,}3 + \frac{38{,}6}{2}}{74{,}3 + \frac{31{,}6}{2}} = 1{,}04.$$

Коэффициент обжатия фланца по толщине в открытой части калибра *VI*

$$\lambda_о = \frac{k}{\eta_о} = \frac{1{,}2}{1{,}04} = 1{,}15.$$

Толщина открытого фланца у основания

$$b_о' = b_з \lambda_з = 35{,}8 \cdot 1{,}038 = 37{,}2 \text{ мм}.$$

Толщина открытого фланца у конца

$$a_o' = \frac{1}{2}\left[\lambda_o (b_o + a_o)\frac{h_з'}{h_o'} - \lambda_з (b_з - a_з)\right] =$$

$$= \frac{1}{2}\left[1{,}15\,(31{,}6 + 12{,}8)\,\frac{74{,}3}{73{,}3} - 1{,}038\,(35{,}8 - 15{,}3)\right] = 15{,}2 \text{ мм}.$$

Площадь открытого фланца

$$F_o' = \frac{b_o' + a_o'}{2} h_o' = \frac{37{,}2 + 15{,}2}{2}\,73{,}4 = 1922 \text{ мм}^2.$$

Толщина закрытого фланца у основания

$$b_з' = b_o \lambda_o = 31{,}6 \cdot 1{,}15 = 36{,}4 \text{ мм}.$$

Толщина закрытого фланца у конца

$$a_з' = \frac{1}{2}\left[\lambda_з (b_з + a_з)\frac{h_o'}{h_з'} - \lambda_o (b_o - a_o)\right] =$$

$$= \frac{1}{2}\left[1{,}038\,(35{,}8 + 15{,}3)\,\frac{73{,}3}{74{,}3} - 1{,}15\,(31{,}6 - 12{,}8)\right] = 15{,}4 \text{ мм}.$$

Площадь закрытого фланца

$$F = \frac{b_з' + a_з'}{2} h_з' = \frac{36{,}4 + 15{,}4}{2}\,74{,}3 = 1922 \text{ мм}^2.$$

*Головка рельсового калибра*

Естественная утяжка

$$\Delta h_з = \frac{h_з^2}{D_ш - h_з} = \frac{26{,}0^2}{765 - 31{,}6 - 26} = 0{,}96 \text{ мм}.$$

Дополнительная утяжка из-за неравномерной деформации

$$e = 0{,}5\ \Delta h_з = 0{,}5 \cdot 0{,}96 = 0{,}48 \text{ мм}.$$

Общая утяжка

$$\Delta h_з = 0{,}96 + 0{,}48 = 1{,}44 \text{ мм} \approx 1{,}5 \text{ мм}.$$

Высота фланца в открытой части калибра *V*

$$h_o' = h_з + \Delta h_з = 26{,}0 + 1{,}5 = 27{,}5 \text{ мм}.$$

Коэффициент обжатия головки по высоте в закрытой части калибра *VI*

$$\eta_з = \frac{h_o' + \frac{d'}{2}}{h_з + \frac{d}{2}} = \frac{27{,}5 + \frac{38{,}6}{2}}{26{,}0 + \frac{31{,}6}{2}} = 1{,}13.$$

Коэффициент обжатия головки по толщине в закрытой части калибра *VI*

$$\lambda_з = \frac{k}{\eta_з} = \frac{1{,}2}{1{,}13} = 1{,}061.$$

Высота закрытого фланца

$$h'_з = \frac{D_ш h_о}{D_ш + d} + e = \frac{(765 - 31{,}6)\,26}{765} + 0{,}48 = 25{,}4 \text{ мм}.$$

Коэффициент обжатия головки по высоте в открытой части калибра *VI*

$$\eta_о = \frac{h'_з + \frac{d'}{2}}{h_о + \frac{d}{2}} = \frac{25{,}4 + \frac{38{,}6}{2}}{26 + \frac{31{,}6}{2}} = 1{,}08.$$

Коэффициент обжатия головки по толщине в открытой части калибра *VI*

$$\lambda_о = \frac{k}{\eta_о} = \frac{1{,}2}{1{,}08} = 1{,}11.$$

Толщина открытого фланца у основания

$$b'_о = b_з\lambda_з = 52{,}4 \cdot 1{,}061 = 55{,}6 \text{ мм}.$$

Толщина открытого фланца у края

$$a'_о = \frac{1}{2}\left[\lambda_о (b_о + a_о)\frac{h'_з}{h'_о} - \lambda_з (b_з - a_з)\right] =$$

$$= \frac{1}{2}\left[1{,}11\,(51{,}7 + 41{,}3)\frac{25{,}4}{27{,}5} - 1{,}061\,(52{,}4 - 40{,}6)\right] = 41{,}8 \text{ мм}.$$

Площадь открытого фланца

$$F'_о = \frac{b'_о + a'_о}{2} h'_о = \frac{55{,}6 + 41{,}8}{2}\,27{,}5 = 1334 \text{ мм}^2.$$

Толщина закрытого фланца у основания

$$b'_з = b_о\lambda_о = 51{,}7 \cdot 1{,}11 = 57{,}4 \text{ мм}.$$

Толщина закрытого фланца у края

$$a'_з = \frac{1}{2}\left[\lambda_з (b_з + a_з)\frac{h'_о}{h'_з} - \lambda_о (b_о - a_о)\right] =$$

$$= \frac{1}{2}\left[1{,}061\,(52{,}4 + 40{,}6)\frac{27{,}5}{25{,}4} - 1{,}11\,(51{,}7 - 41{,}3)\right] = 47{,}6 \text{ мм}.$$

Площадь закрытого фланца

$$F'_з = \frac{b'_з + a'_з}{2} h'_з = \frac{57{,}4 + 47{,}6}{2}\,25{,}4 = 1334 \text{ мм}^2.$$

*Шейка рельса*

Уширение в шейке калибра *VI* *

$$\Delta b = 0{,}01B + (n - 1) = 0{,}01 \cdot 182{,}1 + (4 - 1) = 4{,}8 \text{ мм}.$$

Ширина шейки в калибре *V*

$$B' = B - \Delta b = 173{,}7 - 4{,}8 = 168{,}9 \text{ мм}.$$

Площадь шейки

$$F'_{ш} = 168{,}9 \cdot 38{,}6 - \frac{1}{2}(168{,}9 - 36{,}3 - 57{,}4)(38{,}6 - 35{,}4) =$$

$$= 6383 \text{ мм}^2.$$

Общая площадь профиля

$$F' = 2 \cdot 1922 + 2 \cdot 1334 + 6383 = 12\,985 \text{ мм}^2.$$

*Калибр IV*

В калибре *V* (по ходу прокатки) принимаем следующие коэффициенты деформации $k$:

| | |
|---|---|
| В головке и подошве рельса . . . . . | 1,29 |
| В середине шейки . . . . . | 1,47 |
| По краям шейки . . . . . | 1,36 |

Определяем толщину шейки в калибре *IV*:

$$d'_1 = kd_1 = 1{,}47 \cdot 35{,}7 = 52{,}5 \text{ мм};$$

$$d' = kd = 1{,}36 \cdot 38{,}6 = 52{,}5 \text{ мм}.$$

Принимаем для калибра *IV* дополнительную утяжку фланцев равной половине естественной:

$$e = 0{,}5\Delta h_з.$$

*Подошва рельсового калибра*

Естественная утяжка в закрытой части калибра *V*

$$\Delta h_з = \frac{h_з^2}{D_ш - h_з} = \frac{74{,}3^2}{765 - 38{,}6 - 74{,}3} = 8{,}3 \text{ мм}.$$

Дополнительная утяжка, вызванная неравномерностью деформации, равна

$$e = 0{,}5\Delta h_з = 0{,}5 \cdot 8{,}3 \approx 4{,}2 \text{ мм}.$$

Общая утяжка

$$\Delta h_з = 8{,}3 + 4{,}2 = 12{,}5 \text{ мм}.$$

---

* Если считать против хода прокатки, то для шестого калибра $n = 4$.

Высота открытого фланца калибра *IV*

$$h_o' = h_з + \Delta h_з = 74{,}3 + 12{,}5 = 86{,}8 \text{ мм}.$$

Коэффициент обжатия подошвы по высоте в закрытой части калибра *V*

$$\eta_з = \frac{h_o' + \frac{d'}{2}}{h_з + \frac{d}{2}} = \frac{86{,}8 + \frac{52{,}5}{2}}{74{,}3 + \frac{38{,}6}{2}} = 1{,}21.$$

Коэффициент обжатия подошвы по толщине в закрытой части калибра *V*

$$\lambda_з = \frac{k}{\eta_з} = \frac{1{,}29}{1{,}21} = 1{,}066.$$

Высота закрытого фланца калибра *IV*

$$h_з' = \frac{D_ш h_o}{D_ш + d} + e = \frac{(765 - 38{,}6)\,73{,}3}{765} + 4{,}2 = 73{,}8 \text{ мм}.$$

Коэффициент обжатия подошвы по высоте в открытой части калибра *V*

$$\eta_o = \frac{h_з' + \frac{d'}{2}}{h_o + \frac{d}{2}} = \frac{73{,}8 + \frac{52{,}5}{2}}{73{,}3 + \frac{38{,}6}{2}} = 1{,}08.$$

Коэффициент обжатия подошвы по толщине в открытой части калибра *V*

$$\lambda_o = \frac{k}{\eta_o} = \frac{1{,}29}{1{,}08} = 1{,}196.$$

Толщина открытого фланца у основания

$$b_o' = b_з \lambda_з = 36{,}4 \cdot 1{,}066 = 38{,}8 \text{ мм}.$$

Толщина открытого фланца у конца

$$a_o' = \frac{1}{2}\left[\lambda_o (b_o + a_o)\frac{h_з'}{h_o'} - \lambda_з (b_з - a_з)\right] =$$

$$= \frac{1}{2}\left[1{,}196\,(37{,}2 + 15{,}2)\,\frac{73{,}8}{86{,}8} - 1{,}066\,(36{,}4 - 15{,}4)\right] = 15{,}5 \text{ мм}.$$

Площадь открытого фланца

$$F_o' = \frac{b_o' + a_o'}{2} h_o' = \frac{38{,}8 + 15{,}4}{2}\,86{,}8 = 2340 \text{ мм}^2.$$

Площадь закрытого фланца у основания

$$b_з' = b_o \lambda_o = 37{,}2 \cdot 1{,}196 = 44{,}4 \text{ мм}.$$

Толщина закрытого фланца у края

$$a_з' = \frac{1}{2}\left[\lambda_з (b_з + a_з)\frac{h_о'}{h_з'} - \lambda_о (b_о - a_о)\right] =$$

$$= \frac{1}{2}\left[1{,}066\,(36{,}4 + 15{,}4)\,\frac{86{,}8}{73{,}8} - 1{,}196\,(37{,}2 - 15{,}2)\right] = 19{,}3 \text{ мм}.$$

Площадь закрытого фланца

$$F_з' = \frac{b_з' + a_з'}{2}\,h_з' = \frac{44{,}4 + 19{,}3}{2}\,73{,}8 = 2340 \text{ мм}^2.$$

*Головка рельсового калибра*

Величина естественной утяжки

$$\Delta h_з = \frac{h_з^2}{D_ш - h_з} = \frac{25{,}4^2}{765 - 38{,}6 - 25{,}4} = 0{,}92 \text{ мм}.$$

Дополнительная утяжка вследствие неравномерной деформации

$$e = 0{,}5\,\Delta h_з = 0{,}5 \cdot 0{,}92 = 0{,}46 \text{ мм}.$$

Общая утяжка

$$\Delta h_з = 0{,}92 + 0{,}46 \approx 1{,}4 \text{ мм}.$$

Высота фланца в открытой части калибра *IV*

$$h_о' = h_з + \Delta h_з = 25{,}4 + 1{,}4 = 26{,}8 \text{ мм}.$$

Коэффициент обжатия головки по высоте в закрытой части калибра *V*

$$\eta_{1з} = \frac{h_о' + \frac{d'}{2}}{h_з + \frac{d}{2}} = \frac{26{,}8 + \frac{52{,}5}{2}}{25{,}4 + \frac{38{,}6}{2}} = 1{,}185.$$

Коэффициент обжатия головки по толщине в закрытой части калибра *V*

$$\lambda_з = \frac{k}{\eta_{1з}} = \frac{1{,}29}{1{,}185} = 1{,}09.$$

Высота закрытого фланца

$$h_з' = \frac{D_ш h_о}{D_ш + d} + e = \frac{(765 - 38{,}6)\,27{,}5}{765} + 0{,}46 = 26{,}4 \text{ мм}.$$

Коэффициент обжатия высоты в открытой части калибра $V$

$$\eta_o = \frac{h_з' + \frac{d'}{2}}{h_o + \frac{d}{2}} = \frac{26{,}4 + \frac{52{,}5}{2}}{27{,}5 + \frac{38{,}6}{2}} = 1{,}12.$$

Коэффициент обжатия толщины в открытой части калибра $V$

$$\lambda_o = \frac{k}{\eta_o} = \frac{1{,}29}{1{,}12} = 1{,}162.$$

Толщина открытого фланца у основания

$$b_o' = b_з\lambda_з = 57{,}4 \cdot 1{,}09 = 62{,}6 \text{ мм}.$$

Толщина открытого фланца у конца

$$a_o' = \frac{1}{2}\left[\lambda_o (b_o + a_o)\frac{h_з'}{h_o'} - \lambda_з (b_з - a_з)\right] =$$

$$= \frac{1}{2}\left[1{,}162\,(55{,}6 + 41{,}8)\,\frac{26{,}4}{26{,}8} - 1{,}09\,(57{,}4 - 47{,}6)\right] = 50{,}1 \text{ мм}.$$

Площадь открытого фланца

$$F = \frac{b_o' + a_o'}{2} h_o' = \frac{62{,}6 + 50{,}1}{2}\, 26{,}8 = 1520 \text{ мм}^2.$$

Толщина закрытого фланца у основания

$$b_з' = b_o\lambda_o = 55{,}6 \cdot 1{,}162 = 64{,}7 \text{ мм}.$$

Толщина закрытого фланца у края

$$a_з' = \frac{1}{2}\left[\lambda_з (b_з + a_з)\frac{h_o'}{h_з'} - \lambda_o (b_o - a_o)\right] =$$

$$= \frac{1}{2}\left[1{,}09\,(57{,}4 + 47{,}6)\,\frac{26{,}8}{26{,}4} - 1{,}162\,(55{,}6 - 41{,}8)\right] = 50 \text{ мм}.$$

Площадь закрытого фланца

$$F_з' = \frac{b_з' + a_з'}{2} h_з' = \frac{64{,}7 + 50}{2}\, 26{,}4 = 1520 \text{ мм}^2.$$

*Шейка калибра*

Уширение шейки в калибре $V$

$$\Delta b = 0{,}01B + (n - 1) = 0{,}01 \cdot 182{,}1 + (5 - 1) = 5{,}8 \text{ мм}.$$

Ширина шейки в калибре $IV$

$$B' = B - \Delta b = 168{,}9 - 5{,}8 = 163{,}1 \text{ мм}.$$

Таблица 87

## Данные расчета рельсовых калибров (см. рис. 182)

| Номер прохода | Номер калибра по ходу расчета | Размеры шейки, *мм* | | | Тип фланца | Размеры головки, *мм* | | | Размеры подошвы, *мм* | | | | Общая площадь поперечного сечения, *мм²* | Общий коэффициент вытяжки |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | толщина посередине | толщина по краям | ширина | | высота от шейки | толщина у конца | толщина у шейки | тип фланца | высота от шейки | толщина у конца | толщина у шейки | | |
| 4 | *VI* | 52,5 | 52,5 | 163,1 | З | 26,4 | 50,0 | 64,7 | О | 86,8 | 15,5 | 38,8 | 16 260 | 1,30 |
| | | | | | О | 26,8 | 50,1 | 62,6 | З | 73,8 | 19,3 | 44,4 | | |
| 5 | *V* | 35,7 | 38,6 | 168,9 | О | 27,5 | 41,8 | 55,6 | З | 74,3 | 15,4 | 36,4 | 12 985 | 1,25 |
| | | | | | З | 25,4 | 47,6 | 57,4 | О | 73,4 | 15,2 | 37,2 | | |
| 6 | *IV* | 27,9 | 31,6 | 173,7 | З | 26,0 | 40,6 | 52,4 | О | 74,3 | 12,8 | 31,6 | 11 021 | 1,18 |
| | | | | | О | 26,0 | 41,3 | 51,7 | З | 64,4 | 15,3 | 35,8 | | |
| 7 | *III* | 23,2 | 29,3 | 177,5 | О | 26,6 | 34,1 | 46,4 | З | 66,0 | 13,0 | 30,8 | 9 792 | 1,13 |
| | | | | | З | 24,5 | 40,4 | 47,7 | О | 66,0 | 12,7 | 30,4 | | |
| 8 | *II* | 20,4 | 27,5 | 180,3 | О | 25,7 | 34,3 | 43,4 | О | 68,4 | 11,1 | 26,6 | 9 000 | 1,09 |
| | | | | | З | | | | З | 60,6 | 12,7 | 29,8 | | |
| 9 | *I* | 18,2 | 26,3 | 182,1 | З | 24,8 | 33,4 | 42,3 | О | 62,7 | 11,4 | 27,1 | 8 463 | 1,06 |
| | | | | | | | | | З | | | | | |

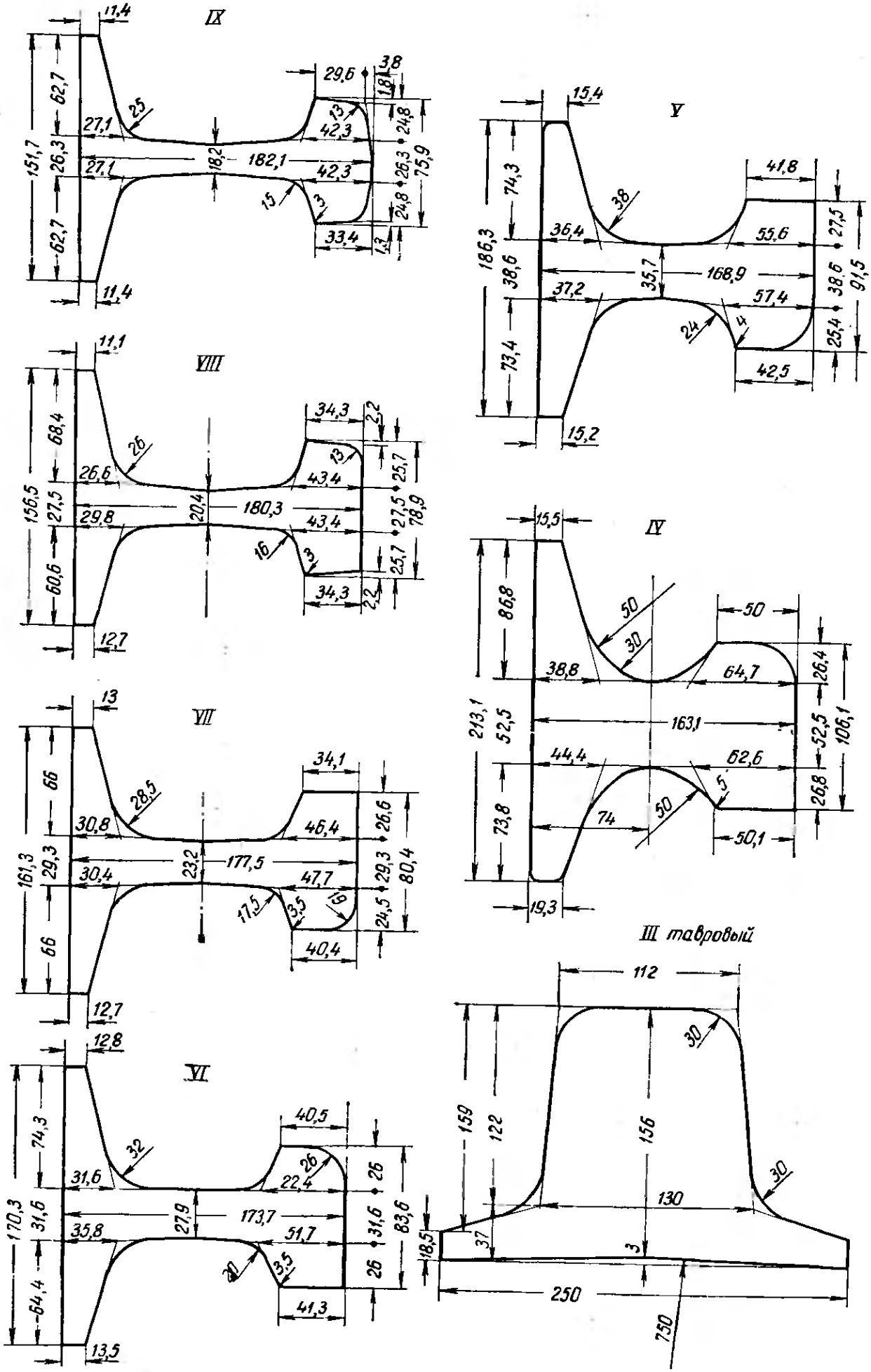



Рис. 182. Калибры для прокатки рельсов (размеры по данным примерного расчета)

Площадь шейки

$$F'_{ш} = 163{,}1 \cdot 52{,}5 - \frac{1}{2}(163{,}1 - 43{,}8 - 64{,}6)(52{,}5 - 52{,}5) =$$

$$= 8560 \text{ мм}^2.$$

Общая площадь профиля

$$F = 2 \cdot 2330 + 2 \cdot 1520 + 8560 = 16\,260 \text{ мм}^2.$$

Полученные расчетные данные приведены в табл. 87. Калибровка приведена на рис. 182.

## Определение размеров тавровых калибров

Расчет калибровки тавровых калибров представляет известные трудности, поэтому приходится пользоваться практическими данными хорошо работающих калибровок.

Ниже приведен расчет первых трех тавровых калибров при прокатке рельсов Р65 в условиях рельсо-балочного стана завода «Азовсталь».

При разработке тавровых калибров необходимо выбирать такие размеры, чтобы обеспечить интенсивную деформацию головки и подошвы, а также добиться эффективного раздробления первичной структуры металла и повышения прочностных свойств рельса. Большое значение при этом имеет общий коэффициент

Таблица 88

**Обжатия в тавровых калибрах при прокатке рельсов типа Р65**

| Калибр | Высота полосы по центру $H$, мм | Абсолютное обжатие $\Delta h$, мм | Общий коэффициент обжатия по высоте $H_з/h_1$ | Коэффициент обжатия высоты головки $H_{гол}/h_{гол}$ | Коэффициент обжатия высоты подошвы $H_п/h_п$ |
|---|---|---|---|---|---|
| Из блюма 300×300 мм | | | | | |
| Заготовка | 345 | — | — | — | — |
| *I* | 255 | 90 | 1,35 | 1,08 | 2,3 |
| *II* | 202 | 43 | 1,26 | 1,23 | 1,53 |
| *III* | 151 | 51 | 1,34 | 1,22 | 1,29 |
| Во всех калибрах | — | 194 | 2,28 | 1,62 | 4,55 |
| Из блюма 280×320 мм | | | | | |
| Заготовка | 371 | — | — | — | — |
| *I* | 255 | 116 | 1,45 | 1,05 | 3,13 |
| *II* | 203 | 42 | 1,26 | 1,26 | 1,37 |
| *III* | 151 | 52 | 1,34 | 1,46 | 1,21 |
| Во всех калибрах | — | 220 | 2,46 | 1,93 | 5,9 |

обжатия высоты в тавровых калибрах, который составляет $\frac{H_о}{H_з} = 2{,}25 \div 2{,}45$. Важное значение имеет также деформация отдельных элементов таврового профиля. Необходимо обеспечить интенсивные обжатия головки и подошвы.

В табл. 88 приведены заводские данные обжатия в тавровых калибрах при прокатке рельсов Р65 из блюмов $300 \times 320$ *мм* и $280 \times 320$ *мм*. Как видно из табл. 88, коэффициенты высотной деформации достигают больших значений, что благоприятно сказывается на качестве рельсов.

### *Тавровый калибр III*

Раскат из таврового калибра *III* задают в разрезной калибр *IV*, размеры которого определены выше.

На рис. 183 показана задача тавровой полосы из таврового калибра *III* в разрезной калибр *IV*.

На основе практических данных устанавливаем обжатие (утяжку) головки и подошвы.

Обжатие головки составляет $\Delta h_{гол} = 3 - 10$ *мм*, что обеспечивает удовлетворительное заполнение фланцев калибра.

Ширина таврового калибра *III* со стороны головки (рис. 183) составит

$$B'''_{гол} = h_{гол.\,о} + h_{гол.\,з} + d + (3 \div 10)\ мм,$$

где $h_{гол.\,о}$, $h_{гол.\,з}$ и $d$ — размеры разрезного калибра.

В нашем случае

$$B'''_{гол} = h_{гол.\,о} + h_{гол.\,з} + d + (3 \div 10) = 105{,}7 + 6{,}3 = 112\ мм.$$

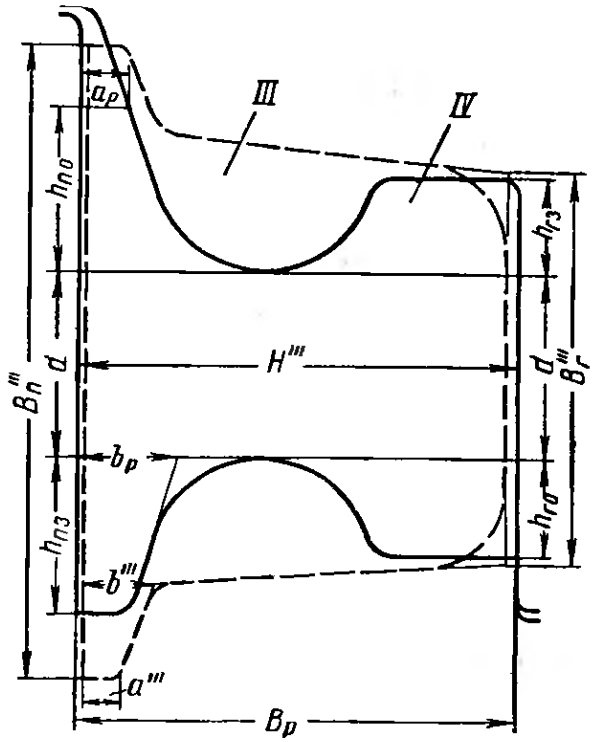



Рис. 183. Задача раската из таврового калибра *III* в разрезной калибр *IV*

Ширину подошвы калибра *III* определяем с учетом утяжки, составляющей 25—55 *мм*.

Следовательно, ширина подошвы составит

$$B'''_п = h_{п.\,о} + h_{п.\,з} + d + (25 \div 55) = 213{,}1 + 36{,}9 = 250\ мм.$$

При выборе высоты таврового калибра исходим из требования ограниченного уширения, необходимого для интенсивной проработки подошвы и головки.

По данным заводской практики, уширение в разрезном калибре колеблется в пределах 4—14 *мм*. Хорошие результаты получаются при уширении 5—7 *мм*.

Высота таврового калибра равна

$$H''' = B_р - (5 \div 7) = 164 - 5 = 159 \text{ мм}.$$

Угол захвата при задаче полосы из калибра *III* в разрезной равен

$$\cos\alpha = 1 - \frac{\Delta h}{D} = 1 - \frac{88}{798} = 0{,}89; \quad \alpha = 27°.$$

Угол захвата в разрезном калибре допускается до 30—35°.

Уклон фланцев подошвы принимаем на 2—3% меньше, чем в разрезном, чтобы обеспечить свободное проникновение металла в закрытый фланец разрезного калибра:

$$\delta = (97 \div 98)\frac{b_з - a_з}{b_{п.\,з}},$$

где $\delta$ — уклон фланцев в тавровом калибре *III*, %;

$b_з$ — толщина закрытого фланца подошвы у основания в разрезном калибре;

$a_з$ — толщина закрытого фланца подошвы у конца в разрезном калибре;

$b_{п.\,з}$ — высота закрытого фланца подошвы.

В нашем случае

$$\delta = (97 \div 98)\frac{b_з - a_з}{b_{п.\,з}} = 97\,\frac{44{,}4 - 19{,}3}{86{,}8}\,100 = 31\%.$$

Толщина фланца подошвы на конце $a'''$ должна быть на 0,5—1,5 *мм* меньше, чем соответствующий размер закрытого фланца разрезного калибра

$$a''' = a_з - (0{,}5 \div 1{,}5) \text{ мм}.$$

В нашем случае

$$a''' = a_з - (0{,}5 \div 1{,}5) = 19{,}3 - 1 = 18{,}3 \text{ мм}.$$

Уклон стенок калибра от головки и подошвы на основании практических данных принимаем в пределах 6—10%.

Зная уклоны для фланцев подошвы и для трапецеидальной части, можно определить толщину фланца $b'''$ у основания, а также высоту фланцев $h'''$ таврового калибра.

В нашем случае

$$b''' = a''' + \frac{\delta h'''}{100} = 18{,}3 + \frac{31 \cdot 61}{100} \approx 37 \text{ мм},$$

где $h'$ — высота фланца в тавровом калибре, определяемая построением и равная 61 *мм*.

Принимаем: уклон стенок трапецеидальной части 7,6%; высоту фланца по разъему $h''' = 61$ *мм*, ширину калибра по разъему $B'''_р = 130$ *мм*.

### *Тавровый калибр II*

Чтобы обеспечить вынужденное уширение фланцев подошвы, необходимо дать двукратное обжатие по их толщине:

$$a'' \approx 2a''',$$

где $a''$ и $a'''$ — толщины фланцев подошвы в калибрах *II* и *III*.

Как указывалось ранее, для разворота фланцев подошвы равнодействующая $P$ должна быть направлена наружу от точки $A$ (см. рис. 172).

Для обеспечения отгиба фланцев, по опытным данным, необходимо, чтобы расстояние между точками раската, вступающими в контакт с валками, т. е. ширина гребня калибра *II*, равнялась

$$B'' = B'''_р + (15 \div 30)\ мм,$$

где $B''$ — ширина основания гребня в калибре *II*;

$B'''_р$ — ширина трапецеидальной части калибра *III* по разъему.

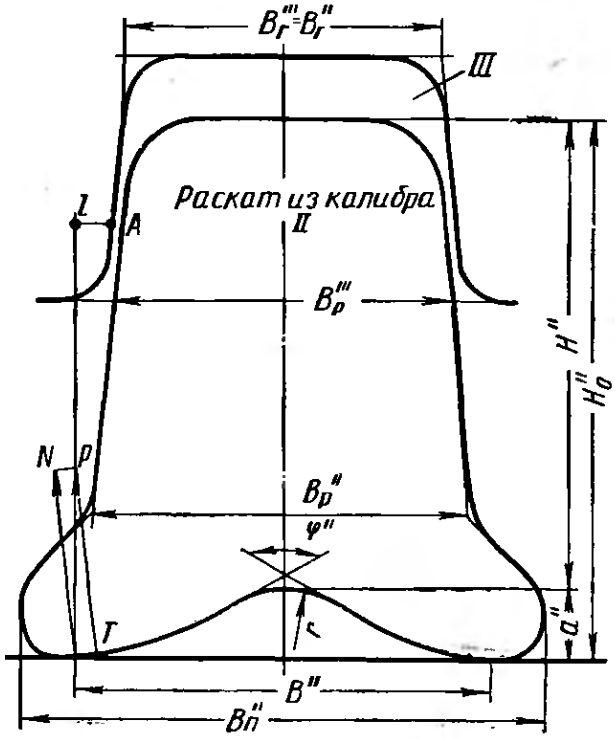



Рис. 184. Тавровые калибры. Задача раската из калибра *II* в калибр *III*

Угол разворота гребня $\varphi''$ в тавровом калибре *II* выбирают из условия нормального скольжения металла в поперечном направлении по поверхности гребня (рис. 184).

Угол разворота гребня принимают $\varphi'' = 110 \div 136°$. В этом случае наклон стенок гребня к горизонтали достигает $\beta'' = 22 \div 35°$ для стальных валков и $\beta'' = 17 \div 31°$ — для чугунных. Радиус закругления гребня принимают $r'' = 60$—$80$ *мм*.

Коэффициент высотной деформации в тавровом калибре *III* посередине составляет $\eta''' = 1{,}3 \div 1{,}4$, следовательно, высота ребрового калибра *II* равна

$$H'' = (1{,}3 \div 1{,}4)\, H'''.$$

Общую высоту второго калибра $H''_0$ (рис. 184) определяют с учетом высоты фланцев подошвы построением.

Для лучшей деформации по высоте верхней части раската рекомендуется ширину у головки в калибрах *II* и *III* принимать

одинаковой (рис. 183), т. е.

$$B''_{гол} \approx B'''_{гол}.$$

Ширину у подошвы калибра *II* принимаем равной

$$B''_{п} = B'''_{п} - \Delta b''',$$

где $\Delta b''' = 10 \div 25$ *мм* — уширение в калибре *III*.

Исходя из указанных рекомендаций, определим размеры таврового калибра *II* для нашего случая.

Высота калибра *II* по вертикальной оси симметрии

$$H'' = (1{,}3 \div 1{,}4)\, H' = 1{,}32 \cdot 159 = 210 \text{ мм}.$$

Общая ширина подошвы

$$B''_{п} = B'''_{п} - \Delta b''' = 250 - 15 - 235 \text{ мм}.$$

Ширину калибра у головки принимаем $B''_{гол} = 111$ *мм*.

Уклон боковых стенок трапецеидальной части принят 7,5%.

Ширина гребня в калибре *II* (см. рис. 183)

$$B''_{гр} = B'''_{р} + (15 \div 30) \text{ мм} = 130 + 25 = 155 \text{ мм}.$$

Угол разворота гребня

$$\varphi'' = 180 - 2\beta = 180 - 48 = 132°.$$

Радиус закругления вершины принимаем $r'' = 65$ *мм*.

Толщина фланца подошвы

$$a'' \approx 2a''' = 2 \cdot 18{,}3 = 36{,}6 \text{ мм}.$$

Высоту гребня, ширину калибра по разъему $B''_{р}$ и общую высоту второго калибра $H''_{об}$ находим построением:

$$h''_{гр} = 30 \text{ мм}; \quad B''_{р} = 134 \text{ мм}; \quad H''_{об} = 250 \text{ мм}.$$

### *Тавровый калибр I и размеры исходной заготовки*

Размеры таврового калибра *I* необходимо согласовывать с размерами калибра *II* и заготовки (рис. 185 и 186).

Высота калибра *I* посередине должна обеспечивать максимально возможную степень общего обжатия металла в калибре *II*, способствуя эффективному обжатию металла по высоте, идущего на головку. Коэффициент обжатия по высоте в середине в калибре *II* должен быть $\eta'' = 1{,}38 \div 1{,}4$, следовательно:

$$H' = (1{,}38 \div 1{,}4)\, H''.$$

Ширину калибра в верхней части и наклон стенок необходимо выбирать таким образом, чтобы полоса относительно свободно входила в ручей калибра *II*. В связи с этим уклон боковых стенок

можно принять равным 10—14%. Ширину калибра у головки принимаем $B'_{гол} \leqslant B''_{гол}$.

Радиус закругления вершины калибра *I* принимаем в пределах $R' = 90 \div 100$ *мм*.

Параметры разрезающего гребня в калибре *I* необходимо выбирать, исходя из соображений получения необходимых первичных

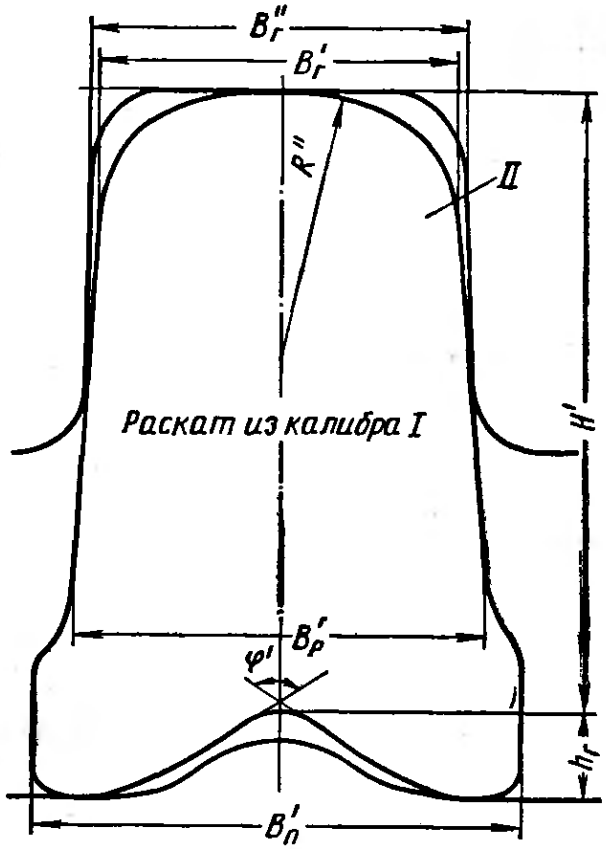



Рис. 185. Тавровые калибры. Задача раската из калибра *I* в калибр *II*

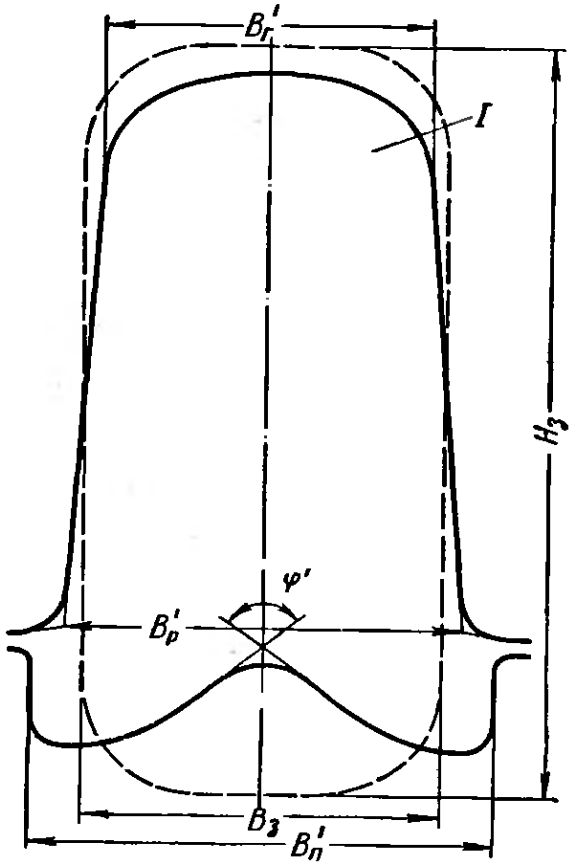



Рис. 186. Задача заготовки в тавровый калибр *I*

размеров фланцев подошвы, интенсивного раздробления литой структуры металла по месту будущей средней части (~1/3 длины) подошвы и обеспечения по возможности бóльшей деформации по высоте металла, идущего на головку.

На основании данных заводских калибровок можно принять следующие параметры разрезающего гребня:
высота

$$h_{гр} = 45 \div 50 \text{ мм};$$

угол разворота

$$\varphi = 100 \div 110°;$$

радиус закругления вершины

$$r = 35 \div 40 \text{ мм}.$$

Ширину таврового калибра *I* по разъему $B'_р$ определяем построением.

Ширина калибра по подошве $B'_{п}$ (см. рис. 185) должна обеспечивать достаточный простор на уширение металла при прокатке исходной заготовки для получения фланцев подошвы необходимой ширины.

Согласно практическим данным, уширение металла в калибре *II* можно принять равным $\Delta b'' \approx 40—50$ *мм*. Следовательно, ширина калибра *I* у подошвы равна

$$B'_{п} = B''_{п} - \Delta b''.$$

Боковое обжатие металла в калибре определяется шириной исходной заготовки и размерами верхней части калибра. Эти размеры необходимо выбрать таким образом, чтобы получить показатель защемления в пределах 0,3—0,5; при этом коэффициент обжатия металла, идущего на головку в калибре *I*, составит

$$\eta_{гол} = 1{,}08 \div 1{,}14.$$

Ширину исходной заготовки $B_з$ определяем по формуле [1]

$$B_з = k \frac{B'_р (1{,}258 - \eta_{гол}) + B'_{гол} (\eta_{гол} - 0{,}913)}{0{,}345}, \qquad (124)$$

где $B_р$ и $B_{гол}$ — значения ширины таврового калибра *I* по разъему и у головки;

$\eta_{гол} = 1{,}08 \div 1{,}14$ — коэффициент деформации металла, идущего на головку;

$k = 0{,}95 \div 1{,}1$ — коэффициент, учитывающий обжатие металла в калибре.

Приведенная формула дает хорошие результаты, если обжатие в калибре составляет 18—35%.

Высоту исходной заготовки $H_з$ определяем из выражения

$$H_з = k_1 \frac{0{,}87H'}{1{,}8 - \eta_{гол}}, \qquad (125)$$

где $H'$ — высота таврового калибра *I* по вертикальной оси;

$k_1 = 1{,}0 \div 1{,}04$ — коэффициент, учитывающий защемление.

Пользуясь приведенными формулами и практическими данными, определим размеры таврового калибра *I* и исходной прямоугольной заготовки.

Высоту таврового калибра *I* по вертикальной оси определяем из выражения

$$H' = \eta'' H'' = 1{,}335 \cdot 210 = 280 \text{ мм}.$$

---

[1] В. З. Аршавский. Исследование по усовершеиствованию условий деформации металла при прокатке железнодорожных рельсов. Автореферат канд. диссертации. Днепропетровск, 1965.

Ширину калибра у головки необходимо определять из условия $B'_{гол} < B''_{гол}$, поэтому принимаем $B'_{гол} = 110$ *мм*.

Уклон боковых стенок принимаем равным 9,36%.

Для улучшения обжатия металла головки в тавровом калибре *II* вершину калибра *I* делаем выпуклой и закругляем радиусом $R' = 90$ *мм*.

Параметры разрезающего гребня принимаем следующие: высота гребня

$$h_{гр} = 40 \text{ мм};$$

угол разворота

$$\varphi' = 100°;$$

радиус закругления вершины гребня

$$r' = 35 \text{ мм}.$$

Ширину таврового калибра *I* по разъему $(B'_р)$ определяем построением, а общую ширину у подошвы — из выражения

$$B'_п = B''_п - (40 \div 50) \text{ мм} =$$

$$= 235 - 45 = 190 \text{ мм}.$$

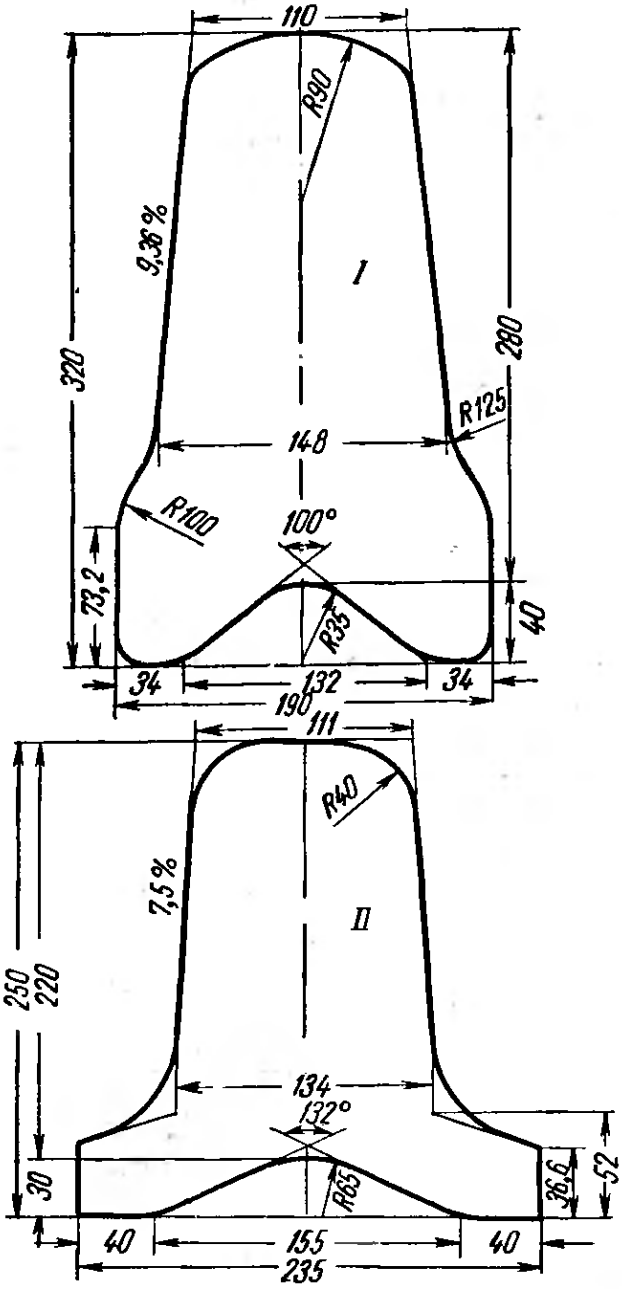



Рис. 187. Размеры тавровых калибров *I* и *II*

Ширину исходной заготовки находим по формуле

$$B_з = k \frac{B'_р (1{,}258 - \eta_{гол}) + B'_{гол} (\eta_{гол} - 0{,}913)}{0{,}345}.$$

По данному выражению определяем максимально допустимую ширину заготовки из условия получения достаточно эффективной деформации по высоте металла, идущего на головку при прокатке в тавровом калибре *I*. Обжатие в тавровом калибре *I* при высоте исходной заготовки 350 *мм* составит 20%. Отсюда коэффициент $k$, учитывающий степень деформации металла, можно принять равным 0,98.

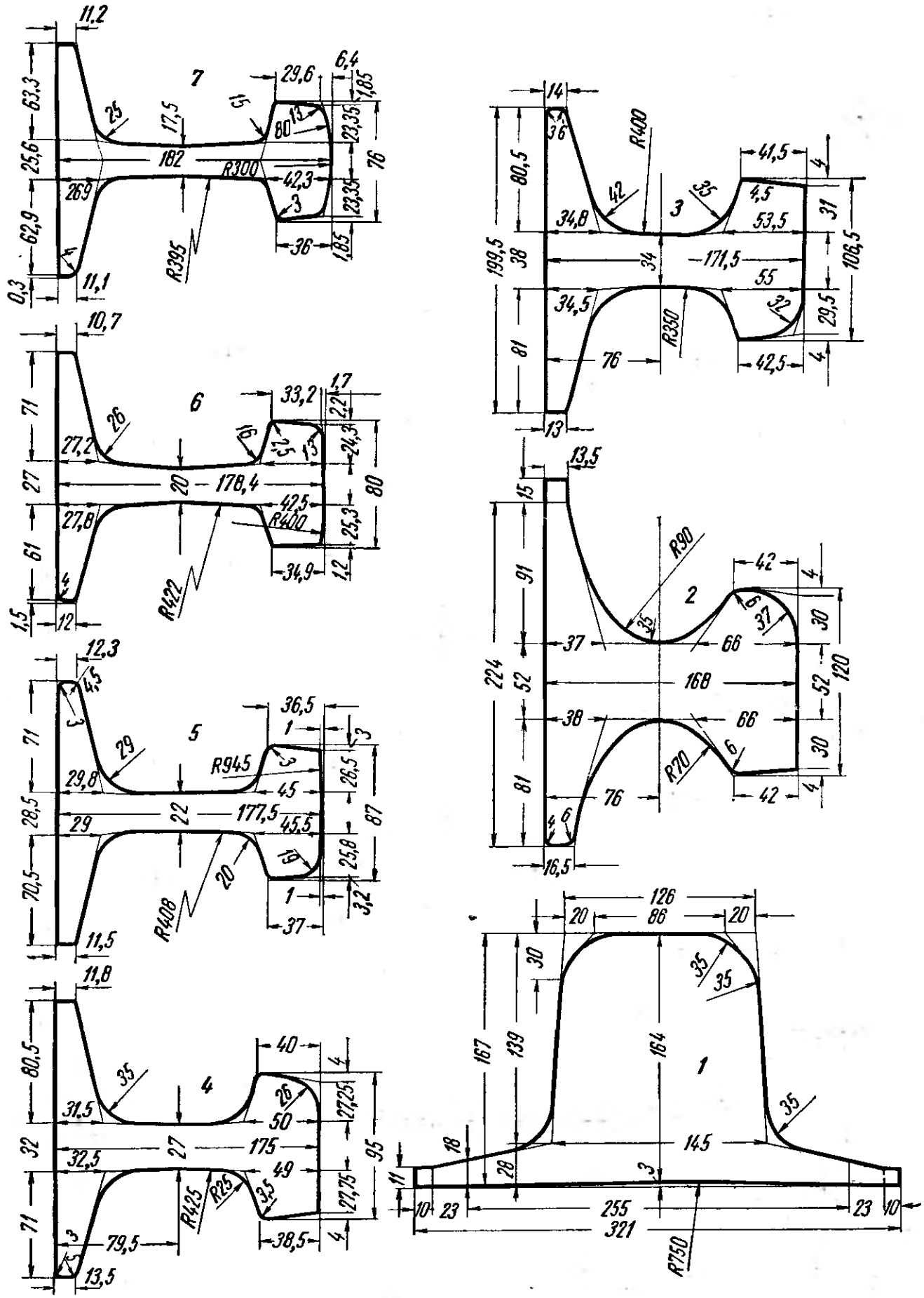



Рис. 188. Калибры для прокатки рельсов Р65 на рельсо-балочном стане завода «Азовсталь»

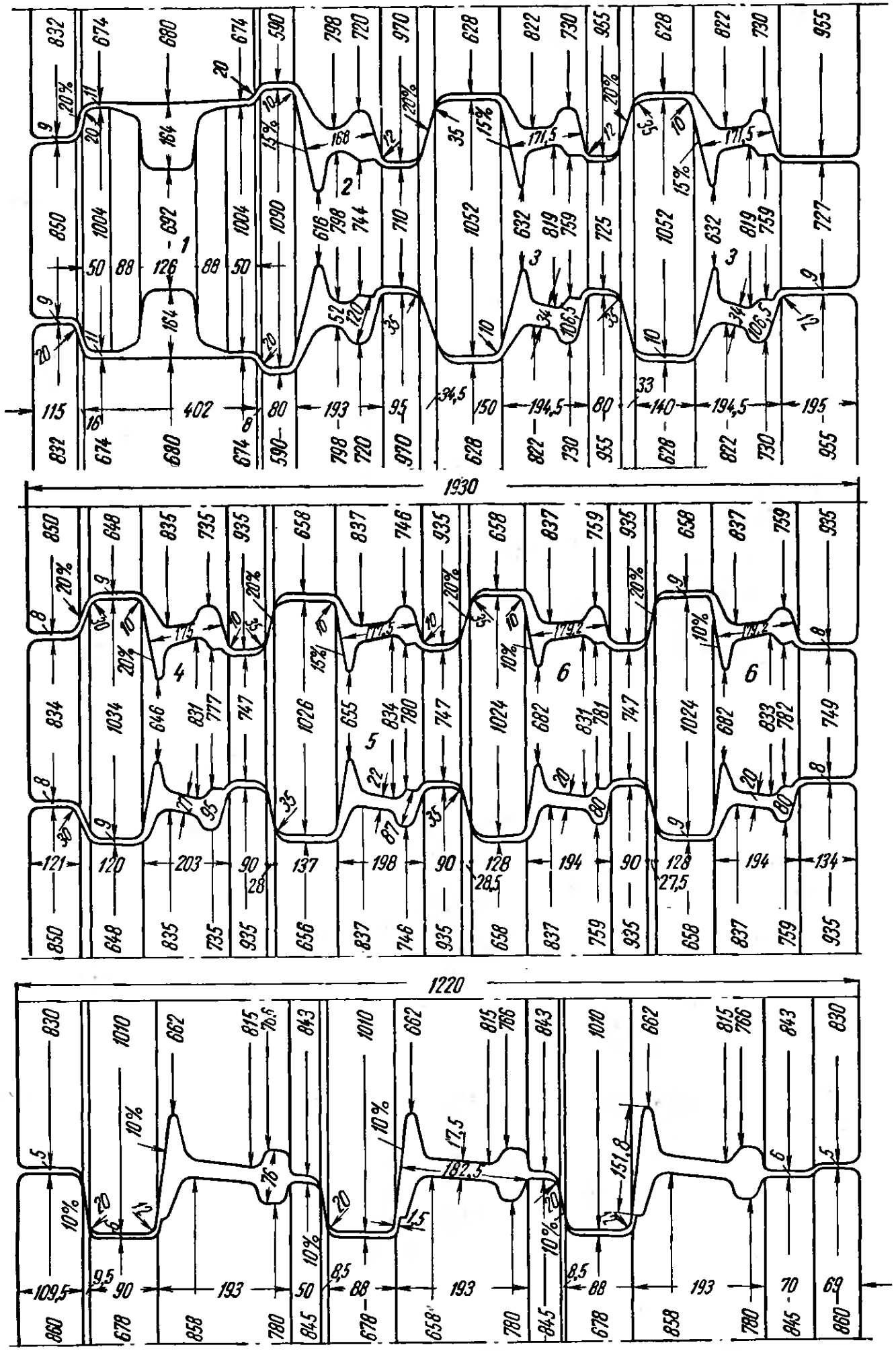



Рис. 189. Монтаж калибров для прокатки рельсов Р65 в валках линии 800 рельсо-балочного стана завода «Азовсталь»

**Расчетные размеры тавровых калибров для прокатки**

| Калибр | Высота по вертикальной оси $H$, мм | Общая высота калибра $H_0$, мм | Общая ширина по подошве калибра $B_0$, мм | Площадь калибра $F$, мм² | Коэффициент вытяжки $\mu$ | Обжатие высоты по вертикальной оси $\Delta h$, мм | $\eta = \frac{H}{h}$ | Угол захвата $\alpha$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 350 | 350 | 130 | 45 500 | — | — | — | — |
| *I* | 280 | 320 | 190 | 43 338 | 1,060 | 70 | 1,25 | 26° 30′ |
| *II* | 220 | 250 | 235 | 33 376 | 1,311 | 70 | 1,335 | 24° 30′ |
| *III* | 159 | 159 | 250 | 26 000 | 1,360 | 51 | 1,32 | 21° |
| Разрезной | 163,1 | — | 213,1 | — | — | — | — | 27° |
| Во всех тавровых | — | — | — | — | 1,885 | 191 | 2,20 | — |

Принимая коэффициент высотного обжатия металла головки в калибре равным $\eta_{гол} = 1{,}08$, определяем ширину заготовки:

$$B_з = 0{,}98\,\frac{148\,(1{,}258 - 1{,}08) + 110\,(1{,}08 - 0{,}913)}{0{,}345} = 130 \text{ мм}.$$

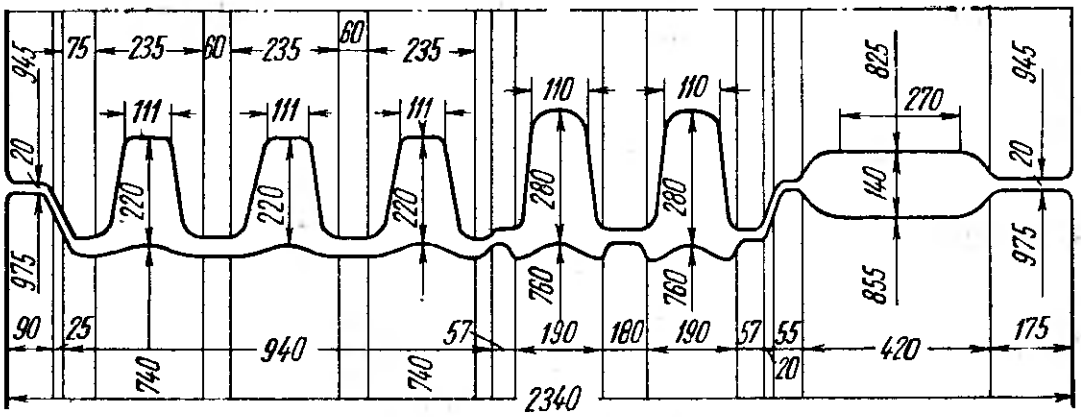



Рис. 190. Монтаж калибров обжимной клети 900 для прокатки рельсов Р65

Минимально необходимую высоту исходной заготовки определяем по формуле

$$H_з = k_1\,\frac{0{,}87H'}{1{,}8 - \eta_{гол}} = 1{,}03\,\frac{0{,}87 \cdot 280}{1{,}8 - 1{,}08} = 350 \text{ мм},$$

где $k_1 = 1{,}03$ — коэффициент, учитывающий защемление.

В табл. 89 приведены расчетные данные тавровых калибров и размеры исходной заготовки при прокатке рельсов Р65. Тавровые калибры, построенные по этим данным, приведены на рис. 182 и 187.

Таблица 89

**рельсов типа Р-65 (см. рис. 182 и 187)**

| Верхняя часть калибра | | | | Нижняя часть калибра | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ширина по верху $B_к$, *мм* | ширина по разъему $B_р$, *мм* | уклон стенок, % | защемление по верху $(B_з - B_к)$, *мм* | радиус закругления вершины $R$, *мм* | толщина фланцев на конце $a$, *мм* | высота гребня, $h_{гр}$ | угол разворота гребня $\varphi$ | радиус закругления вершины гребня $r$, *мм* | конфигурация боковых стенок гребня | ширина основания гребня $B$, *мм* |
| — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 110 | 148 | 9,36 | —20 | 90 | — | 40 | 100° | 35 | Вогнутые | 132 |
| 111 | 134 | 7,5 | +1 | — | 36,6 | 30 | 132° | 65 | Выпуклые | 155 |
| 112 | 130 | 7,6 | +1 | — | 18,3 | — | — | — | Ровные | — |
| 105,7 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| — | — | — | —18 | — | — | — | — | — | — | — |

В настоящее время на всех отечественных рельсо-балочных станах рельсы прокатывают по калибровкам с косым расположением калибров. Чертежи шаблонов одной из таких калибровок для прокатки рельсов Р65 на рельсо-балочном стане завода «Азовсталь» приведены на рис. 188, а на рис. 189 показан монтаж калибров в валках линии стана 800. Монтаж калибров обжимной клети 900 показан на рис. 190.

Глава XII

# ПРОКАТКА И КАЛИБРОВКА СПЕЦИАЛЬНЫХ ПРОФИЛЕЙ

## 1. ОСОБЕННОСТИ ПРОКАТКИ И КАЛИБРОВКИ СПЕЦИАЛЬНЫХ ПРОФИЛЕЙ

В сортаменте прокатных станов имеется целый ряд сложных профилей, применяемых в различных отраслях народного хозяйства. Сюда относятся специальные профили для строительства (сталь для оконных и фонарных переплетов, для шпунтовых свай), судостроения (полособульбовая и др.), паровозо- и вагоностроения (зетовая сталь), сельскохозяйственного машиностроения (сталь тавровая, коробчатая и др.), железнодорожного транс-

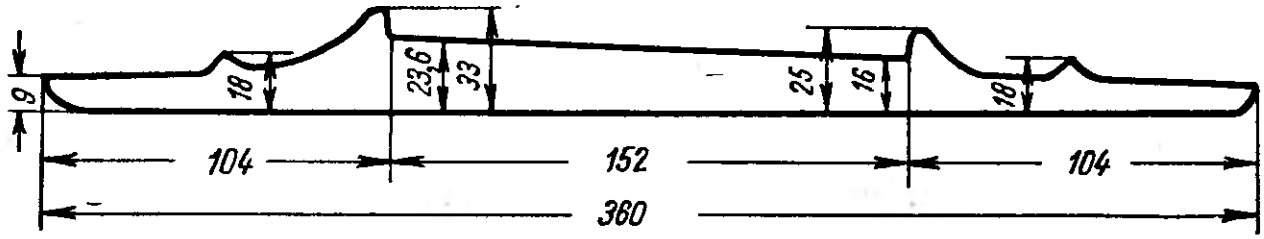



Рис. 191. Подкладка контрольного скрепления типа Д65 к рельсам Р65 (ГОСТ 8194—66)

порта (накладки и подкладки), автотракторостроения (автообод, бортовое кольцо) и ряд других профилей.

Большое значение в сортаменте прокатных изделий имеют экономичные профили — тонкостенные уголки, балки, швеллеры и другие горячекатаные фасонные профили специального назначения, которые могут давать экономию металла до 15% и выше.

При разработке схемы прокатки и калибровки того или иного сложного профиля рекомендуется руководствоваться следующими положениями:

1. Необходимо выяснить, к какому типовому профилю ближе всего подходит рассматриваемый профиль, чтобы использовать закономерности прокатки и калибровки типового профиля. Ряд сложных профилей имеет вид полосы с выступами, впадинами и т. п., поэтому такие профили можно прокатывать как полосу. Например, на рис. 191 приведена подкладка к железнодорожным рельсам, которую прокатывают как полосу. Получение выступов (реборд), имеющихся на готовом профиле, обеспечивается специальными противофланцами, имеющимися в промежуточных калибрах и питающими выступы профиля.

На рис. 192 показаны профили зетовой стали. Эти профили по схеме прокатки и калибровки имеют большое сходство с угловой сталью, поэтому при разработке калибровки зетовой стали следует использовать принципы калибровки угловой стали, а именно: режим обжатий, изгиб полок, уширение и т. д. К угловой стали по своей форме приближается также оконнорамный профиль.

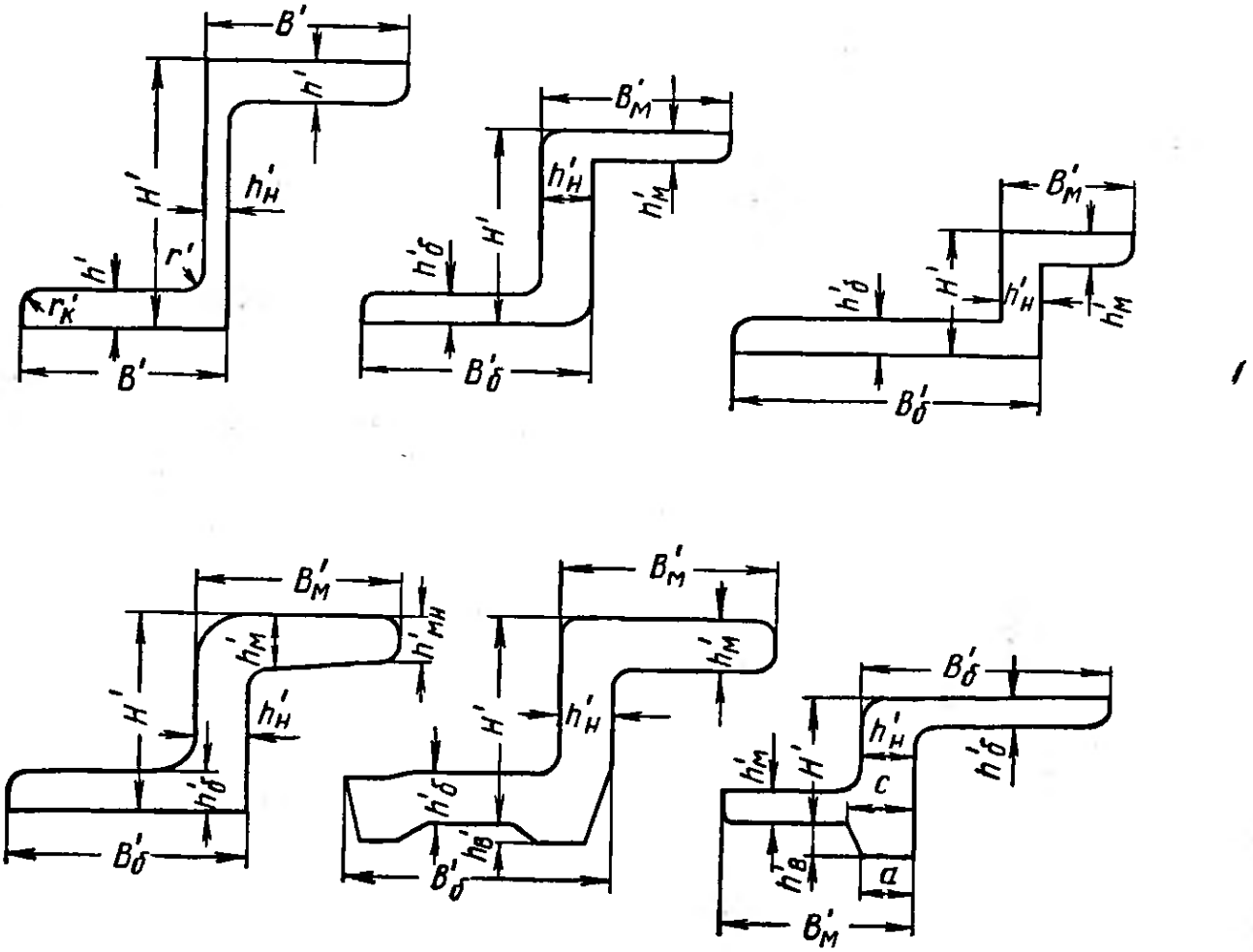



Рис. 192. Профили зетовой стали

Имеется ряд профилей, в которых сочетаются элементы полосы с уголком. В этом случае стремятся при разработке калибровки такого профиля использовать закономерности прокатки полосовой и угловой стали. К таким профилям можно отнести полособульбовый профиль, автообод и другие аналогичные профили.

Большую группу составляют тавровые профили (рис. 193), применяемые в строительстве, сельском хозяйстве, железнодорожном транспорте, для оконных переплетов промышленных зданий и т. д.

Тавровый профиль состоит из стенки (ножки) и двух полок (подошвы).

Прокатка и калибровка тавровых профилей имеет свои особенности, обусловленные формой стенки и полок. При разработке калибровки тавровых профилей в некоторой степени можно ис-

пользовать закономерности, присущие прокатке и калибровке балочных профилей. В последнее время широко применяют прокатку тавровых профилей в открытых калибрах.

Наконец, ряд профилей — шахтная стойка, шпунт корытного типа и др. имеют форму швеллера, поэтому закономерности прокатки швеллеров можно использовать при разработке калибровок этих профилей.

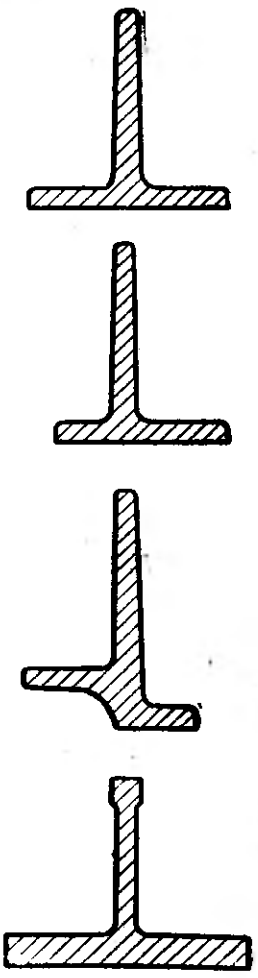


Рис. 193. Тавровые профили

2. Важное значение при калибровке сложных профилей имеет правильное деление профиля на элементы. Необходимо, чтобы такое деление отражало процесс деформации, а не носило условный, искусственный характер.

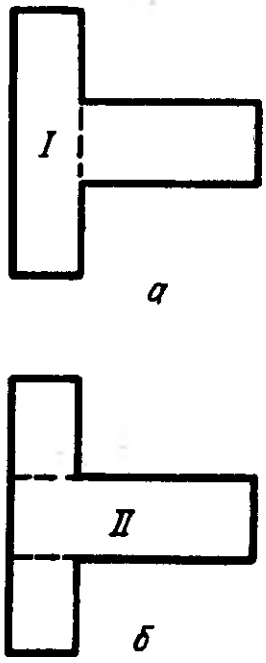



Рис. 194. Деление таврового профиля на элементы:

*а* — правильное; *б* — неправильное

В качестве примера на рис. 194 показано правильное и неправильное деление таврового профиля на элементы.

На рис. 194, *а* дано правильное деление таврового пластового калибра, когда полку *I* выделяют на всю высоту, что отражает условия деформации полки между двумя валками.

На рис. 194, *б* показано неправильное деление профиля, когда стенку *II* выделяют на всю ширину, и полка искусственно делится по высоте на три элемента, что не соответствует фактическим условиям деформации металла полки между двумя валками.

При делении профиля на элементы необходимо учитывать условия деформации в конкретном калибре.

3. При прокатке сложных профилей большое значение имеет соответствующая кантовка полосы, чтобы путем вынужденного уширения получить необходимые размеры отдельного элемента профиля.

Так, например, при прокатке железнодорожных рельсов применяют тавровые калибры, в которых за счет вынужденного уширения обеспечивается получение необходимой ширины подошвы.

На рис. 195 показано получение высокой ножки таврового профиля путем интенсивного обжатия ее в пластовом тавровом калибре.

Так как средняя вытяжка $\mu_{ср}$ для всего профиля меньше, чем коэффициент обжатия ножки $H_2/h_2$, то возникает интенсивное

вынужденное уширение в соответствии с равенством

$$\mu_{ср} = \frac{H_2 B_2}{h_2 b_2},$$

откуда

$$\frac{b_2}{B_2} = \frac{H_2}{h_2}\frac{1}{\mu_{ср}}.$$

Например, коэффициент вытяжки для всего профиля равен $\mu_{ср} = 1{,}4$, коэффициент обжатия для ножки $\frac{H_2}{h_2} = 2{,}0$, следовательно, коэффициент вынужденного уширения ножки составит

$$\frac{b_2}{B_2} = 2 \cdot \frac{1}{1{,}4} = 1{,}43.$$

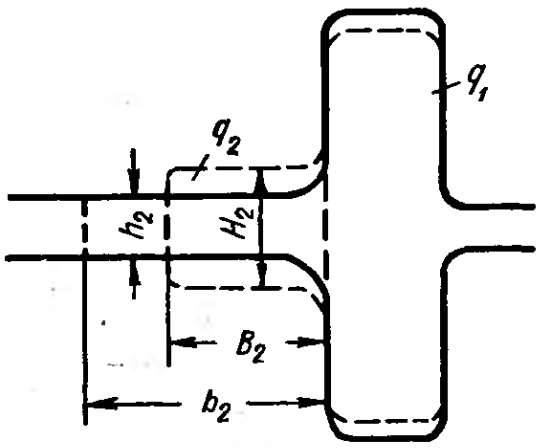


Рис. 195. Неравномерная деформация таврового профиля

Большое значение имеет правильное определение среднего коэффициента вытяжки при неравномерной деформации. Чтобы найти средний коэффициент вытяжки для всего сечения, подвергаемого неравномерному обжатию, определяем сначала условный коэффициент вытяжки $\mu_2$ для более деформируемого элемента, считая деформацию этого элемента независящей от деформации остальной части полосы:

$$\mu_2 = \frac{H_2 B_2}{h_2 b_2'},$$

где $H_2$ и $h_2$ — высота элемента до и после деформации;

$b_2' = B_2 + \Delta b_2$ — ширина элемента после прокатки с учетом уширения.

Зная условный коэффициент вытяжки $\mu_2$ для более деформируемой части, находим среднюю вытяжку для всего сечения по формуле [5]:

$$\ln \mu_{ср} \approx \ln \mu_2 \left(1 - \frac{Q_1}{Q_1 + Q_2}\right), \qquad (126)$$

где $Q_1$ — площадь сечения недеформируемого элемента до прохода;

$Q_2$ — площадь сечения деформируемого элемента до прохода;

$Q_1 + Q_2 = Q$ — площадь всего сечения профиля.

Определение средней вытяжки при неравномерной деформации является сложной задачей, которая решена только для отдельных случаев прокатки [5].

Рис. 196. Деление профиля штанцевой полосы на элементы

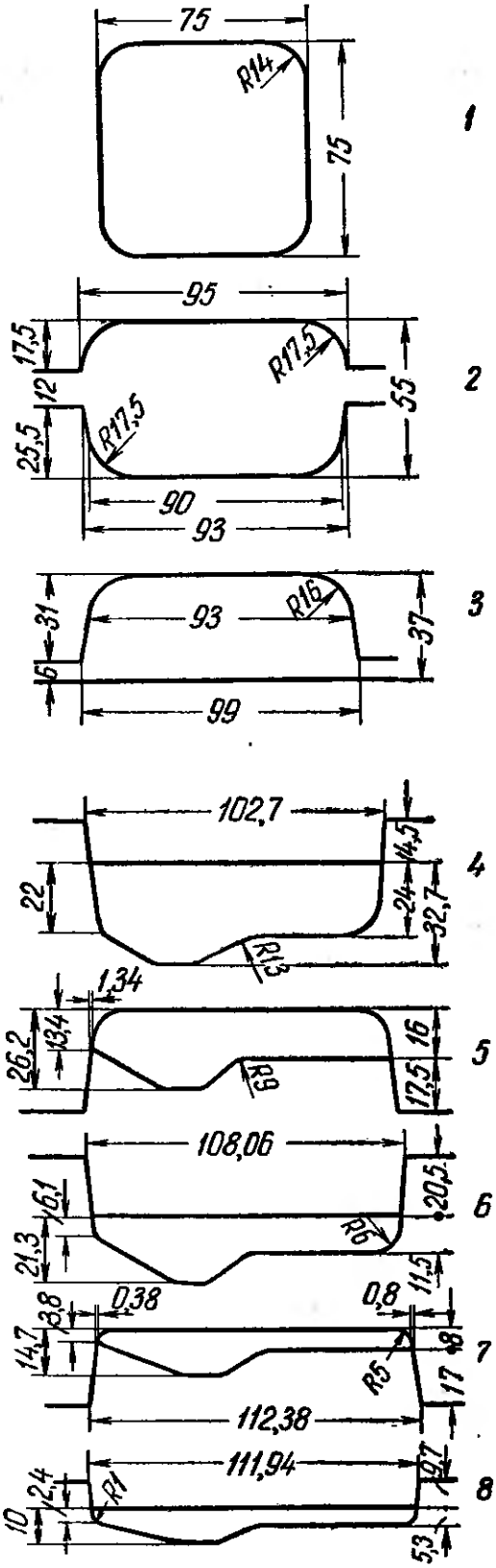



Рис. 197. Калибровка штанцевой полосы

4. Важное значение имеет правильный выбор коэффициента вытяжки по проходам и равномерность вытяжки по элементам профиля. Так как любой сложный профиль прокатывают из заготовки прямоугольного сечения, то наибольшую неравномерность деформации необходимо предусматривать в первых проходах, когда металл горячий, а элементы профиля более массивные. За первые два-три прохода необходимо обеспечить такую форму раската, чтобы в последующих калибрах, когда элементы менее массивные и более холодные, использовать только равномерную вытяжку по элементам.

Такой принцип применяют при калибровке балки, когда уже в первом разрезном калибре (а в случае необходимости — в двух первых калибрах) за счет неравномерной деформации получают такую форму профиля, чтобы в последующих калибрах вытяжки по стенке и фланцам были одинаковые.

## 2. ПРОКАТКА И КАЛИБРОВКА ШТАНЦЕВОЙ ПОЛОСЫ

Штанцевую полосу применяют в штамповочном производстве. Прокатка этого профиля освоена на Златоустовском металлургическом заводе [1]. В процессе рационализации калибровки добились более равномерной деформации по отдельным элементам сечения профиля (рис. 196).

Калибровка штанцевой полосы приведена на рис. 197. Прокатку ведут из квадратной заготовки 75×75 *мм*. Далее идут два прямоугольных калибра, из которых

[1] М. В. Шуралев, С. Г. Голега. Сталь, 1955, № 12, с. 1116.

второй полузакрытого типа, что обеспечивает более точные размеры профиля по ширине. В остальных пяти фасонных калибрах закрытого типа предусматривают ограниченное уширение. Коэффициенты вытяжки в последних калибрах, учитывая малую толщину полосы, принимают большие (в предчистовом и чистовом калибрах соответственно до 1,40 и 1,42). Чтобы обеспечить равномерную деформацию по всему сечению профиля, его разделили на три участка (рис. 196) с примерно одинаковыми степенями деформации, благодаря чему была достигнута достаточно высокая точность размеров и устранена необходимость исправления полосы после прокатки.

### 3. ПРОКАТКА И КАЛИБРОВКА ЛЕМЕШНОЙ ПОЛОСЫ

На стане 500 завода им. Дзержинского с 1949 г. прокатывали лемешную полосу с переменным сечением по длине и с местными утолщениями (магазинами). С 1954 г. на этом стане прокатывают более сложную лемешную полосу 149Д (рис. 198). Прокатку лемешной полосы ведут по следующей схеме. На обжимной клети стана 500 заготовку 180×180 *мм* прокатывают за семь проходов в прямоугольную заготовку 90×124 *мм*. Эта заготовка далее

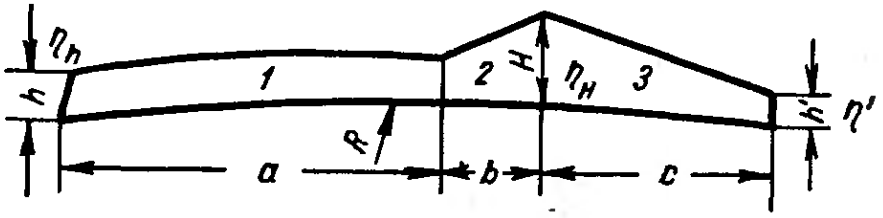



Рис. 198. Профиль лемешной стали:

*1* — прямоугольная часть; *2* — малая трапеция; *3* — большая трапеция

поступает во вторую клеть чистовой линии, в которой производят пять проходов, в третьей (чистовой) клети дают два прохода — предчистовой и чистовой [1].

За последнее время освоили прокатку нового профиля для составного лемеха, состоящего из спинки и лезвия. На рис. 199 показана сдвоенная полоса для спинки составного лемеха. Сдвоенную полосу для лезвия составного лемеха прокатывают [2] на стане 550 завода «Днепроспецсталь». Данные по расчету калибровки лемешной стали приведены также в работе [7].

В основу расчета положен принцип равномерного обжатия элементов профиля. Однако с целью получения вынужденного уширения в отдельном элементе приходится нарушать условие равномерности деформации. Поэтому коэффициенты высотной

---

[1] Х. Н. Назаренко. В сб. «Производство и применение экономичных профилей проката». Днепропетровск, 1961, с. 206.

[2] Б. Г. Фастовский, А. Н. Фундэ. Металлург, 1962, № 8, с. 19.

деформации $\eta_h$, $\eta_H$ и $\eta'$ принимают неодинаковые. Например, в чистовом калибре (см. рис. 197) $\eta_h = 1{,}15$; $\eta_H = 1{,}14$ и $\eta' = 1{,}9$.

Особенно большой коэффициент деформации принимают для режущей кромки $\eta' = 1{,}9$ с целью создания большого (вынужден-

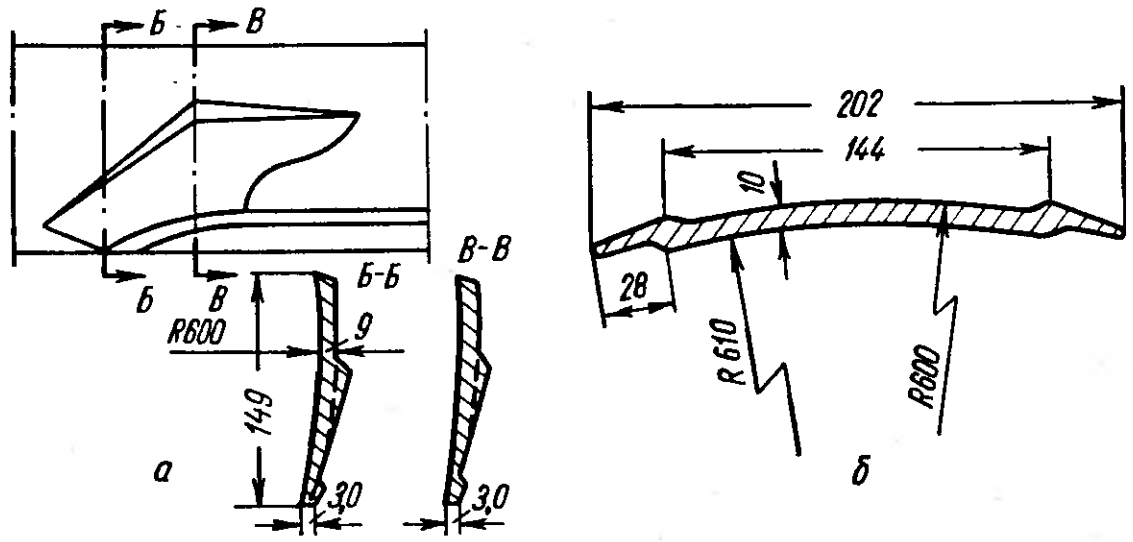



Рис. 199. Лемешная полоса:

*а* — разрезы полосы по магазину; *б* — сдвоенная лемешная полоса

ного) уширения. И в других калибрах коэффициент высотной деформации $\eta'$ режущей кромки должен быть выше, чем для остальных элементов калибра.

Общее число фасонных закрытых калибров для прокатки лемешной стали принимают в пределах 5—6.

## 4. ПРОКАТКА И КАЛИБРОВКА ПОДКЛАДКИ ДЛЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ РЕЛЬСОВ

Б. П. Бахтинов и М. М. Штернов [2] приводят пример калибровки подкладки для рельса Р43, прокатываемой на стане 500 (рис. 200). Этот профиль характеризуется несимметричностью, что обусловливает применение неравномерного обжатия по ширине полосы.

Из рис. 201 видно, что в первых четырех калибрах дают максимальное обжатие в средней части полосы и получают профиль, близкий по форме готовому профилю. Калибры *I* и *II* являются разрезными. В калибре *IV* получают по ширине почти симметричный профиль, причем против выступов профиля образуются небольшие противофланцы.

В следующих трех калибрах наблюдается более равномерное распределение обжатий по ширине полосы.

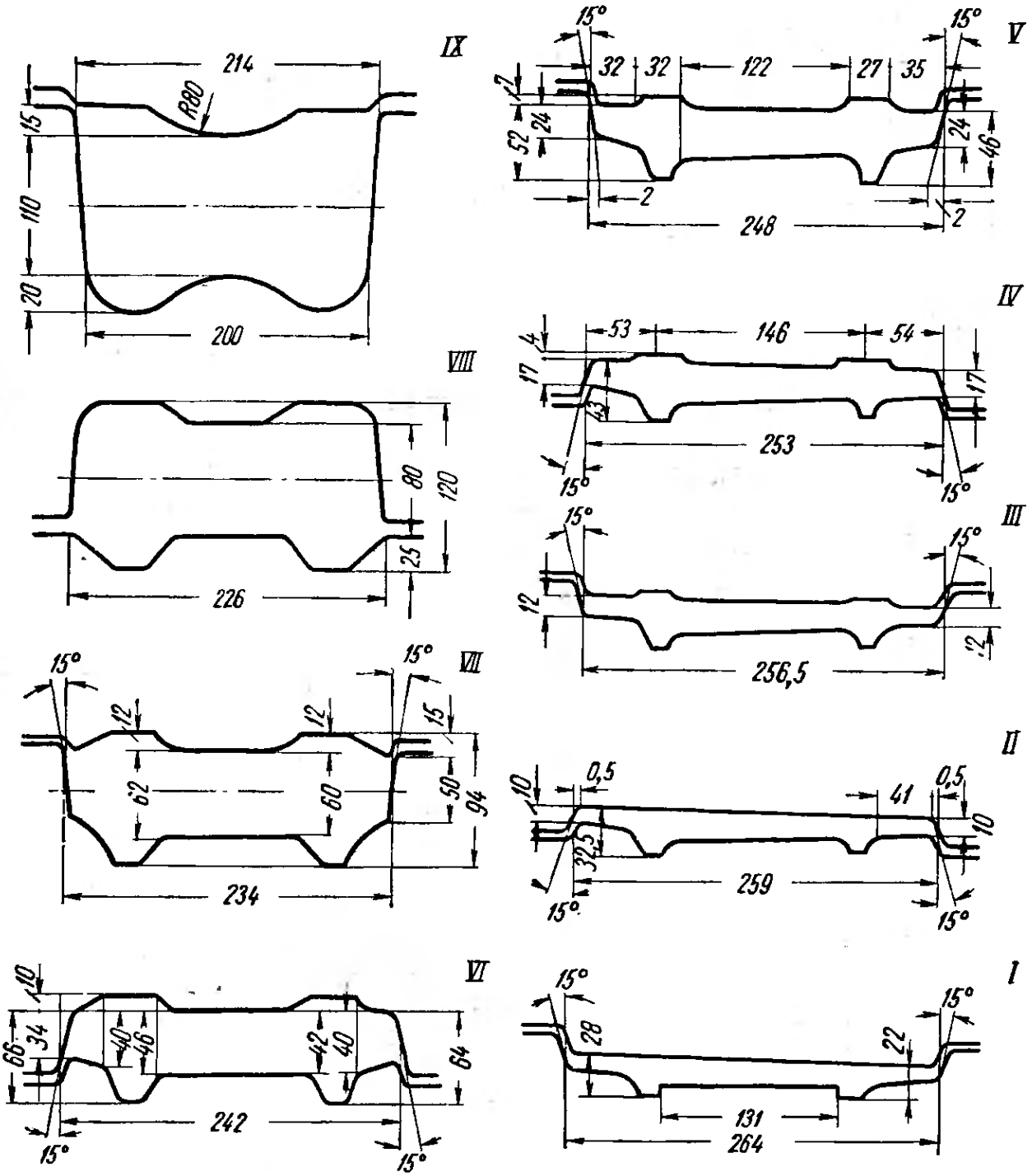



Рис. 200. Калибровка подкладки для железнодорожных рельсов Р43

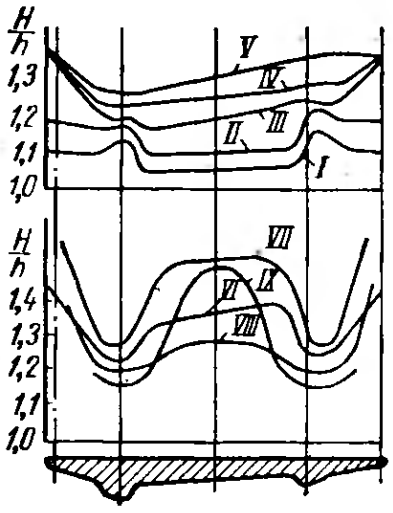



Рис. 201. Распределение высотных коэффициентов деформации при прокатке подкладки для железнодорожных рельсов Р43 по ширине калибров *I—IX*

· В последних двух калибрах (чистовом и предчистовом) для фланцев (выступов) принимают более значительное обжатие, что обеспечивает хорошее заполнение выступов; противофланец в предчистовом калибре полностью обжимается, чем также обеспечивается хорошее заполнение выступов.

Примеры калибровки и основы расчета рельсовых подкладок для рельса Р50 и рельсов метрополитена приведены в работе [7].

## 5. ПРОКАТКА И КАЛИБРОВКА НАКЛАДКИ ИЗОЛИРУЮЩИХ СТЫКОВ К ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫМ РЕЛЬСАМ

Накладка этого типа к железнодорожным рельсам имеет сложную конфигурацию и значительную несимметричность (рис. 202), что вызывает трудности при прокатке и калибровке по следующим причинам:

а) для подошвы рельса профиль имеет глубокую впадину, которую почти невозможно получить обыкновенной прокаткой;

б) выступ *а* прокатывается в закрытой части калибра и при прокатке получает утяжку;

в) профиль накладки имеет узкие допуски.

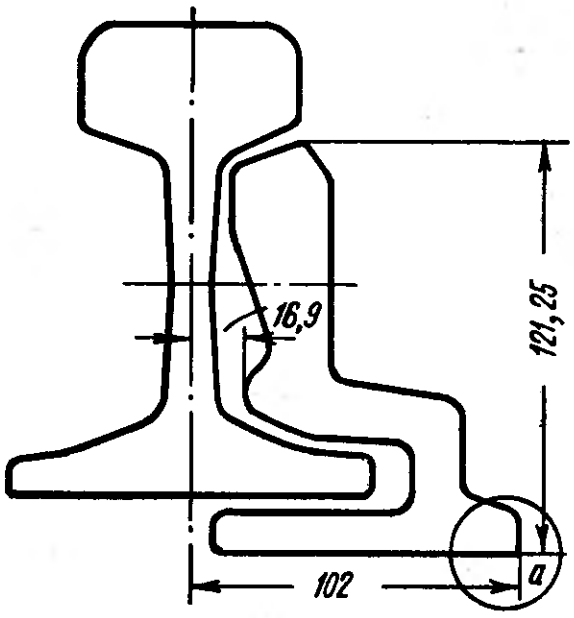


Рис. 202. Накладка изолирующих стыков рельсов метрополитена

Накладку прокатывают на стане 600 из заготовки 220×220 *мм* за 19 проходов, из которых 7 проходов делают в обжимной клети и по 6 проходов — в черновой и чистовой клетях [1]. Первые восемь проходов осуществляют в прямоугольных калибрах, остальные одиннадцать проходов делаются в фасонных калибрах (рис. 203). Ранее прокатка велась за 17 проходов с отогнутой на 20° полкой (рис. 203, калибр *XVII*). В цехе отделки полку отгибали до нормального положения, однако такая операция оказалась сложной, поэтому от нее отказались и перешли на прокатку за 19 проходов причем в 18-м проходе полку отгибают на 10° (рис. 203), а в чистовом калибре *XIX* получают окончательный профиль без обжатия в подгибочном калибре.

Из рис. 203 видно, что пять калибров в черновой клети служат для начального формирования профиля с неравномерной деформацией по сечению полосы.

В шести калибрах, расположенных в чистовой клети, стремятся к более равномерной деформации по отдельным элементам профиля.

---

[1] А. И. Соловьев. Металлург, 1956, № 8, с. 22.

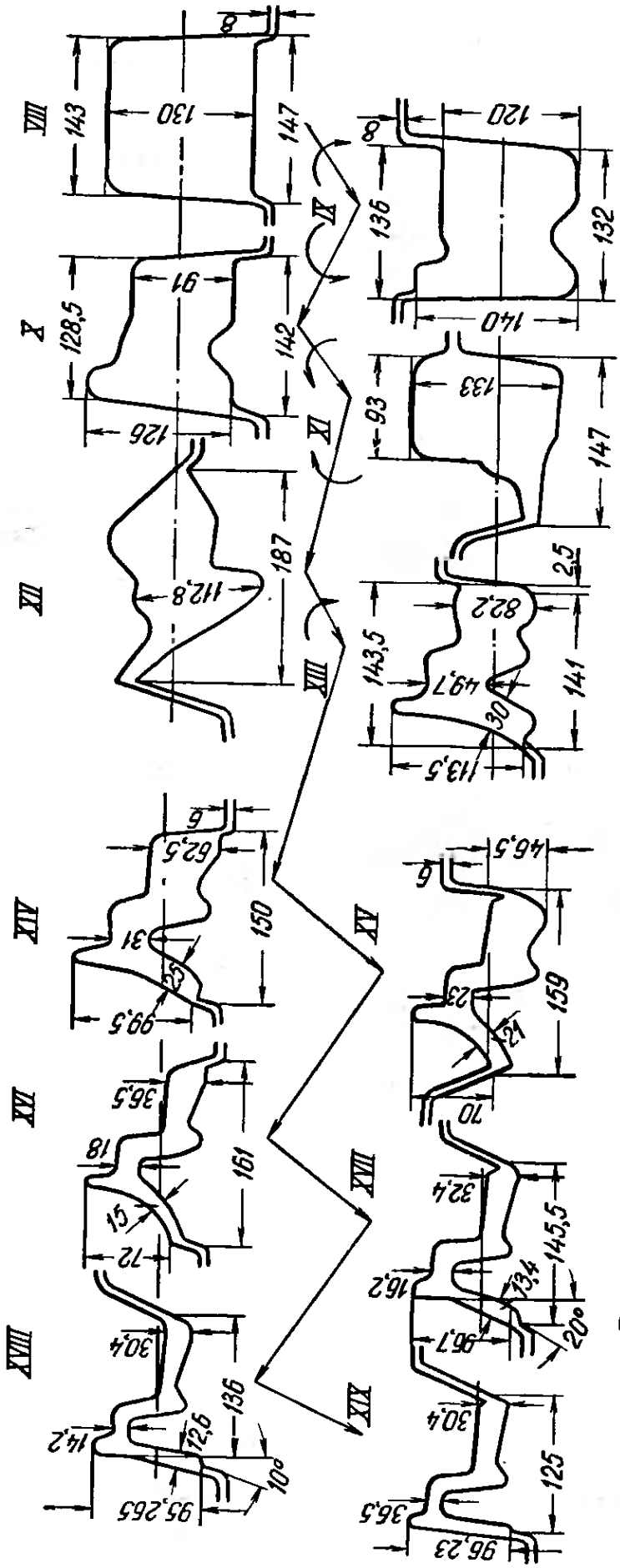



Рис. 203. Калибровка накладки изолирующих стыков рельсов метрополитена

В калибрах *XVII* и *XVIII* профиль прокатывают с отогнутой полкой, а в калибрах *XIII—XVI* она развернута. Для получения выступа *а*, показанного на рис. 202, в калибрах *XI* и *XII* его формируют в открытой части с интенсивным обжатием и вынужденным уширением. В остальных калибрах выступ *а* только осаживается в закрытой части ручья. Профиль прокатывают в стальных валках, так как в чугунных валках быстро выламываются гребни калибров.

## 6. ПРОКАТКА И КАЛИБРОВКА ЗЕТОВОЙ СТАЛИ (ГОСТ 5267—63)

Зетовую сталь (см. рис. 192, *а*) для вагонов прокатывают от № 4 до № 10. Номер показывает высоту профиля в *см*.

Методика расчета калибровки правильных зетовых профилей подробно изложена в книге Д. И. Старченко [11] и во многом

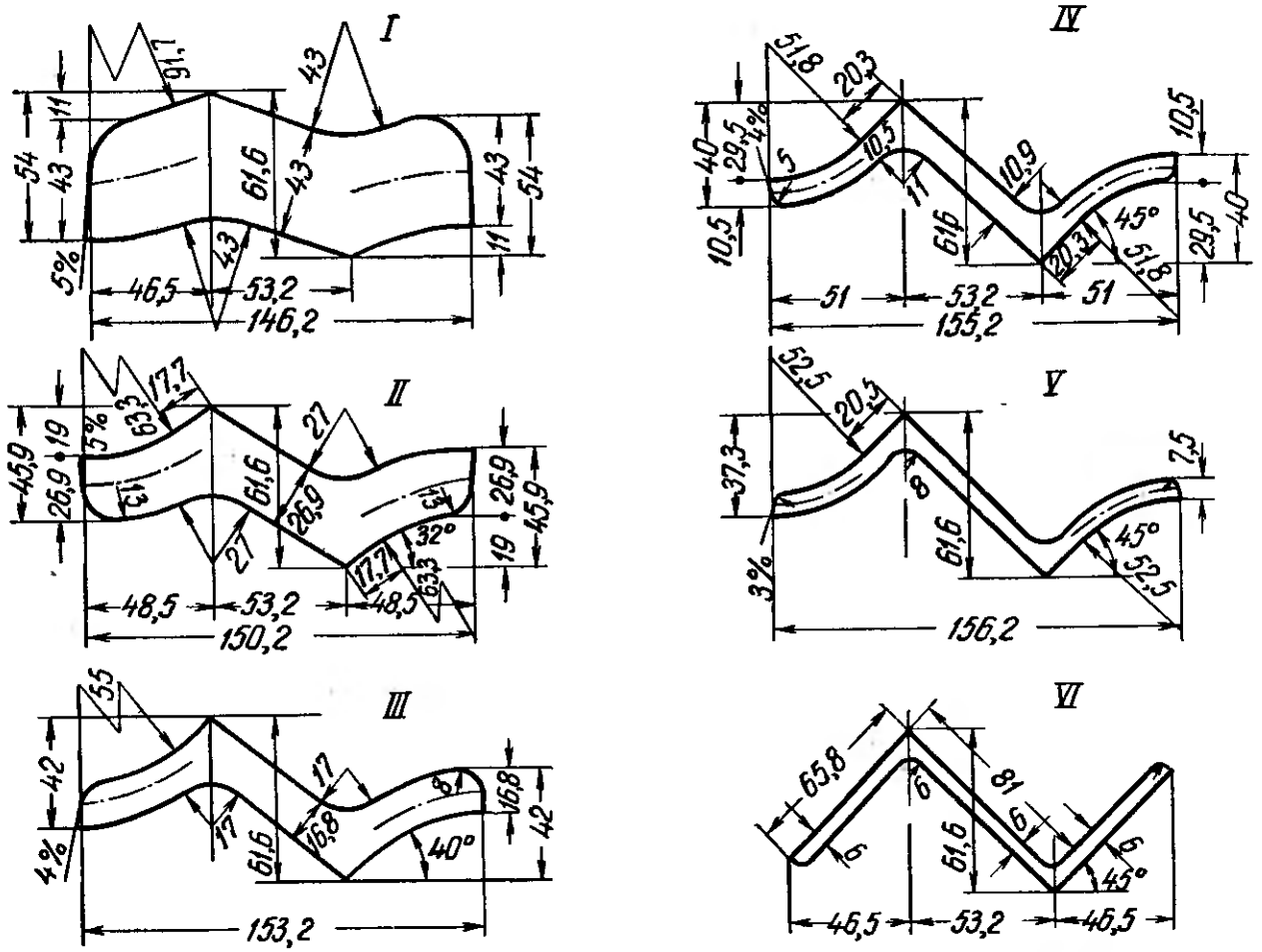



Рис. 204. Калибровка зетовой стали

сходна с методикой расчета калибровки углового профиля (рис. 204). При расчете калибровки выбирают обжатия по калибрам и определяют уширение. Калибры строят с изогнутыми полками, при построении принимают следующие положения:

а) сохраняется прямой участок полки в пределах $b' = (0{,}3 \div 0{,}5)\ b$;

б) часть полки $b—b'$ изгибается радиусом

$$R = \frac{b - b'}{0{,}01745\alpha};$$

в) во всех зетовых калибрах сохраняется постоянным положение линии ножки, определяемое углом $\delta_и$ (рис. 205) при постоянных размерах $c_x$ и $c_y$. Расчет калибровки зетовой стали приводится также в ряде работ [2, 7, 40]. [1]

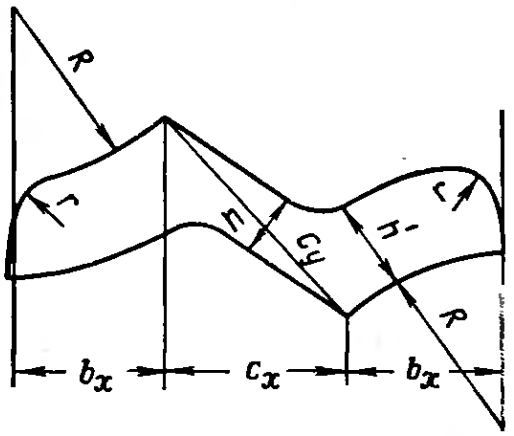



Рис. 205. Построение зетового калибра (по Д. И. Старченко)

## 7. ПРОКАТКА И КАЛИБРОВКА ОКОННО-РАМНЫХ ПРОФИЛЕЙ

Широкое применение нашли специальные профили, изготовленные горячей прокаткой и холодной формовкой, предназначенные для оконных и фонарных переплетов промышленных зданий (ГОСТ 7511—58). Эти профили имеют различную форму: уголка, тавра, корыта (рис. 206).

На рис. 207 приведена калибровка оконно-рамного профиля № 2, прокатываемого на линейном стане 250 [45].

Для прокатки этого профиля применяют схему прокатки, состоящую из трех реберных и трех пластовых калибров. Высоту исходной прямоугольной заготовки принимают равной 32—33 *мм*.

В трех пластовых калибрах посередине стенки общий коэффициент обжатия составляет

$$k = \frac{33}{4{,}2} = 7{,}85,$$

где 4,2 *мм* — средняя толщина пластового калибра *III*.

По проходам коэффициенты обжатия стенки по толщине распределяются следующим образом по ходу прокатки:

$$k_1 = 2{,}75; \quad k_2 = 1{,}95; \quad k_5 = 1{,}7.$$

Коэффициенты обжатия полок по толщине на основании практических данных принимают равными

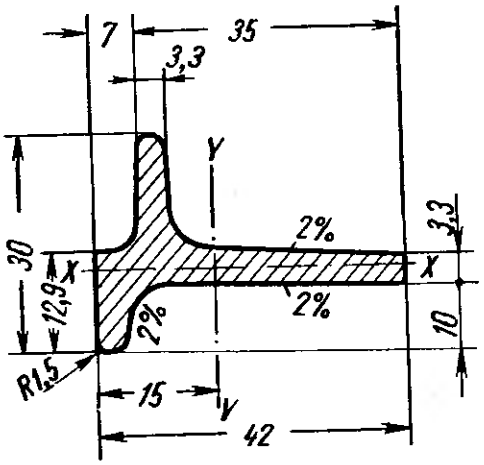
$$k_3 = 1{,}98; \quad k_4 = 1{,}38; \quad k_6 = 1{,}21.$$

---

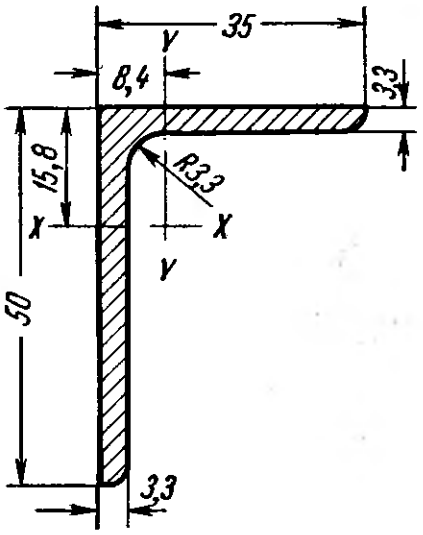
[1] См. также И. И. Кучко. Сталь, 1953, № 4, с. 335;
Б. В. Мерекин. Сталь, 1953, № 4, с. 341;
С. В. Макаев, Ю. В. Мерекин. Сталь, 1959, № 12, с. 1099.

Пользуясь коэффициентами обжатий, находим средние значения толщины стенок и полок.

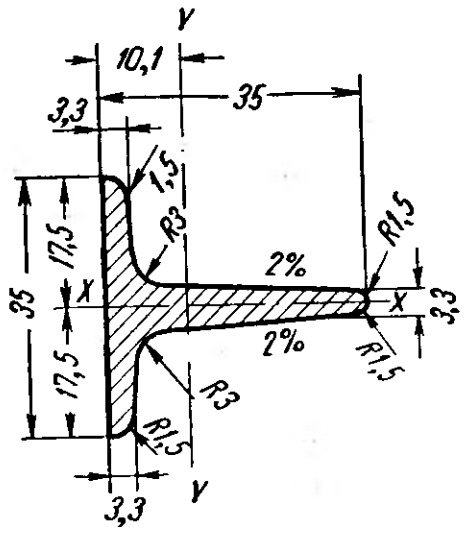
При прокатке в ребровых калибрах имеет место утяжка стенки, которая изменяется в пределах 6,5—2,5 *мм*.



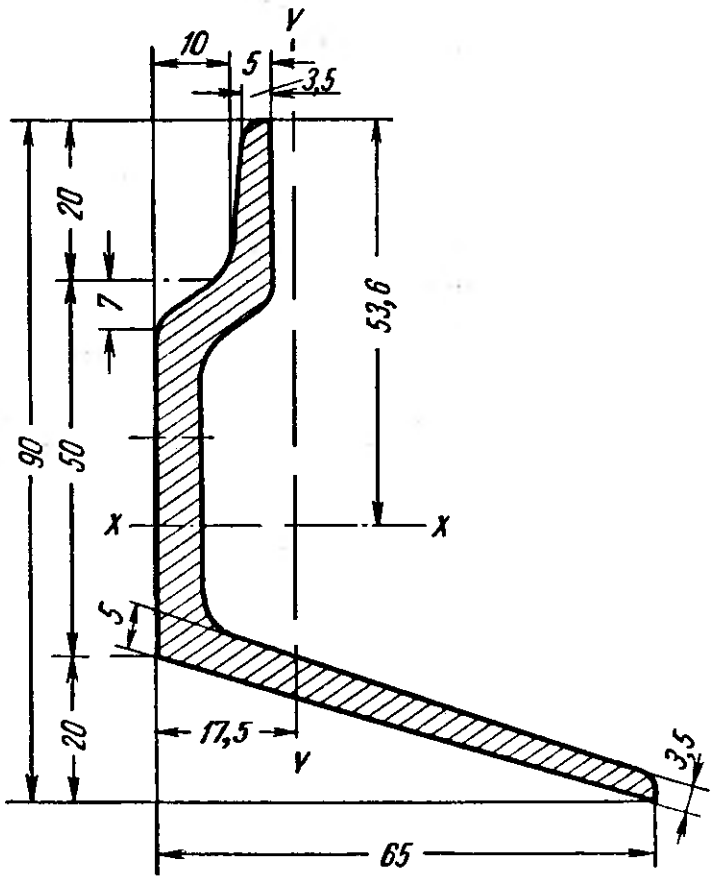

*а*




*б*




*в*




*г*

Рис. 206. Форма и размеры профилей для оконно-рамных переплетов:

*а* — № 2; *б* — № 5; *в* — № 6; *г* — № 7

Уширение по калибрам принимают по практическим данным.

В табл. 90 приведены данные калибровки для последних пяти калибров. Размеры исходной заготовки 33×39 *мм*.

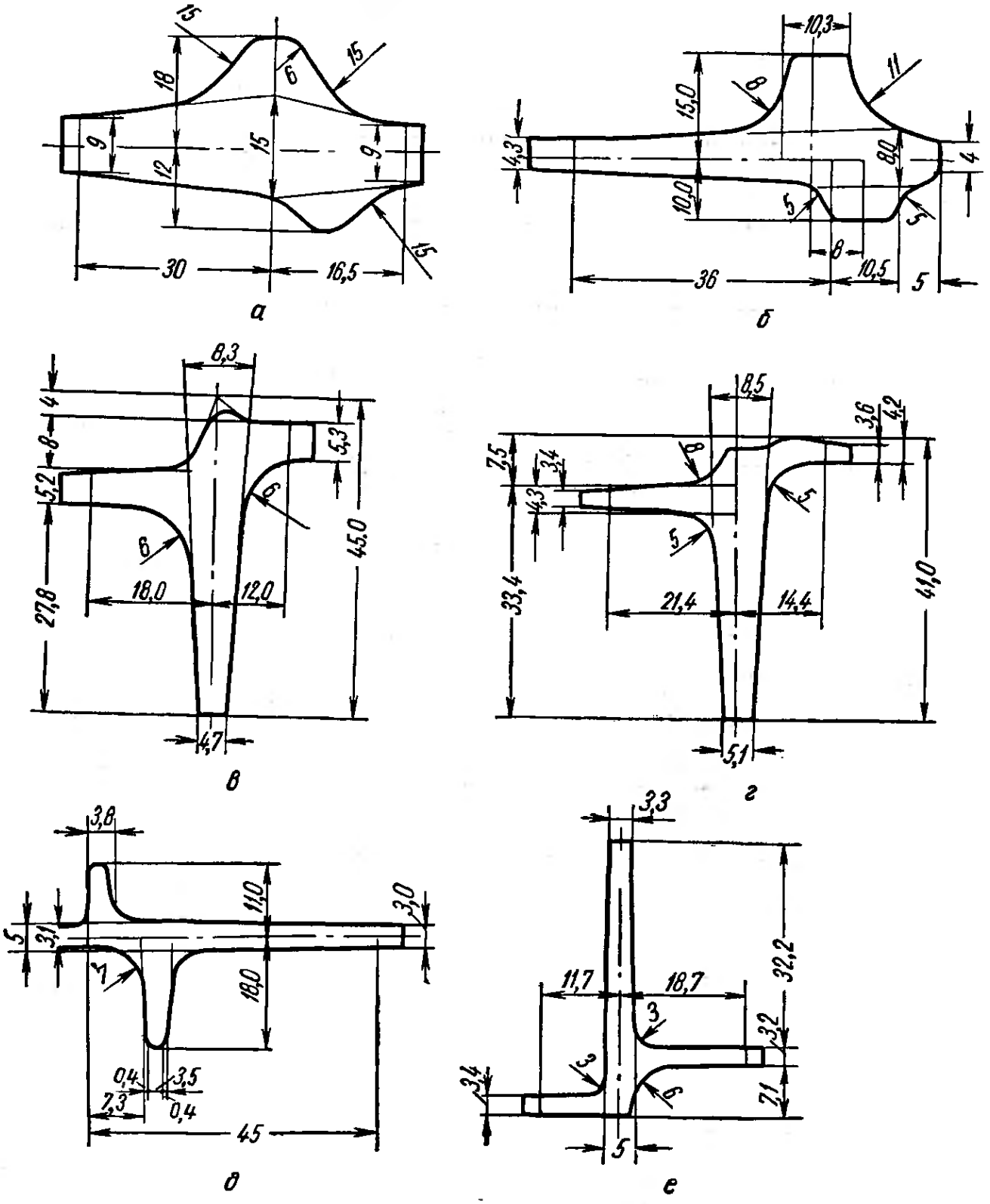



Рис. 207. Калибровка тонкостенного оконно-рамного профиля № 2:

*а* — клеть 2 (черновая лиииия); *б* — клеть 1 (чистовая линия); *в* — клеть 2; *г* — клеть 3; *д* — клеть 4; *е* — клеть 5

Таблица 90

## Расчетные данные калибровки тавровой стали № 2 со смещенными полками [45]

| Номер прохода | Площадь калибра | Общий коэффициент вытяжки | Стенка | | | | | | Коэффициент обжатия полок | Короткая полка | | | | | Длинная полка | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | $k$ | $H$, мм | $d$, мм | $c$, мм | $F$, мм² | $\mu$ | | $b$, мм | $a'$, мм | $a$, мм | $F$, мм² | $\mu$ | $b'$, мм | $h'$, мм | $h$, мм | $F$, мм² | $\mu$ |
| 2 | 521 | — | 1,95 | 51,5 | 8,0 | 4,3 | 316 | — | — | 6,9 | 10,5 | 10,5 | 72 | — | 19,2 | 10,3 | 10,3 | 133 | — |
| 3 | 415 | 1,23 | — | 45 | 8,3 | 4,7 | 292 | 1,08 | 1,98 | 8,75 | 5,3 | 5,3 | 46 | 1,57 | 14,75 | 5,2 | 5,2 | 77 | 1,73 |
| 4 | 380 | 1,09 | — | 41 | 8,5 | 5,1 | 279 | 1,05 | 1,38 | 11,0 | 4,2 | 3,6 | 42 | 1,1 | 18,0 | 4,3 | 3,4 | 69 | 1,12 |
| 5 | 277 | 1,37 | 1,7 | 45,0 | 5,0 | 3,0 | 180 | 1,55 | — | 9 | 4,3 | 3,8 | 36 | 1,17 | 16,0 | 4,3 | 3,5 | 61 | 1,13 |
| 6 | 262 | 1,06 | — | 42,5 | 5,0 | 3,3 | 170 | 1,02 | 1,21 | 9,7 | 3,4 | 3,2 | 32 | 1,12 | 16,55 | 3,2 | 3,2 | 53 | 1,15 |

Обозначения:

$H$ — общая высота стенки;
$d$ — толщина стенки у основания;
$c$ — толщина стенки на конце;
$F$ — площадь элемента;
$b$ — ширина короткой полки;
$a'$ — толщина короткой полки у основания;
$a$ — толщина короткой полки на конце;
$b'$ — ширина длинной полки;
$h'$ — толщина длинной полки у основания;
$h$ — толщина длинной полки на конце.

## 8. ПРОКАТКА И КАЛИБРОВКА АВТООБОДА

Для изготовления колес автомобилей требуется большое количество профилей сложной конфигурации.

Разнообразные профили автомобильного обода прокатывают на заводе им. Петровского на среднесортном стане 550 линейного типа, состоящем из четырех рабочих клетей. Виды профилей

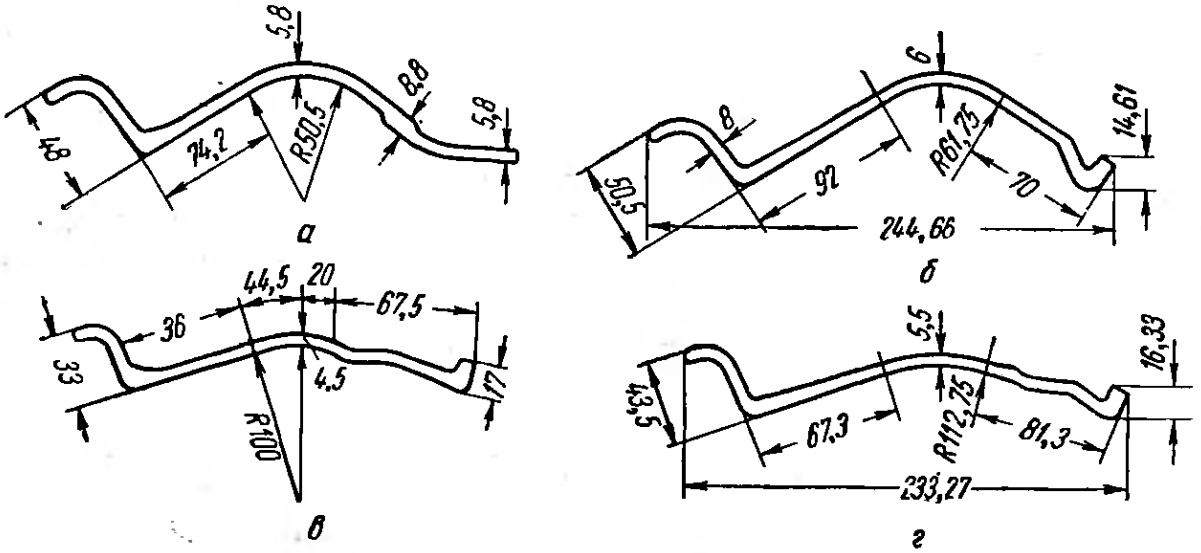



Рис. 208. Профили автомобильного обода:
*а* — ЗИЛ-131; *б* — ЗИЛ-158; *в* — ГАЗ-53; *г* — ЗИЛ-164

автомобильного обода приведены на рис. 208, из которого видно, что они представляют собой полосу, имеющую с одной стороны крючок, а с другой — хвостовик или буртик. Монтаж обода колеса грузового автомобиля показан на рис. 209. Обод колеса состоит из собственно профиля автомобильного обода *1*, двух бортовых

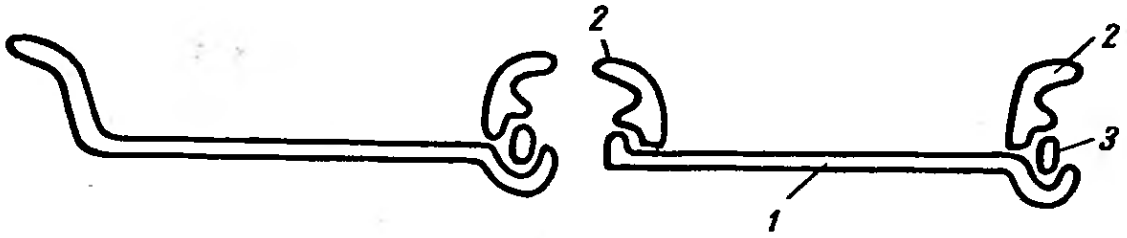



Рис. 209. Монтаж обода колеса автомобиля

колец *2* и затворного кольца *3*. Применяют также автомобильные ободы с одним бортовым кольцом, причем сам профиль автомобильного обода в этом случае удлинен так, что он со вторым бортовым кольцом представляет одно целое (рис. 209). Следует также отметить, что прокатанная полоса обода для некоторых грузовых автомобилей выходит из чистового калибра в изогнутом виде (см. рис. 208) и при холодной правке на роликоправильной машине средняя часть ее (полотно) выравнивается.

Во время Великой Отечественной войны на Магнитогорском металлургическом комбинате впервые была освоена прокатка

автомобильного обода 170×5 *мм* на непрерывном штрипсовом стане 300 [2] по калибровке, приведенной на рис. 210.

Как видно из рис. 210, прокатка и калибровка автомобильного обода по своему характеру приближается к прокатке полосовых профилей с обжатием в одном направлении. Однако крючок на одном конце сечения и буртик на другом в значительной мере усложняют процесс прокатки и настройки стана.

Ниже рассмотрены некоторые особенности калибровки автомобильного обода [2]. Горячие размеры чистового профиля принимают такие же, как и холодные размеры, т. е. прокатку ведут с минусовыми допусками. Конфигурация профиля позволяет делать разъем в чистовом калибре только сверху. Коэффициенты вытяжки во всех элементах калибра принимают одинаковые, причем по шейке (полотну) коэффициент уменьшения высоты равен

$$\mu_1 = \eta_1 = \frac{d_2}{d_1} = \frac{6{,}5}{5{,}0} = 1{,}3,$$

где $d_1$ и $d_2$ — толщина шейки в чистовом и предчистовом калибрах.

Так как крючок обжимается одновременно по толщине и высоте, то коэффициент обжатия крючка по высоте принимают меньше

$$\eta_{кр1} = \frac{16{,}75}{14{,}25} = 1{,}17.$$

По дну крючка для лучшего заполнения коэффициент обжатия принимают большим

$$\eta_{кр2} = \frac{8{,}5}{5{,}25} = 1{,}62.$$

Так как буртик сбоку не обжимается, то коэффициент обжатия высоты буртика должен быть равен приблизительно коэффициенту вытяжки, т. е. в данном случае

$$\eta_{бурт} = \frac{18}{14{,}25} = 1{,}27.$$

В предчистовом калибре коэффициент уменьшения толщины

$$\eta_2 = \frac{d_3}{d_2} = \frac{8{,}5}{6{,}5} = 1{,}31 = \mu_2.$$

Так как конец крючка по толщине не обжимается, то необходимо высоту крючка увеличить в соответствии с коэффициентом вытяжки

$$h_3 = \mu_2 h_2 = 1{,}31\ (8{,}5 + 8{,}25) = 22.$$

Высота крючка в калибре *III*, равная 28 *мм*, относится к шаблону, так как калибр в этом месте по высоте не заполняется.

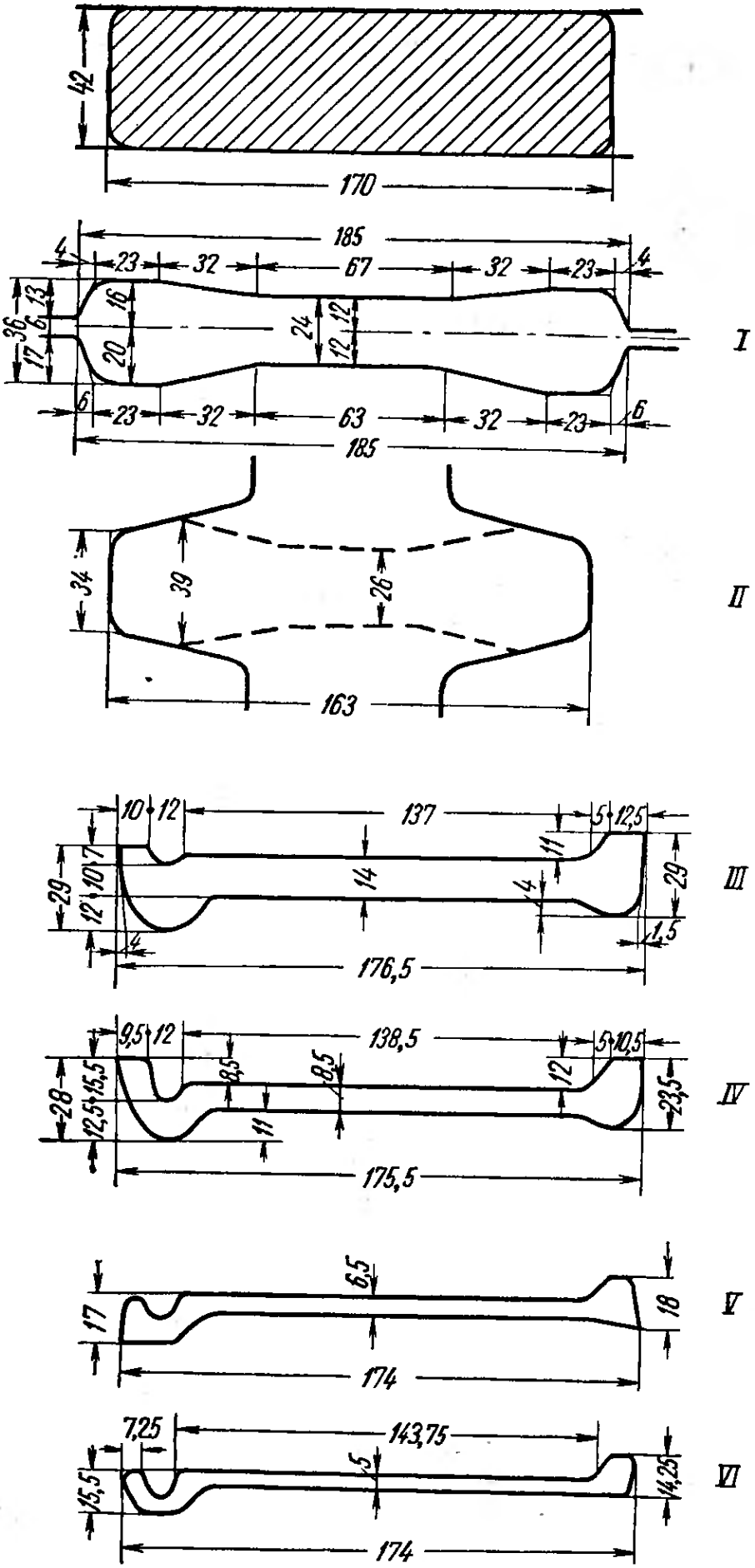



Рис. 210. Калибровка для прокатки автомобильного обода 175×5 *мм* на непрерывном штрипсовом стане 300

Высота буртика

$$h_3 = \mu_2 h_2 = 1{,}31 \cdot 18 = 23{,}5 \text{ мм}.$$

Следует обратить внимание на небольшие ложные фланцы в калибрах *III*, *IV* и *V* с противоположной стороны буртика.

В калибре *IV* коэффициент уменьшения толщины для шейки

$$\eta_3 = \frac{d_4}{d_3} = \frac{14}{8{,}5} = 1{,}65 = \mu_3.$$

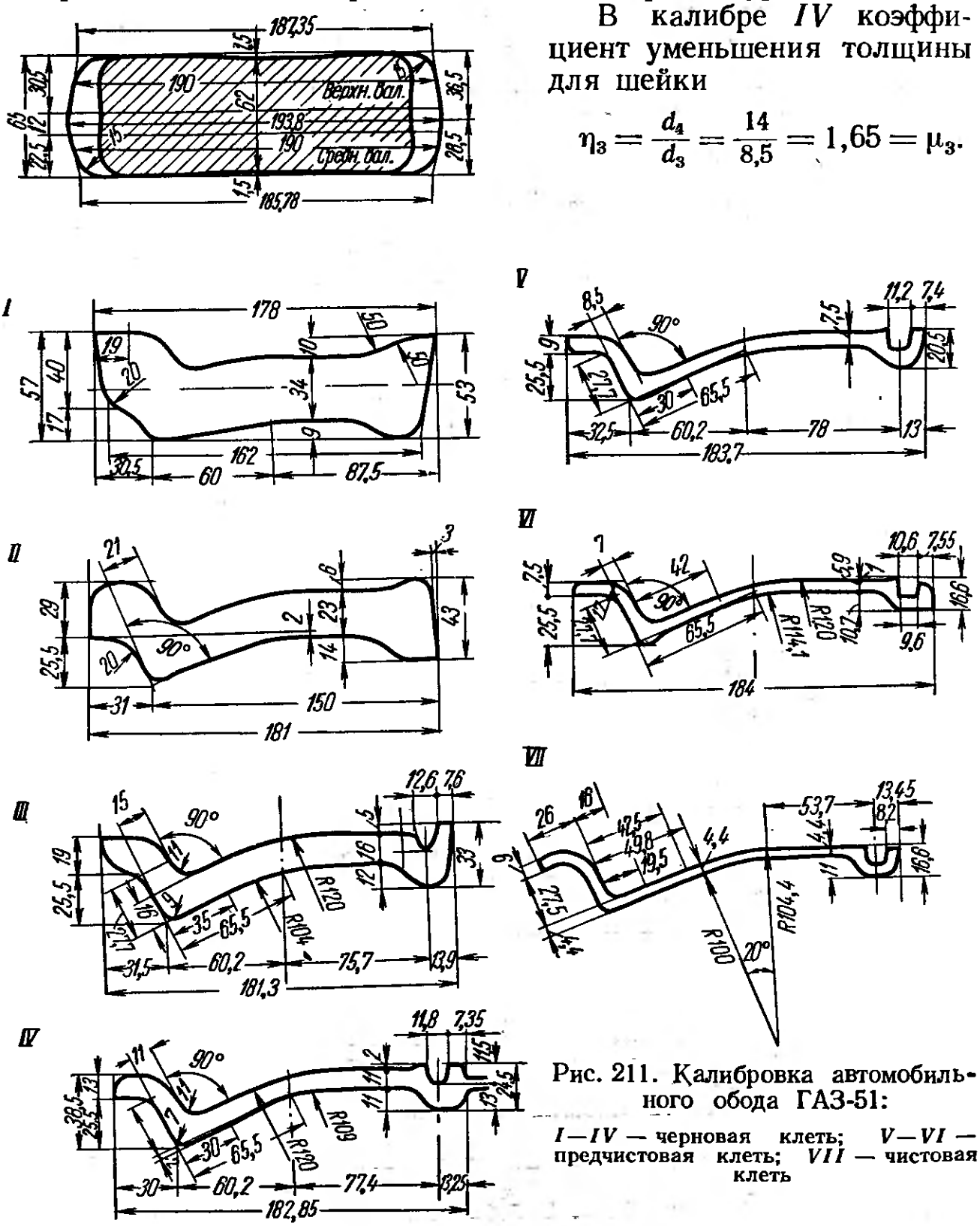



Рис. 211. Калибровка автомобильного обода ГАЗ-51:

*I—IV* — черновая клеть; *V—VI* — предчистовая клеть; *VII* — чистовая клеть

Этот коэффициент принимают за основу расчета размеров крючка и буртика.

Как видно из рис. 206, во втором проходе (по ходу прокатки) полоса обжимается в вертикальных валках до ширины $B = 163$ *мм*.

Из исходной прямоугольной заготовки 170×42 *мм* в калибре *I* полосу получают с утолщениями по краям высотой $h = 36$ *мм*, чтобы иметь достаточное количество металла для выполнения буртика и крючка.

На линейном стане 550 успешно прокатывают несколько профилей автомобильного обода, причем за последнее время здесь провели рационализацию калибровок. В частности, по старой калибровке обод № 202 прокатывали в девяти фасонных калибрах, а по новой — в семи, что позволило поднять производительность стана и улучшить качество профиля.

Если по старой калибровке средний коэффициент вытяжки в девяти фасонных калибрах был $\mu_{ср} = 1{,}28$, то по новой он значительно увеличился и равен $\mu_{ср} = 1{,}56$.

Сократили число проходов также при прокатке других типов профилей для автомобильного обода. На рис. 211 приведена калибровка автомобильного обода ГАЗ-51, прокатываемого на этом стане.

## 9. ПРОКАТКА И КАЛИБРОВКА БОРТОВОГО КОЛЬЦА

Бортовое кольцо колеса грузового автомобиля (рис. 212) прокатывают, как правило, на мелкосортных станах линейного типа. На линейном мелкосортном стане 325 прокатывают бортовое кольцо облегченного типа [1].

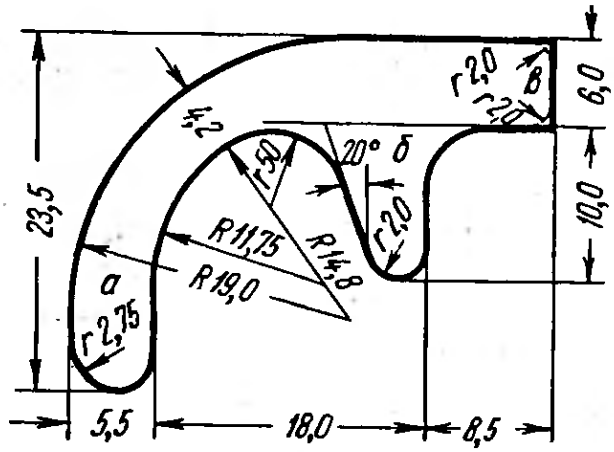



Рис. 212. Бортовое кольцо грузового автомобиля

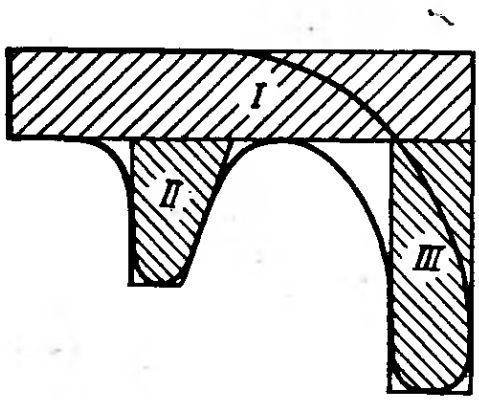



Рис. 213. Деление профиля бортового кольца на элементы

При расчете калибров профиль разбили на элементы, как показано на рис. 213. Для элементов *I* и *III* приняли одинаковый коэффициент вытяжки, а для элемента *II* — на 0,04—0,07 больший.

На рис. 214 приведена калибровка облегченного профиля бортового кольца, который прокатывают в шести фасонных калибрах из квадратной заготовки сечением 75×75 *мм*.

---

[1] С. Г. Терентьев. Металлург, 1957, № 8, с. 28.

Коэффициенты вытяжки по проходам приняли следующие:

| Номер прохода | Коэффицнент вытяжкн |
|---|---|
| 7 | 1,23 |
| 8 | 1,22 |
| 9 | 1,30 |
| 10 | 1,30 |
| 11 | 1,235 |
| 12 | 1,215 |

Как видно из представленной калибровки, второй фасонный калибр (восьмой проход) является разрезным, в котором начинает формироваться ножка профиля *а* и сосок *б* (рис. 214). В этом

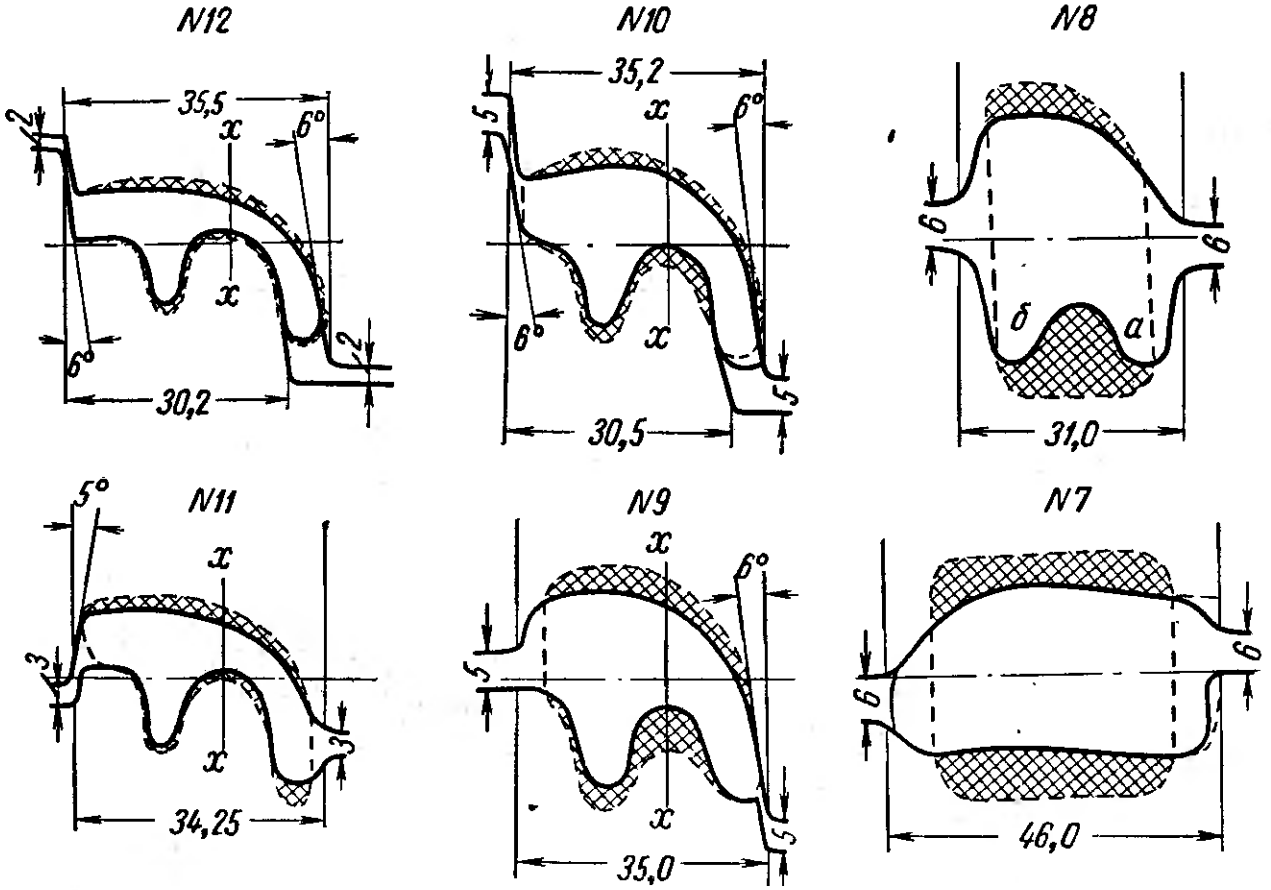



Рис. 214. Калибровка бортового кольца (№ 7—12 — номера проходов)

калибре создается наибольшая неравномерная деформация, за счет чего в последующих калибрах обеспечивается более равномерная деформация по элементам профиля. Чтобы обеспечить прокатку без скручивания полосы, профиль разбили вертикальной осью *ХХ* на две части так (рис. 214), чтобы в обеих частях были одинаковые коэффициенты вытяжки. Для этого планиметрированием определяют площади сечения правой и левой (относительно оси *ХХ*) частей профиля калибра и задаваемой полосы. Вертикальную ось *ХХ* проводят в месте условного соединения ножки с остальными частями профиля. Следует обратить внимание на места разъема валков в калибрах, причем в первом (полосовом)

калибре (седьмой проход) вместо открытого разъема сделали закрытую часть калибра (показано пунктиром), чем устранили переполнение его металлом.

Применение больших коэффициентов вытяжки для соска обеспечило хорошее его заполнение. Облегченный профиль бортового кольца таких же размеров, как описанный выше, прокатывают

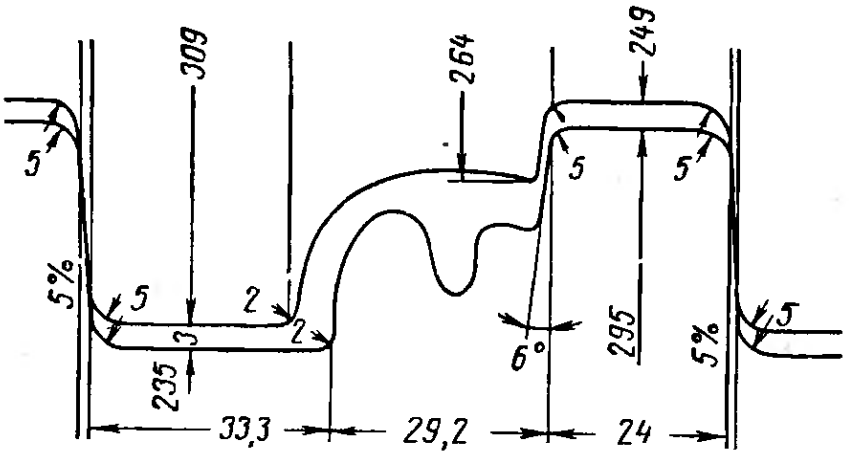



Рис. 215. Расположение чистового калибра профиля бортового кольца в валках

также на линейном стане 250 [1]. При освоении этого профиля был выявлен ряд недостатков, которые были впоследствии устранены. Была усовершенствована вводная арматура и проводился строгий контроль за ее работой, было обращено внимание на тщательную обработку опорных конусов валков, применено более совершенное расположение чистового калибра (рис. 215).

## 10. ПРОКАТКА И КАЛИБРОВКА ТАВРОВЫХ ПРОФИЛЕЙ

Тавровые профили применяют в строительстве для оконных переплетов, в сельском хозяйстве и транспортном машиностроении. Некоторые виды тавровой стали приведены на рис. 193.

Тавровый профиль (рис. 216, *а*) состоит из вертикальной стенки (ножки) и полки (подошвы). Деление таврового профиля на элементы в случае прокатки в ребровых калибрах показано на рис. 216, *б*.

Тавровую сталь прокатывают в закрытых (рис. 217) и открытых (рис. 218) калибрах [45]. При прокатке в закрытых калибрах заготовка сперва обжимается в «диагональных» или трапецеидальных калибрах для получения за счет неравномерной деформации глубокого таврового очертания. Затем прокатку ведут в пластовых и ребровых калибрах для обжатия стенки и полки таврового профиля, что требует кантовки полосы, причем по схеме (рис. 217,*а*) с применением одного ребрового калибра прокатку ведут с двумя

[1] Б. М. Илюкович. Металлург, 1958, № 5, с. 25.

кантовками, а при прокатке по схеме (рис. 217, *б*) с двумя ребровыми калибрами требуются четыре кантовки. Разъемы калибров делают как и в балочных калибрах, чтобы для полки предусмотреть чередование закрытых и открытых фланцев.

Прокатка тавровых профилей в закрытых калибрах имеет ряд недостатков: износ опорных конусов валков приводит к неравномерному обжатию полок, возникает опасность заклинивания металла в калибре, быстро изнашивается и выходит из строя валковая арматура, часто образуются закаты в месте соединения

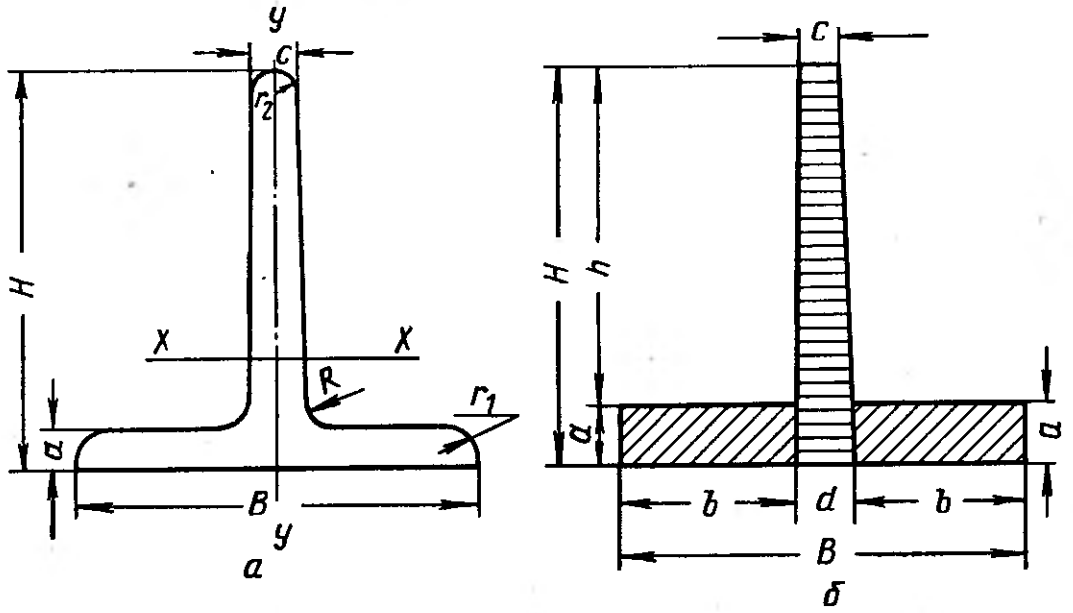



Рис. 216. Тавровый профиль:

*а* — общий вид; *б* — деление профиля на элементы

полки и стенки, а наличие опорных конусов требует больше места для размещения калибров на валках и т. д.

Однако система закрытых калибров обеспечивает более точные размеры, поэтому ее часто применяют при прокатке тавровых профилей более крупных сечений.

Методика расчета калибровки при прокатке таврового профиля в закрытых калибрах рассмотрена в работе [2].

За последнее время широкое применение получила прокатка тавровых профилей в открытых калибрах (см. рис. 218), которая имеет следующие преимущества [45]:

1) вследствие меньшей глубины вреза и простой формы калибров можно применять более значительные деформации;

2) в ребровых калибрах с вертикальным расположением стенки отсутствуют осевые усилия на валки;

3) сокращается расход энергии, так как уменьшается трение металла о боковые стенки калибра;

4) уменьшается расход прокатных валков вследствие более рационального размещения калибров без больших буртов с конусами;

5) одни и те же калибры можно использовать для прокатки ряда профилей смежных размеров.

Однако прокатка в открытых калибрах со свободным уширением по сравнению с прокаткой с ограниченным уширением в закрытых калибрах имеет следующие недостатки:

1) в открытых черновых калибрах возможно свертывание полос;

2) в ряде случаев нельзя получить профиль точных размеров;

3) на боковых гранях полосы при недоброкачественном металле возможны случаи образования трещин;

4) возможны случаи оковывания валков за счет защемления стенки;

5) при прокатке необходимо периодически кантовать полосу.

Указанные недостатки при современном уровне производства удается устранить, поэтому калибры со свободным уширением с успехом применяют на отечественных заводах (Гурьевском, «Серп и молот» и др.).

На рис. 219 приведены типовые схемы прокатки тавровой стали в открытых калибрах со свободным уширением [45].

Схема *I* предназначена для прокатки тавровой стали небольших размеров со стеной и полками толщиной в пределах 5—7 *мм*. Прокатку ведут за четыре прохода, причем первые два прохода осуществляют в ребровых калибрах. Схемы *II* и *III* применяют для прокатки тонкостенных тавровых профилей соответственно за шесть и семь проходов. По этим схемам прокатывают профили средних размеров со стенкой высотой 30—60 *мм* при ширине полок до 65 *мм*.

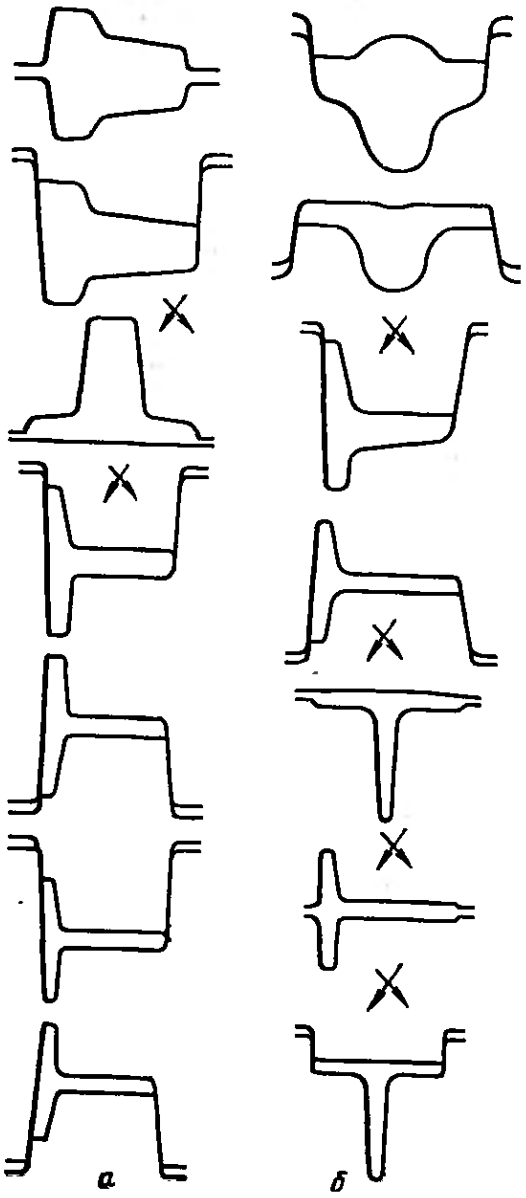



Рис. 217. Схема прокатки таврового профиля в закрытых калибрах:

*а* — с одним ребровым калибром;
*б* — с двумя ребровымн калибрамн

Схему *IV* применяют для прокатки тавровой стали более крупных размеров.

Схема *V* служит для прокатки тавровых профилей средних размеров на линейных станах, когда число проходов доходит до девяти.

В последнее время для изготовления сварных широкополочных балок применяют тавровые профили с низкой стенкой. В этом

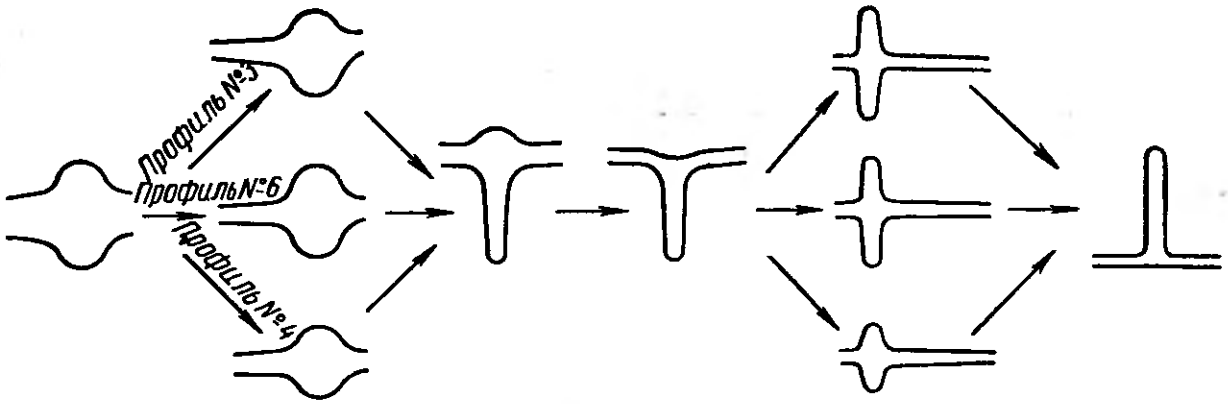



Рис. 218. Схема прокатки тавровых профилей в открытых калибрах (исходное сечение — квадрат или прямоугольник)

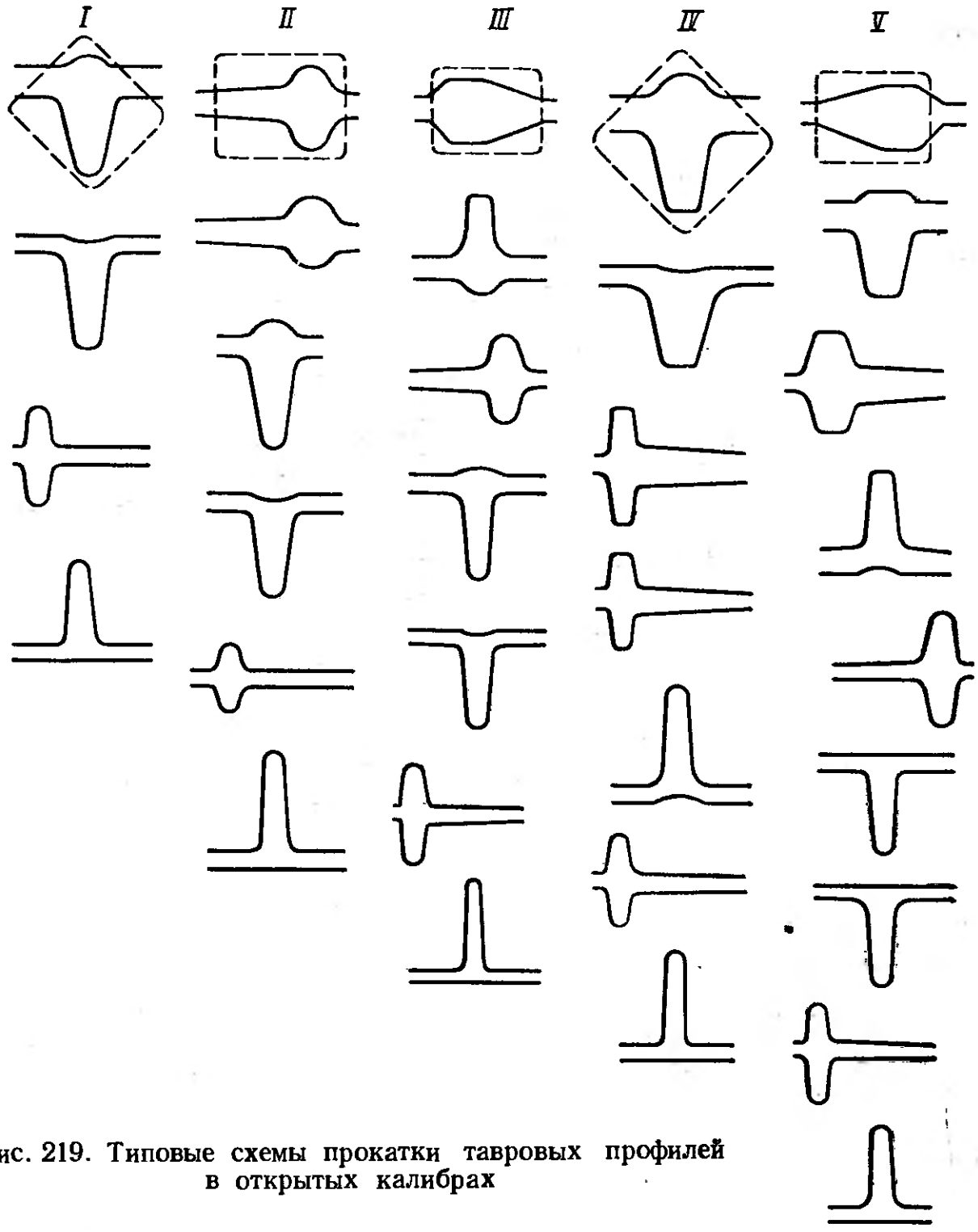



Рис. 219. Типовые схемы прокатки тавровых профилей в открытых калибрах

случае сварку производят по стенке широкополочной составной балки, что обеспечивает лучшее качество сварного профиля.

Примерные расчеты калибровки тавровых профилей различной формы приведены в работе [45].

## 11. ПРОКАТКА И КАЛИБРОВКА ПОЛОСОБУЛЬБОВЫХ ПРОФИЛЕЙ

Полособульбовые профили (ГОСТ 5353—52), предназначенные в основном для судостроения, прокатывают из простых углеродистых и различных низколегированных конструкционных сталей. Полособульбовая сталь представляет собой несимметричный профиль (рис. 220), горячая прокатка и холодная правка которого связаны со значительными трудностями.

Существуют различные способы калибровки полособульбовой стали: полосовой, полосоугловой, желобчато-полосовой. Проф. Д. И. Старченко предложил новый способ калибровки пособульбовой стали, так называемую корытную калибровку [1].

Сущность корытной калибровки полособульбового профиля определяется двумя полособенностями:

а) все подготовительные калибры, включая и предчистовой, выполняют корытными, окончательное выпрямление полотна со свободным уширением осуществляют в чистовом закрытом по головке калибре;

б) высоту головки и ширину полотна контролируют за счет реброво обжатия этих элементов.

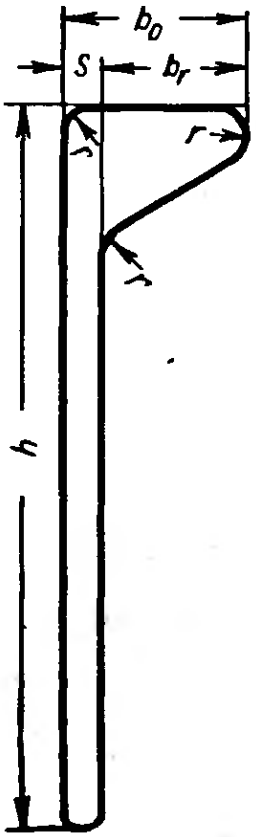


Рис. 220. Профиль полособульбовой стали (ГОСТ 5353—52)

На рис. 221 приведена корытная калибровка полособульбовой стали № 12, выполненная по этому методу и освоенная нашей промышленностью. Всего калибровка включает 6—7 фасонных калибров. В последних пяти калибрах необходимо соблюдать равномерность деформации по элементам профиля; в первых двух по ходу прокатки разрезных калибрах производят черновое формоизменение профиля с неравномерной деформацией. Для первых двух калибров принимают прямое или косое расположение.

Форма предчистового калибра *VI* (рис. 221) с закрытой головкой со свободным уширением головки раската и ребровым обжатием полки оказалась наиболее удовлетворительной.

В первом контрольном калибре *IV* происходит ребровое обжатие головки и полки раската. В предчистовом калибре полку

[1] Д. И. Старченко. Изв. вузов, Черная металлургия, 1958, № 8, с. 97.

подвергают ребровому обжатию с контролированием размеров полосы по ширине.

В чистовом калибре окончательно выпрямляют стенку полосо-бульбовой стали при небольшом равномерном обжатии по всем элементам раската.

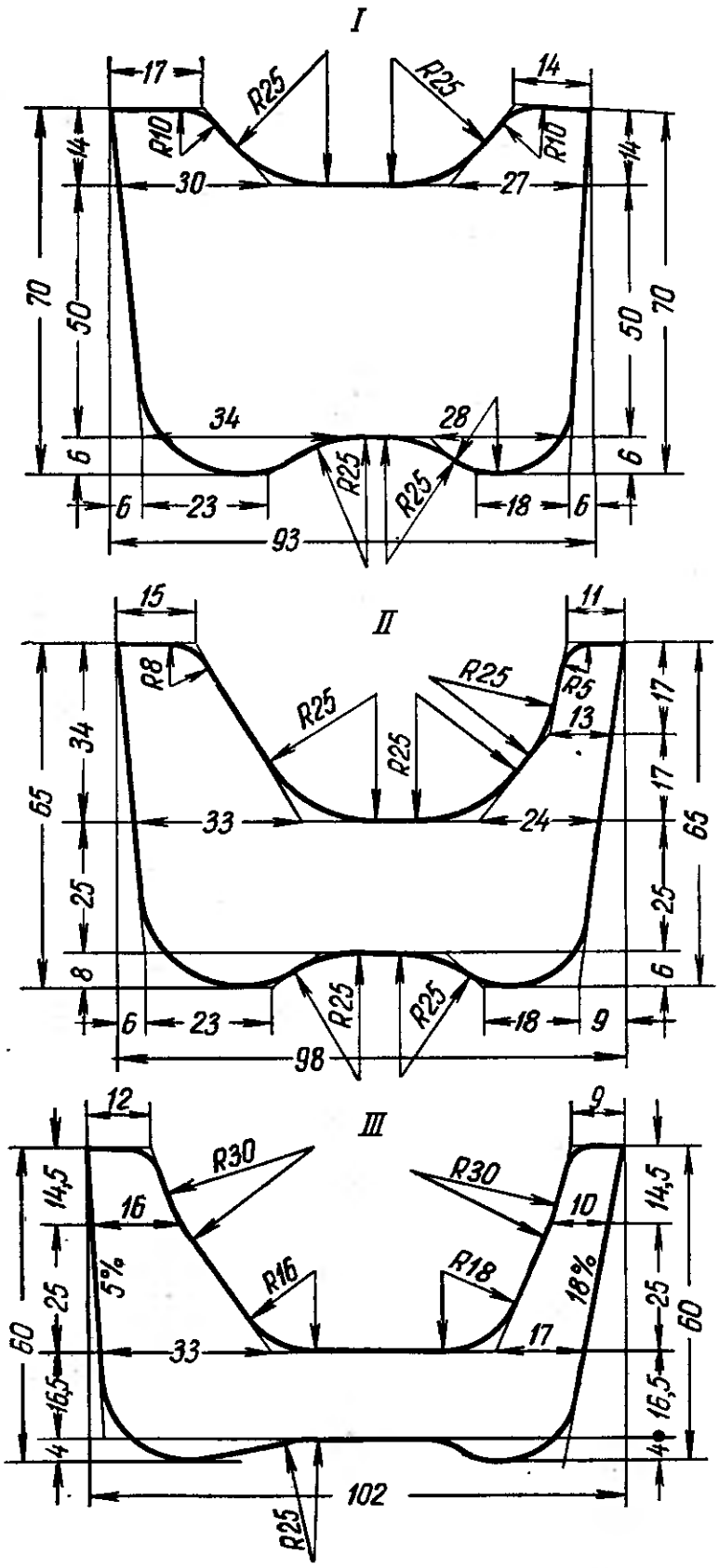
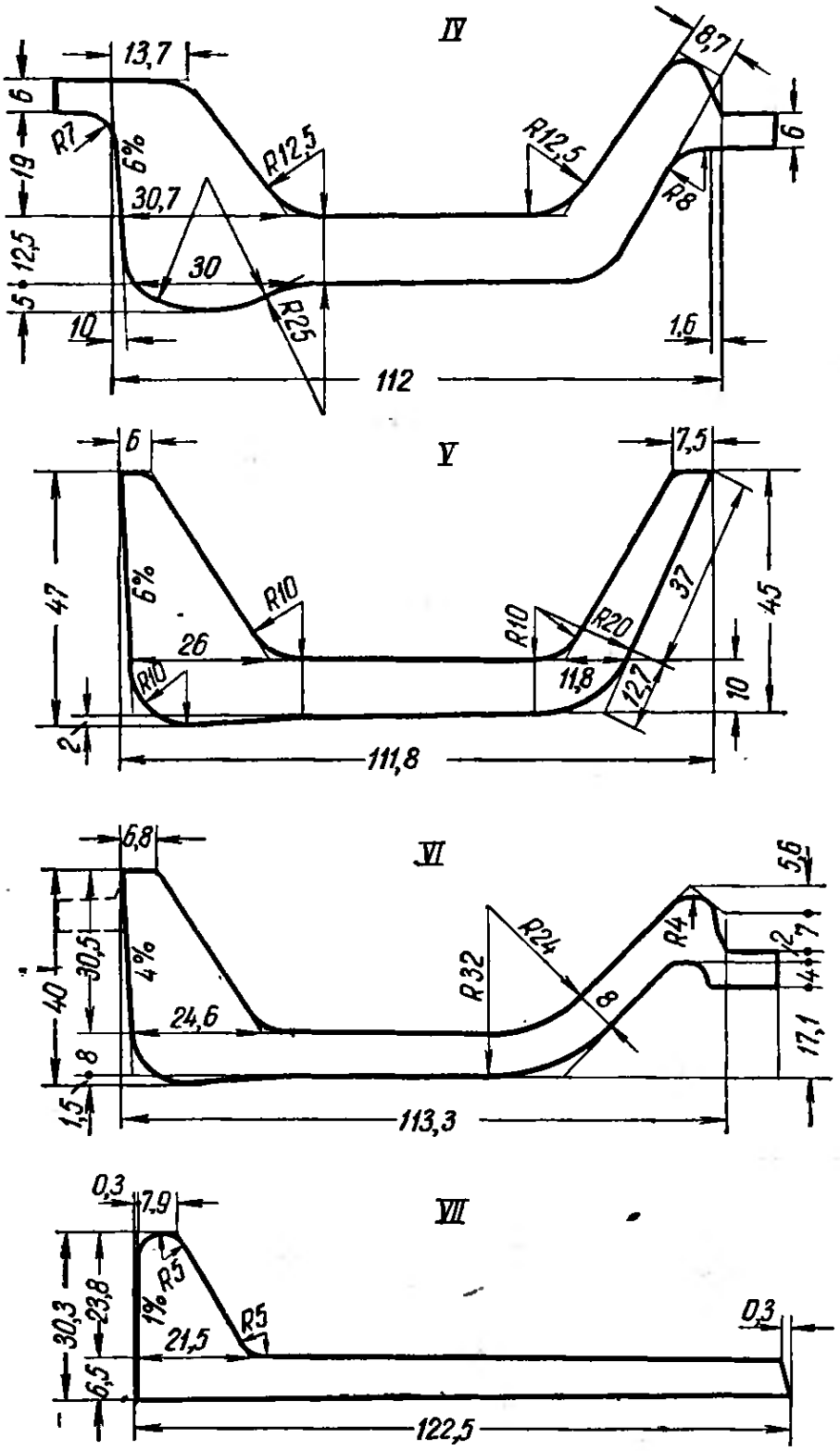



Рис. 221. Калибровка для про

С внедрением новой калибровки полособульбовых профилей в производство было достигнуто снижение брака примерно в 2 раза, сокращение расходного коэффициента на 5—7% и увеличение производительности стана по этому профилю на 40—50%.




катки полособульбовой стали, № 12

## 12. ПРОКАТКА И КАЛИБРОВКА ШАХТНОЙ СТОЙКИ

Для крепления горных выработок в настоящее время применяют шахтные стойки (рис. 222), состоящие из двух профилей, каждый из которых прокатывают отдельно по самостоятельной калибровке.

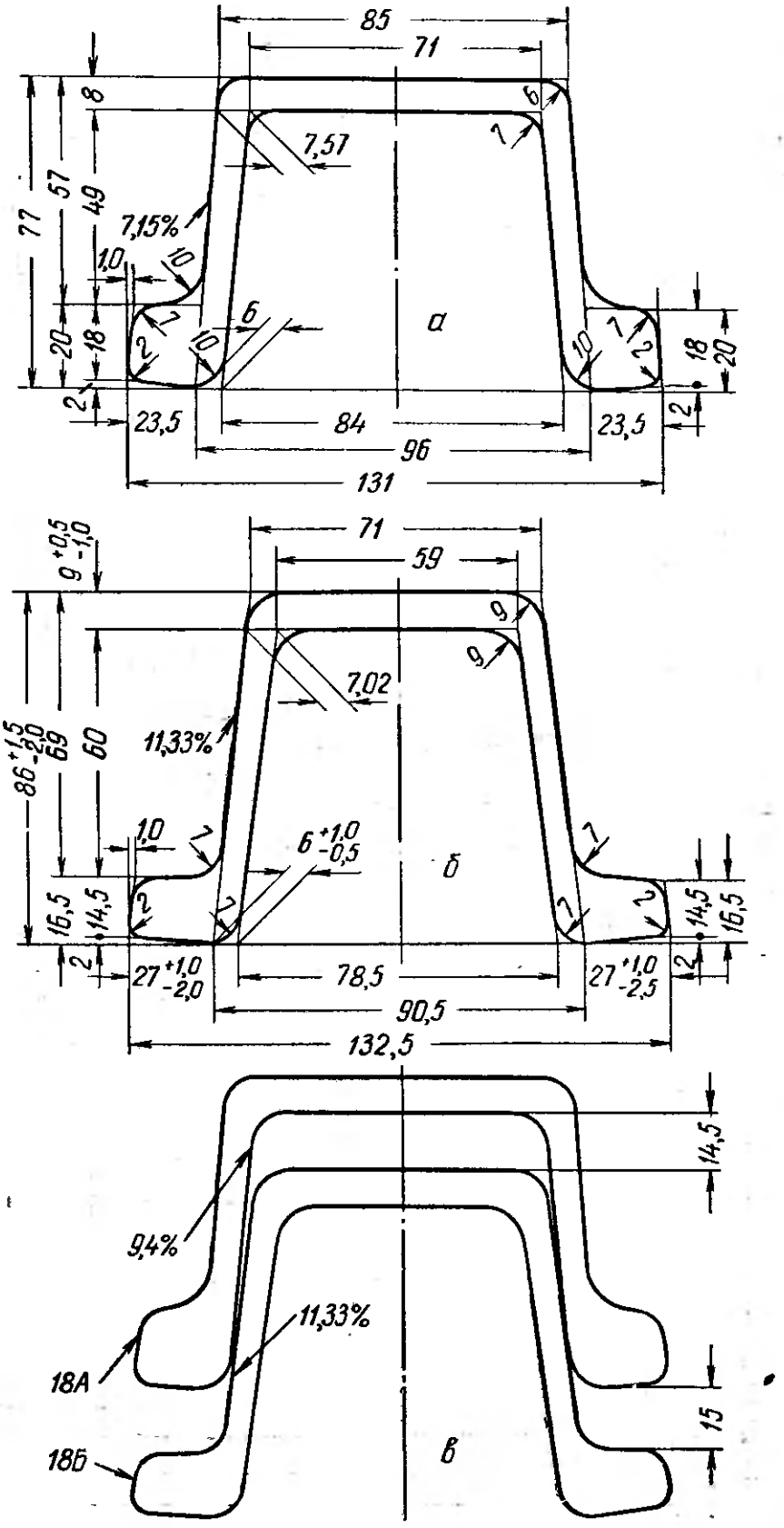



Рис. 222. Профили парных шахтных стоек:
*а* — 18а; *б* — 18б; *в* — 18а и 18б в служебном состоянии

С целью более экономичного использования металла и усиления прочности крепления разработан новый взаимозаменяемый профиль СВП17 для шахтной стойки. При изготовлении этого профиля вдвое сокращается парк валков, сам профиль дает экономию металла примерно на 5,5%. Новый профиль более высокий по сравнению со старым, что вызывает определенные трудности при прокатке. Прокатка этого профиля впервые освоена на стане 650 завода «Азовсталь» [1].

На рис. 223, *а* показано деление профиля № 18 на расчетные элементы: полка *I*, стойка *II* и кулачки *III*. При расчете калибровки профиля СВП17 было принято другое деление: полка *I* и кулачки *II* (рис. 223, *б*). На рис. 224 приведена калибровка шахтной стойки СВП17, выполненная по методу Б. М. Шума с делением профиля на два расчетных элемента. В чистовой линии имеется 7 фасонных калибров, фасонная заготовка *А* поступает из обжимной клети 800 стана 650.

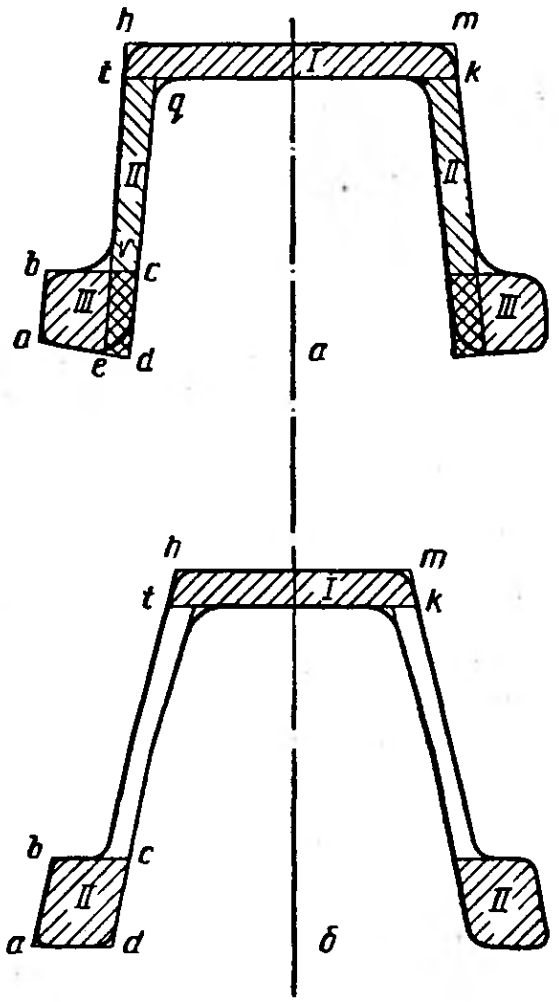



Рис. 223. Деление профиля шахтной стойки на расчетные элементы:
*а* — по методу В. П. Хлебникова;
*б* — по методу Б. М. Шума

Сущность метода Б. М. Шума заключается в следующем. Размеры стойки искомого калибра $t_и$ определяют, исходя из толщины стойки без учета ее высоты, по формуле

$$t_и = t_з\,(\mu_{п.з} \pm m) = t_з\lambda_з,$$

где $t_з$ — размеры полки в заданном калибре;

$\mu_{п.з}$ — коэффициент вытяжки полки в данном калибре;

$m$ — величина, устанавливаемая в пределах от нескольких десятых до одной сотой единицы;

$\lambda_з = \mu_{п.з} \pm m$ — коэффициент обжатия стойки в заданном калибре.

Высоту калибров с полуоткрытой частью для обработки кулачка определяют по формуле

$$H_и = H_з + 0{,}5\Delta h_п + 0{,}25\Delta h_к,$$

где $H_з$ — высота предыдущего (заданного) по ходу прокатки калибра;

[1] Б. М. Шум. Сталь, 1962, № 3, с. 243.

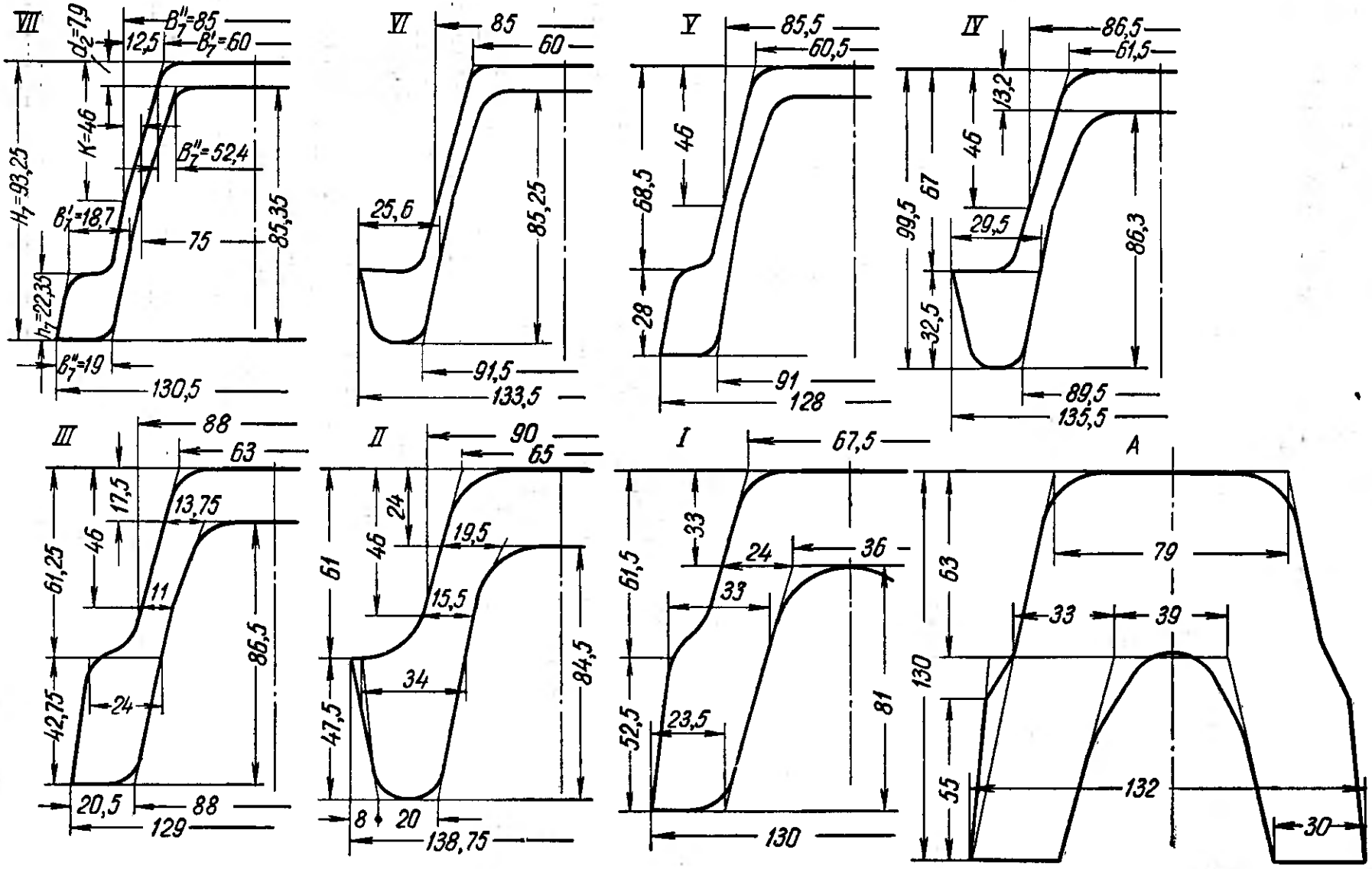



Рис. 224. Калибровка для прокатки шахтной стойки СВП 17

$\Delta h_п$ — обжатие по толщине полки в заданном калибре;
$\Delta h_к$ — обжатие по высоте кулачка в вертикальном направлении в заданном калибре.

Для расчета высоты калибров с закрытой частью для обработки кулачка (калибры *I*, *III*, *V*, *VII*, рис. 220) предлагается формула

$$H_и = H_з + 0{,}5\,(\Delta h_п + \Delta h_к).$$

Ширину полки профиля в чистовом и предчистовом калибрах принимают одинаковой, а для остальных калибров ширину полки определяют из выражения

$$B'_п = B'_ч + 0{,}5\,(n - 2),$$

где $B'_ч$ — ширина полки по верхним конструкционным точкам чистового калибра;
$n$ — порядковый номер калибра по ходу расчета (против хода прокатки).

Длина средней линии полки равна

$$B_{ср} = B' + d \operatorname{tg} \alpha,$$

где $B'$ — ширина полки по верхней грани;
$d$ — толщина полки в данном калибре;
$\alpha$ — угол наклона внешней стенки калибра.

Ширину нижней части калибра определяют по условиям задачи металла из калибра в калибр.

В чистовом калибре принимают следующие значения коэффициентов обжатия стойки:

для верхней части в месте сопряжения стойки и полки

$$\lambda'_{с7} = \mu_{п7} - 0{,}01 = 1{,}10;$$

для нижней части стойки

$$\lambda_{с7} = \mu_{п7} - 0{,}03 = 1{,}08.$$

Пониженные коэффициенты обжатия стойки по сравнению с коэффициентами вытяжки по элементам профиля приняты для выравнивания выработки калибра в тех местах, где стенки профиля имеют наименьшую толщину и, следовательно, более низкую температуру.

Калибровка профиля СВП17 выполнена со значительным защемлением для получения более широкой исходной заготовки и обеспечения правильной разрезки раската в разрезном калибре.

Нейтральная линия калибров определена по методу Д. И. Старченко [11].

В табл. 91 приведена характеристика калибровки шахтной стойки СВП17.

Таблица 91

**Характеристика калибров для прокатки профиля СВП17**

| Номер калибра | Полка | | | | Кулачок | | Коэффициенты обжатия стойки | | Калибр | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $f_п$ $см^2$ | $\mu_п$ | $B_{ср}$ $мм$ | защемление $мм$ | $f_к$ $см^2$ | $\mu_к$ | $\lambda'$ | $\lambda$ | сечение, $см^2$ | $\mu_{общ}$ |
| Обжимная клеть | 57,96 | — | 92,00 | — | 23,30 | — | — | — | 104,56 | 1,24 |
| *I* | 25,0 | 2,30 | 75,75 | 16,25 | 14,83 | 1,575 | 1,375 | — | 66,76 | 1,56 |
| *II* | 17,24 | 1,45 | 71,50 | 4,25 | 12,82 | 1,555 | 1,23 | 1,42 | 55,13 | 1,21 |
| *III* | 11,85 | 1,46 | 67,70 | 3,80 | 9,51 | 1,35 | 1,42 | 1,41 | 41,27 | 1,33 |
| *IV* | 8,56 | 1,38 | 65,00 | 2,70 | 6,98 | 1,36 | 1,375 | 1,375 | 31,80 | 1,29 |
| *V* | 6,18 | 1,38 | 63,15 | 1,85 | 5,10 | 1,37 | 1,37 | 1,335 | 23,94 | 1,32 |
| *VI* | 5,45 | 1,11 | 62,40 | 0,75 | 4,60 | 1,11 | 1,105 | 1,11 | 21,73 | 1,10 |
| *VII* (чистовой) | 4,91 | 1,11 | 62,15 | 0,25 | 4,16 | 1,11 | 1,10 | 1,08 | 20,15 | 1,07 |

## 13. ПРОКАТКА И КАЛИБРОВКА ШПУНТОВЫХ СВАЙ

Горячекатаные шпунтовые сваи применяют в гидротехническом строительстве для сооружения различных перемычек. Согласно ГОСТ 4781—55, различают сталь шпунтовую плоского профиля (ШП-1 и ШП-2), сталь шпунтовую корытного профиля (ШК-1 и ШК-2) и сталь шпунтовую зетового профиля (ШД-3 и ШД-5). На рис. 225 приведены указанные три типа шпунтовых свай (соответственно *а*, *б* и *в*).

Шпунтовая свая представляет собой весьма сложный профиль. Прокатка этого профиля освоена на заводах им. Дзержинского и «Азовсталь». Особенно сложной является замковая часть шпунтовой сваи, которую получают сгибанием не только в валках, но также в проводках и направляющих.

В статье В. П. Сазоненко [1] подробно описана прокатка и калибровка шпунтовой сваи типа Ларсена (ЛIV и ЛV). Этот профиль отличается от шпунтовой сваи типа ШК-2 общим видом и формой замочного крючка.

На рельсо-балочном стане реверсивное дуо 925 прокатывают шпунт ЛV (рис. 225, *г*). Профиль шпунтовой сваи этого типа имеет

[1] В. П. Сазоненко. В сб. «Производство и применение экономичных профилей проката» (материалы Украинского республиканского совещания). Днепропетровск, 1961, с. 188.

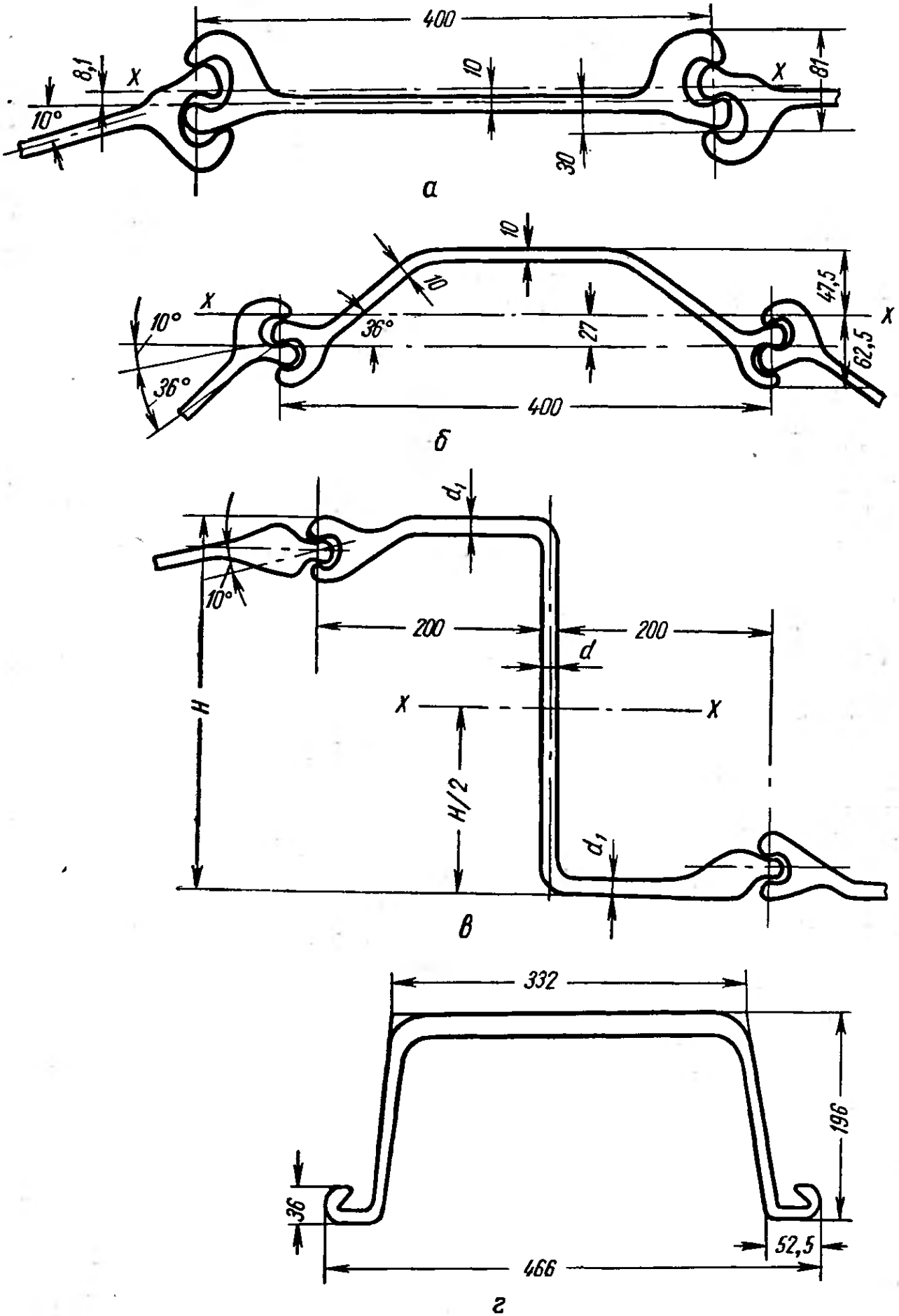



Рис. 225. Типы шпунтовых свай

корытообразную форму с загнутыми в виде замочных крючков концами.

Большие трудности представляет получение крючков при прокатке. Существует два способа загиба крючков. По одному способу загиб производят в последнем или двух последних калибрах. По второму способу загиб крючка производят в специальных проводках, установленных у чистового калибра.

В представленной ниже калибровке загиб крючка производится по первому способу. Прокатку шпунтовой сваи ЛV ведут в 10 фасонных калибрах за 15 проходов.

С блюминга 1000 блюм сечением 360×320 *мм* поступает в первый фасонный калибр, врезанный в клети *I* рельсо-балочного стана (рис. 226). В этом калибре прокатку ведут за четыре прохода, так что толщина шейки уменьшается с 240 до 125 *мм*. Далее раскат поступает в калибры *II*, *III* и *IV*, расположенные в валках этой же клети. В калибрах *II* и *III* делают по два прохода, в калибре *IV* — один проход (рис. 226). Далее раскат поступает во вторую клеть стана, где в трех калибрах *V*, *VI* и *VII* дают три прохода.

Наконец, раскат поступает в третью, чистовую, клеть, где имеются три фасонных калибра *VIII*, *IX* и *X*, в которых прокатку ведут по одному проходу в каждом калибре.

Угол захвата в первом проходе достигает 34° 30′. В этом калибре блюм получает фасонное очертание (разрезной калибр). В остальных калибрах углы захвата не превышают 19° 30′. Коэффициент вытяжки составляет $\mu_1 = 1{,}29$ в первом проходе и $\mu_2 = 1{,}139$ во втором. Наибольший коэффициент вытяжки приходится на девятый проход (калибр *IV*), в котором коэффициент вытяжки равен $\mu_9 = 1{,}365$. В предчистовом проходе $\mu_{14} = 1{,}095$, а в чистовом проходе, в котором происходит загиб крючка, коэффициент вытяжки составляет $\mu_{15} = 1{,}007$.

Интерес представляет первый разрезной калибр, который имеет две режущих кромки на гребне (рис. 226). Так как ширина первого разрезного калибра по верху равна 300 *мм*, т. е. уже поступающего блюма, ширина которого $B_0 = 320$ *мм*, то в разрезном калибре раскат заклинивается и разрезывающий гребень с двумя режущими кромками обеспечивает симметричную разрезку, вытесняя металл в боковые части калибра для образования будущих крючков.

Практика прокатки шпунтов на заводе им. Дзержинского показала, что для прямолинейного выхода шпунтовой полосы необходимо в чистовом калибре давать небольшое обжатие (0,5—0,7 *мм*).

С точки зрения прочностных характеристик более выгодным, чем шпунт ЛV, является шпунтовая свая ШД-5 (см. рис. 225, *в*), хотя прокатка такого профиля представляет значительные трудности.

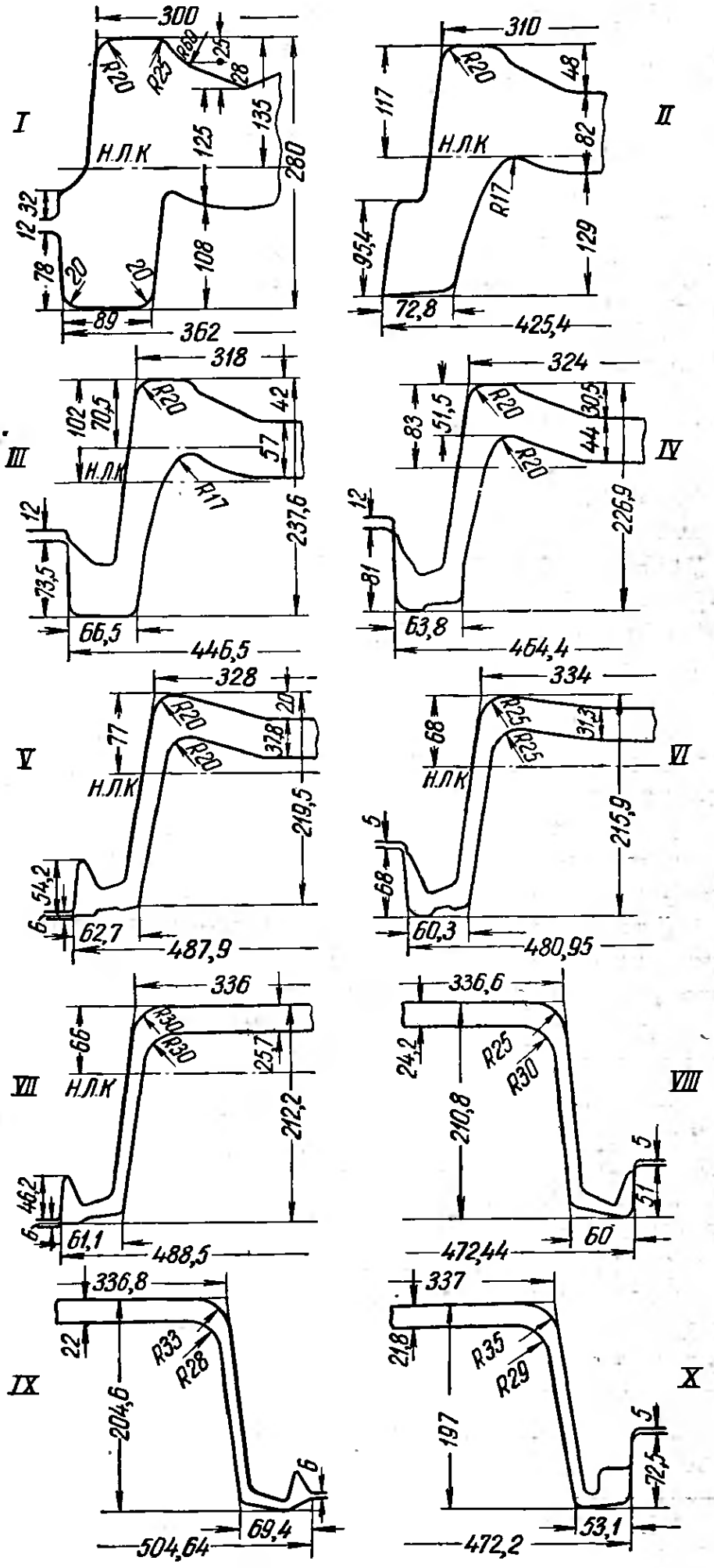



Рис. 226. Калибровка шпунтовой сваи ЛV

Прокатка корытных шпунтовых профилей ШК-0 и ШК-1, а также плоского шпунта ШП-1 успешно освоена на стане 800 завода «Азовсталь» [1].

## 14. ПРОДОЛЬНАЯ ПРОКАТКА И КАЛИБРОВКА ПЕРИОДИЧЕСКИХ ПРОФИЛЕЙ

Для сокращения операций и потерь металла при штамповке применяют исходную заготовку периодического профиля (ГОСТ 8319—57), полученную продольной прокаткой.

Основная трудность продольной прокатки периодических профилей заключается в том, что за один проход необходимо добиться совпадения отпечатков на верхней и нижней сторонах профиля. Чтобы периоды верхнего и нижнего валков были одинаковыми, на стане 550 завода им. Петровского применяют специальную кулачковую муфту, состоящую из двух полумуфт. Точную настройку валков производят регулировкой конусных вкладышей этой муфты. Кроме того, шестеренная клеть, конструкция которой предложена С. Н. Филипповым [46], дает возможность производить настройку стана без его остановки. Имеется также механизм, задающий раскат в калибр чистовой клети при определенном положении валков.

Для обеспечения точной длины периодов необходимо соблюдать постоянство температуры проката и перед чистовым калибром сбивать окалину водой.

При прокатке периодических профилей коэффициент обжатия в чистовом калибре колеблется в широких пределах — от 1,1 до 3 и более.

Для продольной прокатки периодического профиля необходимо применять валки с переменным по их окружности калибром, что предопределяет изменение по длине раската обжатия, угла захвата, опережения, уширения, давления на валок и других параметров.

На рис. 227 в качестве примера представлена прокатка заготовки автомобильной оси ГАЗ-51 и применяемые для этой цели валки. Длины элементов *а*, *б*, *в*, *г*, *д* и т. д. вследствие опережения при прокатке не равны длинам элементов *а*, *б*, *в*, *г*, *д* и т. д. по окружности валка. В местах большого обжатия возникает увеличенное уширение металла, которое выходит в зазор, образуя заусенцы. Построение профиля валка по заданному профилю периодического изделия возможно только при правильном учете опережения, которое зависит от угла захвата, угла трения, угла критического сечения и характера изменения высоты проката.

При рассмотрении условий захвата металла валками при прокатке на валках переменного радиуса вводят понятие угла

---

[1] В. П. Хлебников, Б. М. Шум, Н. Л. Рудольский, П. А. Чеховский. Сталь, 1954, № 1, с. 51—57.

захвата и угла касания. На рис. 228, *а* приведена схема прокатки с нарастанием и убыванием радиуса валка.

Углом захвата является угол $\alpha'$ между продольной осью прокатки и касательной к поверхности валка в точке захвата $A$. Угол касания есть центральный угол $\theta$ контактной поверхности,

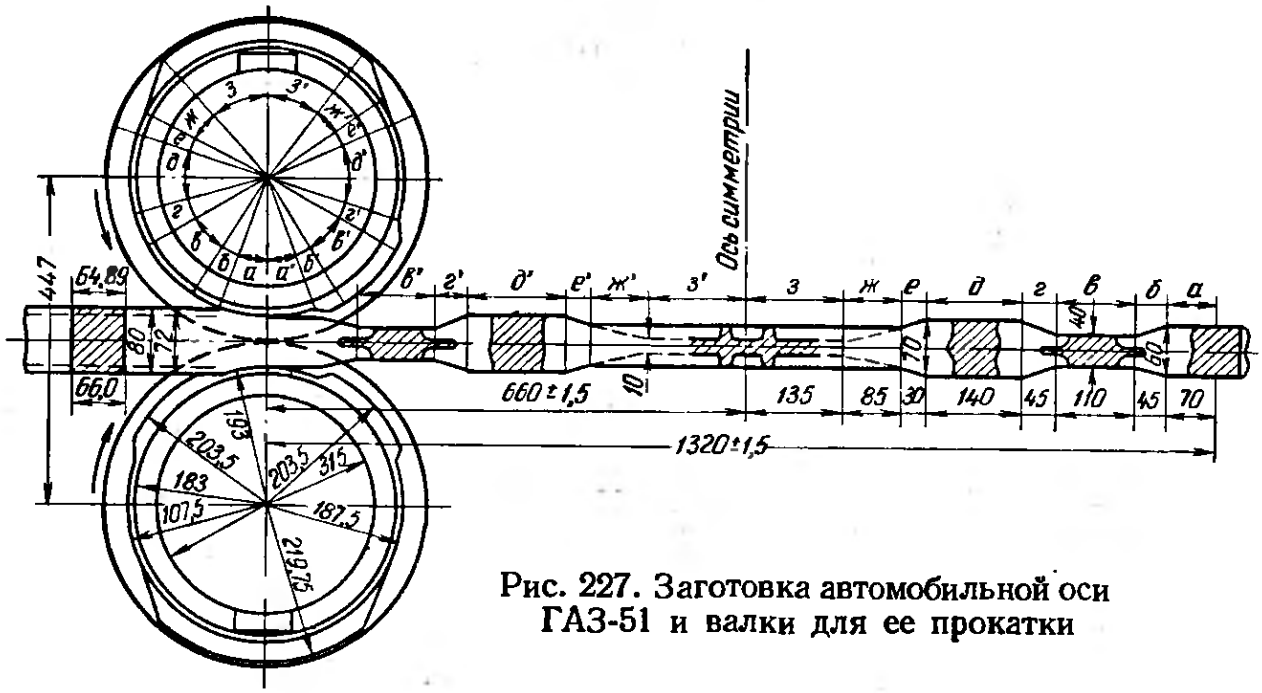



Рис. 227. Заготовка автомобильной оси ГАЗ-51 и валки для ее прокатки

т. е. угол между радиусами-векторами, проведенными из центра валка в точки захвата и выхода металла из валков.

Введем понятие условного обжатия

$$0{,}5\Delta h_{усл} = H - 2(c - \rho_A).$$

Угол касания, аналогично углу захвата при прокатке в валках одинакового радиуса, можно определить по формуле

$$\theta = \arccos\left(1 - \frac{\Delta h_{усл}}{2\rho_A}\right).$$

Угол захвата при прокатке с нарастанием радиуса (рис. 228) равен

$$\alpha'_н = \nu_н - \frac{\pi}{2}; \quad \nu_н = \tau + \theta_н; \quad \tau = \frac{\pi}{2} - \psi; \quad \alpha'_н = \theta_н - \psi.$$

Аналогично в случае прокатки полосы с обратной клиновидностью (рис. 228, *б*)

$$\alpha'_у = \theta_у + \psi.$$

Таким образом, угол захвата меньше или больше угла касания в зависимости от того, с нарастанием или убыванием радиуса валка происходит прокатка.

Длина очага деформации для случая прокатки с нарастанием радиуса валка равна

$$l_{д.н} = \rho_A \sin \theta_н$$

или

$$l_{д.\,н} = l'_{д.\,н} + l''_{д.\,н} = R_{ср} \sin \alpha'_н + \rho_B \sin \psi.$$

Для случая прокатки с убыванием радиуса валка

$$l_{д.\,у} = \rho_A \sin \theta_у.$$

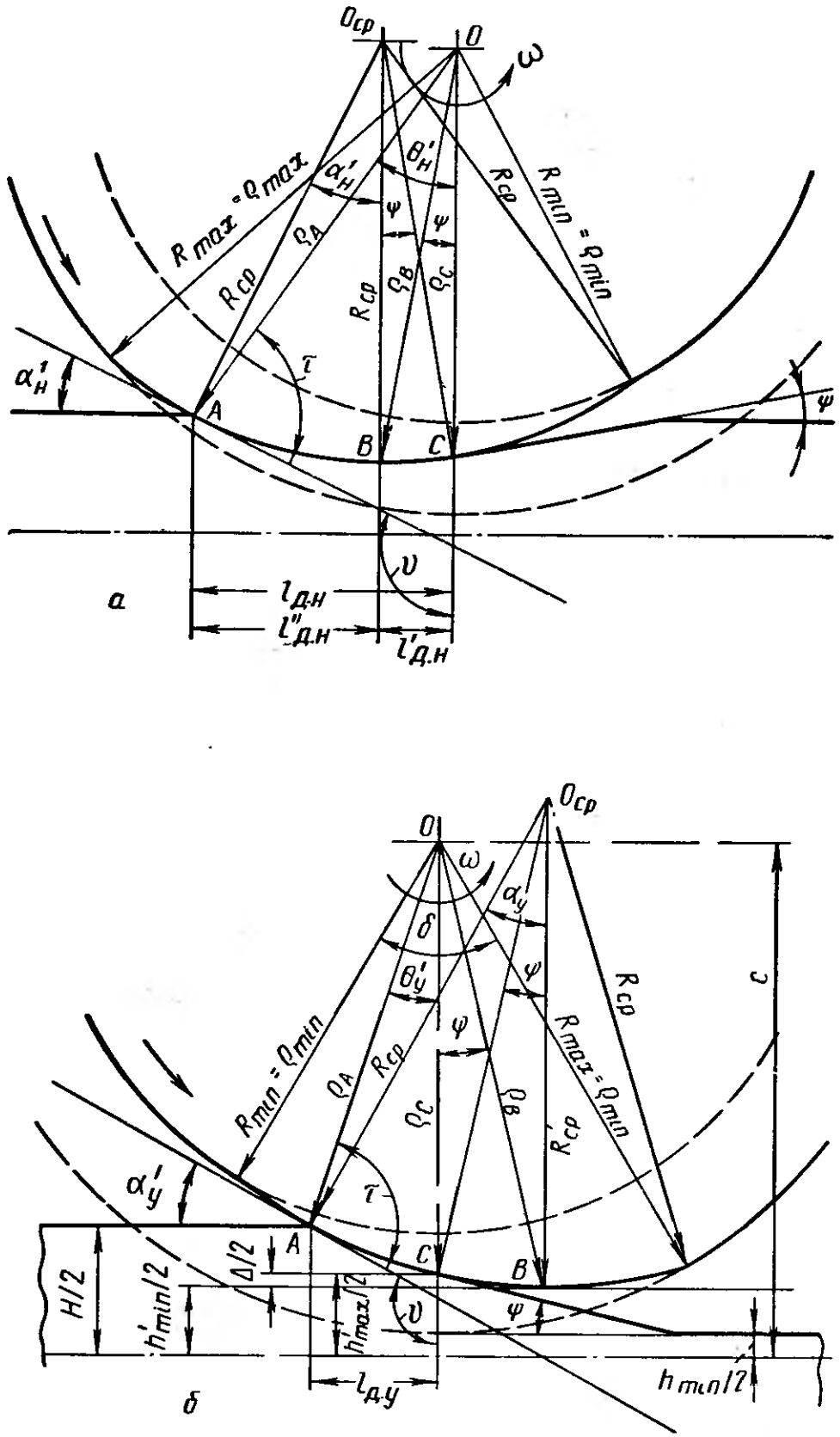



Рис. 228. Схема периодической прокатки с нарастанием (*а*) и убыванием (*б*) радиуса валка

Длина очага деформации при прокатке с нарастанием радиуса всегда больше, чем при прокатке с убыванием радиуса.

Для получения граничных условий прокатки на валках с переменным радиусом, исходя из условий равновесия действующих на контактной поверхности сил [48], получим следующие выражения:

для прокатки с нарастанием обжатия

$$\gamma_н = \frac{\alpha_н}{2}\left(1 - \frac{\alpha_н}{2\beta}\right) + \frac{\psi}{2}\left(1 + \frac{\psi}{2\beta}\right); \qquad (127)$$

для прокатки с убыванием обжатия

$$\gamma_у = \frac{\alpha_у}{2}\left(1 - \frac{\alpha_у}{2\beta}\right) - \frac{\psi}{2}\left(1 - \frac{\psi}{2\beta}\right), \qquad (128)$$

где $\gamma_н$ и $\gamma_у$ — углы нейтрального сечения;
$\alpha_н$ и $\alpha_у$ — углы захвата;
$\beta$ — угол трения;
$\psi$ — угол клиновидности.

Выражения (127) и (128) отличаются от общеизвестной для простого случая прокатки формулы И. М. Павлова, определяющей зависимость между углами $\alpha$, $\beta$ и $\gamma$, наличием второго члена в правой части, который равен нулю при угле клиновидности $\psi = 0$.

Для определения максимальных углов захвата при прокатке на валках с переменным радиусом приравняем выражения (127) и (128) нулю, тогда

$$\frac{\alpha_н}{2}\left(1 - \frac{\alpha_н}{2\beta}\right) + \frac{\psi}{2}\left(1 + \frac{\psi}{2\beta}\right) = 0.$$

После преобразований и решения квадратного уравнения получим

$$\alpha_н = 2\beta + \psi. \qquad (129)$$

При прокатке с нарастанием обжатия минимум центрального угла $\theta_н$ равен углу клиновидности при $\alpha_н = 0$, тогда

$$\gamma_н = \frac{\psi}{2}\left(1 + \frac{\psi}{2\beta}\right).$$

Для случая прокатки с убыванием обжатия аналогично получим

$$\alpha_у = 2\beta - \psi. \qquad (130)$$

Итак, захватывающая способность валков с увеличением угла клиновидности $\psi$ при прокатке с нарастанием радиуса валка увеличивается, а при прокатке с убыванием радиуса уменьшается. В первом случае она больше, чем при прокатке на гладких валках, во втором случае — меньше.

Анализ условий захвата при прокатке на валках с переменным радиусом позволил объяснить причины пробуксовок металла, имевших место при освоении прокатки периодических профилей. Поэтому особое внимание необходимо уделять выбору угла клиновидности участков, прокатываемых с уменьшением обжатия.

Участки периодических профилей с углом односторонней клиновидности, большим угла трения, по условиям захвата нельзя прокатать с уменьшением обжатия. В этом случае полосу необ-

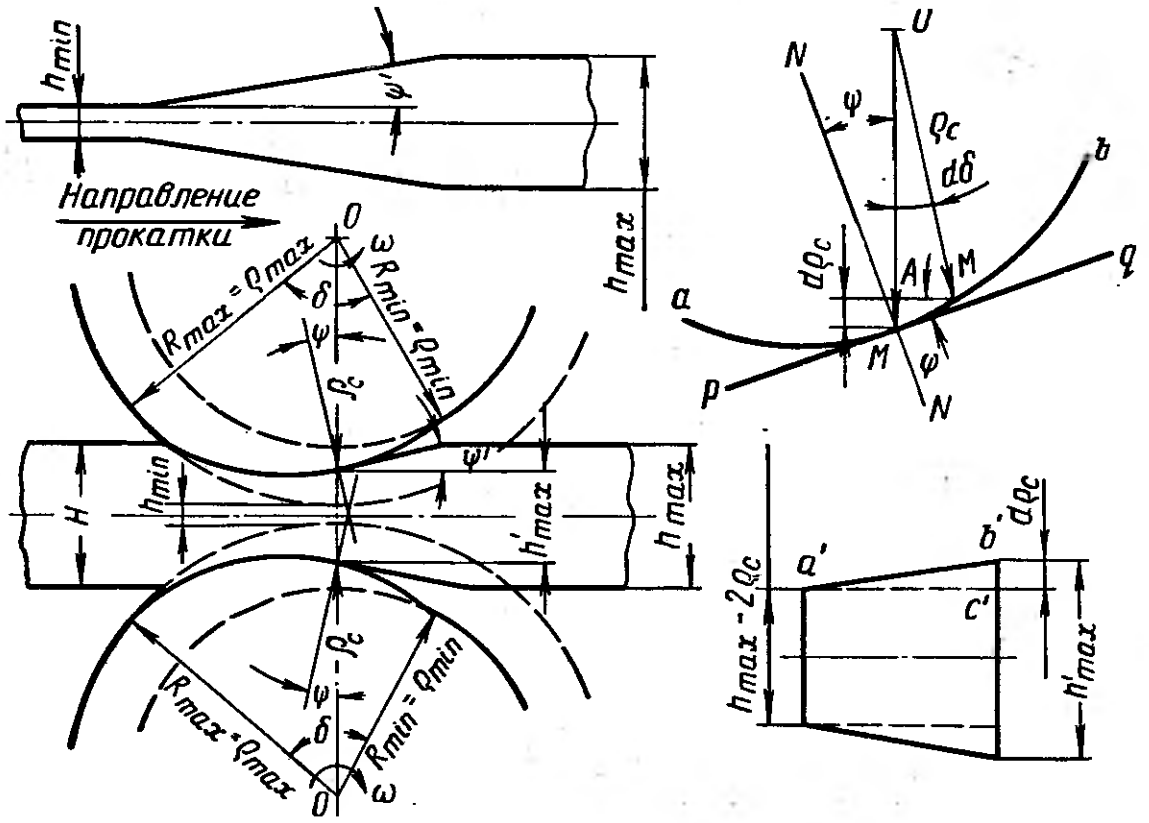



Рис. 229. Схема прокатки клиновидной полосы

ходимо прокатывать толстым концом вперед с тем, чтобы на этих участках наблюдалось нарастание обжатия.

Таким образом, продольная прокатка периодических профилей, имеющих разнонаправленные переходные участки с углом клиновидности, бо́льшим угла трения, невозможна даже в том случае, если имеются всего только два подобных разнонаправленных участка. Весьма существенна роль внешнего трения; возможно улучшение условий захвата на переходных участках с уменьшением обжатия и на участках с максимальным обжатием путем увеличения коэффициента внешнего трения (увеличением шероховатости валков, насечкой, удалением окалины гидросбивом, уменьшением скорости прокатки и т. п.).

Ниже рассмотрена прокатка элемента периодического профиля. Допустим, что высота изменяется равномерно, т. е. рассмотрим прокатку клиновидной полосы с плоскими верхней и нижней поверхностями (рис. 229).

После поворота валков на бесконечно малый угол $d\delta$, принимая бесконечно малые дуги за прямые, получим

$$\overline{MA} = \rho_C\, d\delta; \quad \operatorname{tg}\psi = \frac{d\rho_C}{d\delta}.$$

На прокатанной полосе получим

$$\operatorname{tg}\psi' = \frac{b'c'}{a'c'} = \frac{d\rho_C}{\rho_C\, d\delta\,(1+S)} = \frac{d\rho_C}{\rho_C\, d\delta k_s}, \tag{131}$$

где $k_s = 1 + S$ — коэффициент опережения.

Выражение (131) можно представить в следующем виде:

$$\frac{d\rho_C}{\rho_C} = \operatorname{tg}\psi'\, d\delta k_s.$$

Предположим, что для получения переходного участка полосы с постоянным углом клиновидности ($\psi' = \text{const}$) коэффициент опережения по длине переходного участка есть величина постоянная, т. е. $k_s = \text{const}$. Тогда

$$\ln \rho_C = \delta \operatorname{tg}\psi k_s + \ln c,$$

$$\rho_i = ce^{\delta_i \operatorname{tg}\psi k_s},$$

где $\rho_i$ — текущее значение радиуса валка переходного участка на линии центров;

$\delta_i$ — текущее значение угла поворота валка.

Значение постоянной определяем из условия, что при $\delta = 0$ имеем

$$\rho_i = \rho_{\min},$$

тогда

$$\rho_i = \rho_{\min} e^{\delta_i \operatorname{tg}\psi k_s}. \tag{132}$$

При $\delta = 0$ и $k_s = 1$ получим

$$\rho_i = \rho_{\min} e^{\delta_i \operatorname{tg}\psi}.$$

Для случая прокатки клиновидной полосы тонким концом вперед аналогично получим

$$\rho_i = \rho_{\max} e^{-\delta_i \operatorname{tg}\psi k_s}, \tag{133}$$

где $\delta_i$ — отсчитывают от $\rho_{\max}$ до $\rho_{\min}$.

Таким образом, для получения клиновидной полосы с постоянным углом клиновидности при условии, что коэффициент опережения по всей ее длине усреднен, профиль переходного участка на валке должен быть очерчен по логарифмической спирали.

При условии, что опережение по длине переходного участка изменяется, для определения кривой переходного участка радиус-вектор на линии центров определяют в зависимости от угла поворота $\delta$. Коэффициент опережения $k_s$ рассчитывают или определяют экспериментально. Кривую переходного участка строят графоаналитическим способом.

Если при переменном по длине переходного участка опережении сделать валок по профилю логарифмической спирали, прокатанный переходный участок будет иметь по своей длине непостоянный угол клиновидности. Однако при этом поверхности клина будут мало отличаться от плоских.

Изготовление валков по профилю, отвечающему уравнению логарифмической спирали, представляет известные трудности. Поэтому на практике иногда прибегают к применению спирали Архимеда.

Если при постоянной угловой скорости валка $\omega = \omega_0$ принять скорость изменения радиуса валка постоянной $v_\rho = v_0$, то можно записать

$$\frac{d\rho_C}{d\delta} = \frac{v_0}{\omega_0}, \tag{134}$$

так как

$$v_\rho = \frac{d\rho}{dt} = \frac{d\rho}{d\delta} \cdot \frac{d\delta}{dt} = \frac{d\rho}{d\delta}\omega.$$

Интегрируя выражение (130), получим

$$\rho_C = \frac{v_0}{\omega_0}\delta + C.$$

При $\delta = 0$ имеем уравнение Архимедовой спирали

$$\rho_C = \frac{v_0}{\omega_0}\delta + \rho_{\min}.$$

Подставляя выражение (134) в формулу (131) и принимая $k_s = \text{const}$ или $k_s = 1$, получим

$$\operatorname{tg}\psi' = \frac{1}{\rho_C}\frac{v_0}{\omega_0}. \tag{135}$$

Умножая числитель и знаменатель правой части выражения (135) на время $t_0$, необходимое для поворота валков на угол $\delta_0$ между $\rho_{\min}$ и $\rho_{\max}$, и учитывая, что $\omega_0 t_0 = \delta_0$ и $v_0 t_0 = 0{,}5\Delta h$, где $\Delta h$ — обжатие двумя валками, имеем

$$\operatorname{tg}\psi' = \frac{1}{\rho_C}\frac{\Delta h}{2\delta_0}. \tag{136}$$

При условии $k_s = \text{const}$ выражение (136) принимает вид

$$\operatorname{tg}\psi' = \frac{1}{\rho_C k_s}\frac{\Delta h}{2\delta_0}. \qquad (137)$$

Из выражений (135) и (136) видно, что при прокатке на валках, профилированных в соответствии с уравнением Архимедовой спирали, угол клиновидности полосы будет непостоянным. Тангенс угла клиновидности обратно пропорционален радиусу валка, который непрерывно изменяется. Это справедливо и для выражения (137). Поэтому применение Архимедовой спирали допустимо только в тех случаях, когда нет необходимости получения плоских граней клиновидной полосы. Установлено, что валки можно профилировать по дугам окружностей вместо логарифмической спирали, что значительно легче осуществить в практических условиях. Средний радиус при этом определяют из выражения

$$R_{ср} = \sqrt{\rho_{min}\rho_{max}}. \qquad (138)$$

Отклонение действительного угла клиновидности от заданного рассчитываем по формуле

$$\operatorname{tg}\frac{\psi_{max} - \psi_{min}}{2} = \operatorname{tg}\psi \operatorname{tg}^2\frac{\delta}{4}. \qquad (139)$$

Если полученное отклонение выходит за пределы допустимого, необходимо уменьшить центральный угол $\delta$, заменяя кривую двумя дугами окружностей, описанных двумя средними радиусами.

Покажем это на примере. Дано:

$$\rho_{min} = 164{,}5\ мм; \quad \rho_{max} = 177{,}5\ мм; \quad \psi = 5°\,50'.$$

Тогда

$$\rho_{max} = \rho_{min} e^{\delta \operatorname{tg}\psi},$$

откуда

$$e^{\delta \operatorname{tg}\psi} = \frac{\rho_{max}}{\rho_{min}} = \frac{177{,}5}{164{,}5} = 1{,}08;$$

$$\delta \operatorname{tg}\psi = 0{,}08; \quad \delta = \frac{0{,}08}{\operatorname{tg} 5°\,50'} = 0{,}784; \quad \alpha = 45°;$$

$$\operatorname{tg}\frac{\psi_{max} - \psi_{min}}{2} = \operatorname{tg} 5°50' \operatorname{tg}^2 11°\,15' = 0{,}004;$$

$$\frac{\psi_{max} - \psi_{min}}{2} = 13'.$$

Отклонение незначительное, поэтому логарифмическую спираль вполне можно заменить дугой окружности, описанной средним радиусом

$$R_{ср} = \sqrt{164{,}5 \cdot 177{,}5} = 170{,}9\ мм.$$

Исходя из этого, построение переходных участков при калибровке валков во многих случаях можно осуществлять более простым и практически себя оправдавшим способом при помощи дуг окружностей.

На рис. 230 показана типичная диаграмма изменения параметров прокатки по всей длине образца, прокатанного с возрастанием и убыванием радиуса валков (обжатия).

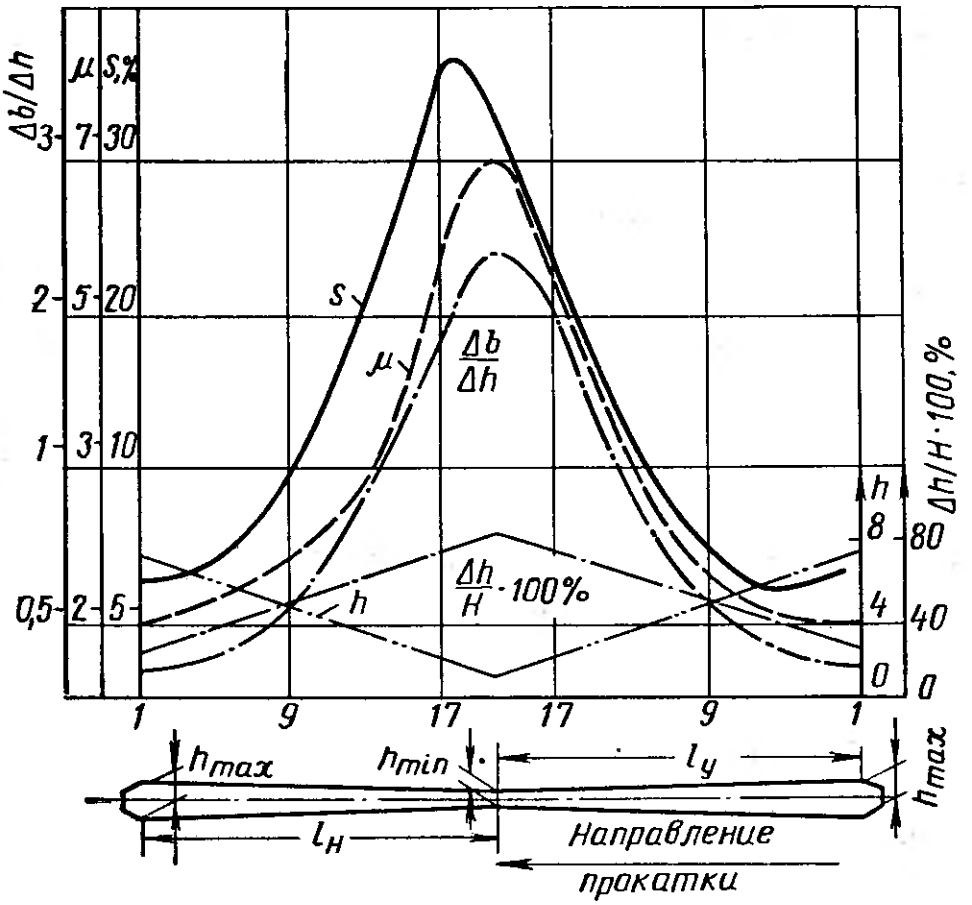



Рис. 230. Изменение высоты полосы, обжатия, уширения, коэффициента вытяжки и опережения при прокатке с нарастанием и убыванием радиуса валков

При прокатке с увеличением радиуса валков опережение резко возрастает по мере увеличения обжатия, достигает своего максимума и далее наблюдается спад кривой опережения, хотя обжатие увеличивается. При дальнейшей прокатке процесс идет с убыванием обжатия, опережение резко падает, доходит до минимума и затем плавно повышается. Максимум опережения сдвинут вперед от наиболее тонкой части полосы, а минимум опережения сдвинут вперед от наиболее толстой части полосы.

Для случая прокатки с нарастанием обжатия мгновенное опережение больше, чем при прокатке с убыванием обжатия для одного и того же сечения полосы. Это объясняется различным направлением сил нормального давления, которые при увеличении радиуса валка способствуют увеличению угла критического сечения. Мгновенное опережение при прокатке полосы толстым концом вперед

больше, чем при прокатке тонким концом вперед, и достигает 38%. Общее опережение на переходном участке при прокатке с нарастанием обжатия также больше, чем при прокатке с убыванием обжатия. На рис. 231 приведены рекомендуемые для расчетов значения опережения $S\%$ в зависимости от угла клиновидности. Перегиб кривой *1* объясняется наличием в очаге деформации переходного участка (нарастание сменяется убыванием обжатия).

На рис. 232 приведена автомобильная ось прицепа «Ирбит». Это симметричный профиль длиной 1812 *мм*. Наиболее характерными являются участок *I* прямоугольного сечения протяженностью 221 *мм* и балочный участок *III* с шейкой минимальной толщины 8 *мм*, протяженностью 100 *мм*. В прокатанной штанге оси сопрягаются участками *I*; по месту их стыка после прокатки происходит разрезка. Толщина шейки балки от участка *I* к участку *III* постепенно уменьшается.

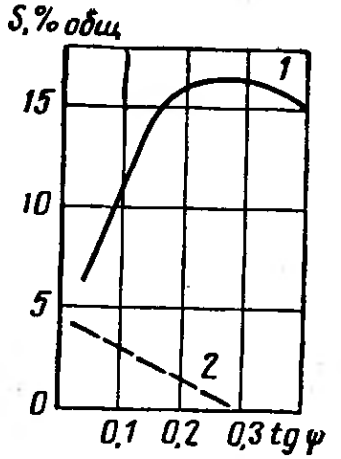



Рис. 231. Изменение опережения в зависимости от угла клиновидности:

*1* — при нарастании обжатия; *2* — при убывании обжатия

На рис. 233 показана калибровка для прокатки оси в семи калибрах из заготовки 85×154 *мм*, получаемой в обжимной клети. Калибры *III—VI* — закрытые. Из предчистового калибра выходит профиль с небольшими фланцами, чем гарантируется хорошее заполнение балочной части чистового калибра, в которой металл подвергается значительной утяжке. Толщину средней части принимают равной 74 *мм*, что обеспечивает достаточное для прокатки минимальное обжатие в чистовом калибре 74 — 65 = 9 *мм*. При уширении 73 — 67 = 6 *мм* в месте минимального обжатия калибр не заполняется по всей ширине, благодаря чему уменьшаются заусенцы в местах максимального обжатия балочной части калибра.

На участках *I* и *V* (симметричном участку *I*) и *III* обжатие постоянно. Участок *II* прокатывают с нарастанием обжатия, участок *IV* — с убыванием.

Для определения среднего радиуса контактной поверхности найдем по участкам профиля расстояние от центра тяжести периметра контактной поверхности калибра до его горизонтальной оси (рис. 233):

$$A_I = A_V = \frac{2(16{,}25 \cdot 32{,}5) + 32{,}5 \cdot 67}{32{,}5 + 67 + 32{,}5} = 24{,}1 \text{ мм};$$

$$A_{III} = \frac{2(4 \cdot 35) + 2(18{,}25 \cdot 28) + 2(32{,}5 \cdot 11) + 2(18{,}25 \cdot 28) + 4 \cdot 38}{35 + 28 + 11 + 28 + 38 + 28 + 11 + 28 + 35} = 13{,}2 \text{ мм}.$$

Длина заусенца, по опытным данным, равна 38 *мм*.

$$A_{II} = A_{IV} = \frac{A_I + A_{III}}{2} = 18{,}6 \text{ мм}.$$

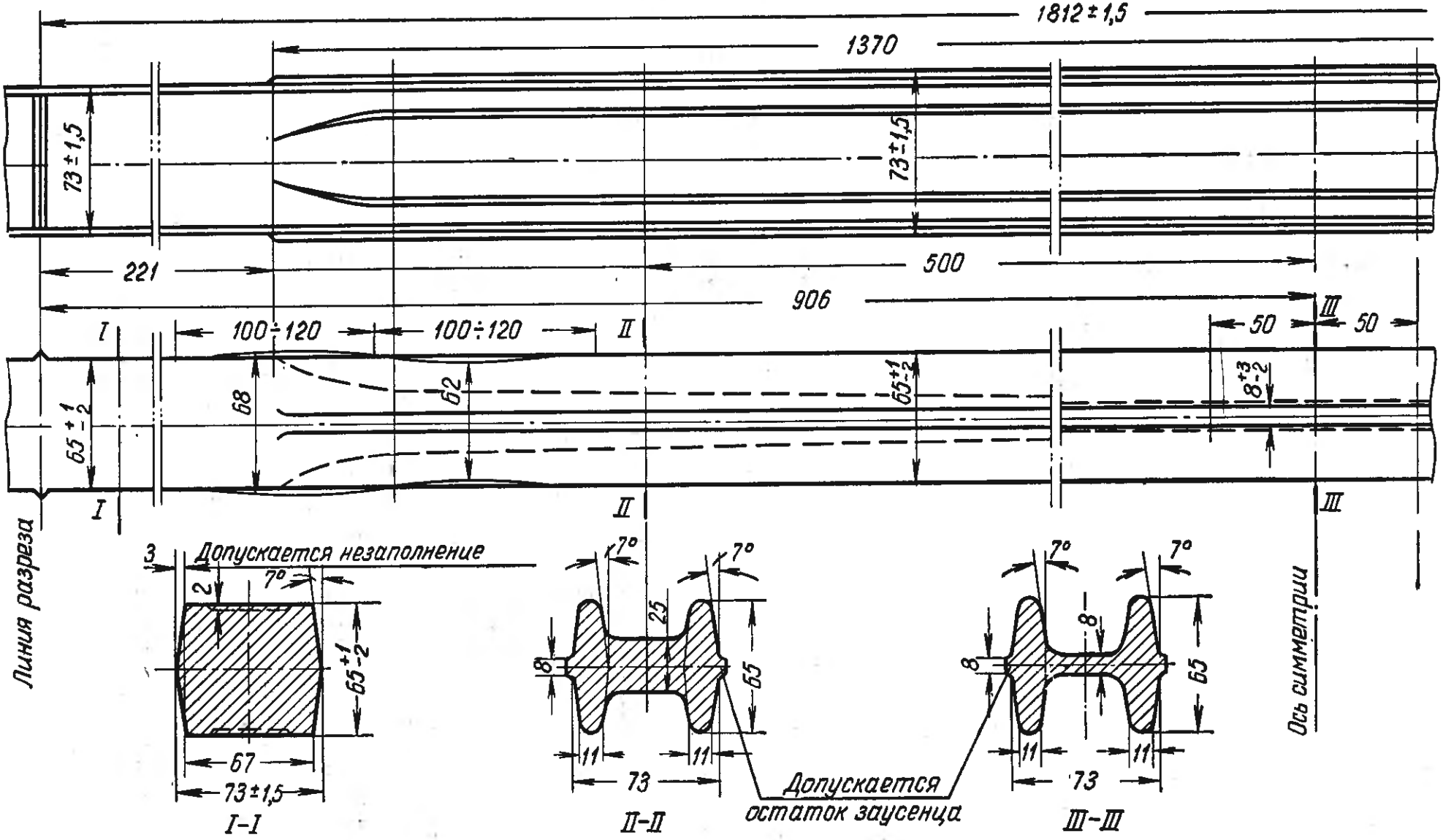



Рис. 232. Ось прицепа «Ирбит»

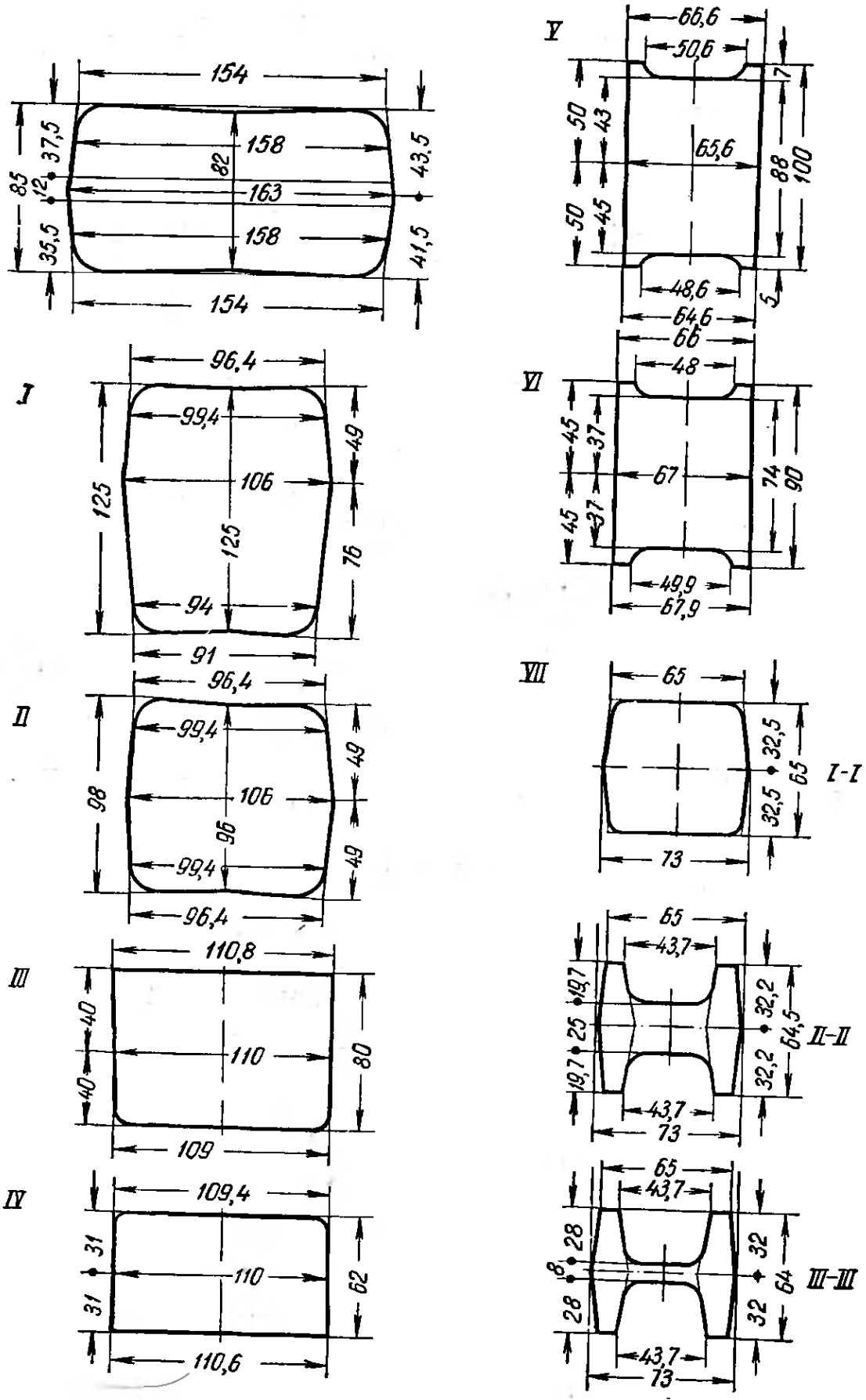



Рис. 233. Сечения металла в калибрах при прокатке оси прицепа «Ирбит»

С учетом длины участков профиля имеем

$$A_{ср} = \frac{2 \cdot 24{,}1 \cdot 221 + 2 \cdot 18{,}6 \cdot 635 + 13{,}2 \cdot 100}{2 \cdot 221 + 2 \cdot 635 + 100} = 20 \text{ мм}.$$

Для ориентировочного определения радиуса валка примем опережение 3% и коэффициент линейного теплового расширения металла равным 1,0012. Тогда

$$R = \frac{L}{2\pi} + A_{ср} = \frac{1{,}03 \cdot 1{,}0012\,(2 \cdot 221 + 2 \cdot 635 + 100)}{2 \cdot 3{,}14} + 20 = 300 \text{ мм}.$$

Радиусы контактной поверхности участков:

$$R_I = R_V = 300 - 24{,}1 = 275{,}9 \text{ мм}; \quad R_{II} = R_{IV} =$$
$$= 300 - 18{,}6 = 281{,}4 \text{ мм}; \quad R_{III} = 300 - 13{,}2 = 286{,}8 \text{ мм}.$$

Углы захвата на участках, определенные по формуле

$$\alpha = \arccos\left(1 - \frac{\Delta h}{D}\right),$$

равны

$$\alpha_I = \alpha_V = 15{,}5°; \quad \alpha_{III} = 25°.$$

Учитывая действие боковых стенок калибра и заусенцев в балочной части, в соответствии с практическими данными, угол захвата принимаем равным 25°.

Исходя из значений нейтрального угла и на основании экспериментальных данных с учетом направления прокатки каждого участка профиля принимаем [47, 48]:

$$S_I = S_V = 6{,}4\%; \quad S_{III} = 0{,}5\%; \quad S_{II} = 3\%; \quad S_{IV} = 1\%.$$

С учетом опережения длины участков валка равны:

$$l''_I = l''_V = 221{,}2\,(1 - 0{,}064) = 207 \text{ мм};$$
$$l''_{II} = 635{,}7\,(1 - 0{,}03) = 616{,}7 \text{ мм};$$
$$l''_{III} = 100{,}1\,(1 - 0{,}005) = 99{,}6 \text{ мм};$$
$$l''_{IV} = 635{,}7\,(1 - 0{,}01) = 629{,}4 \text{ мм}.$$

Здесь длины участков полосы взяты с учетом коэффициента теплового расширения

$$L' = \sum_{I}^{V} l'' = 1759{,}7 \text{ мм}.$$

Окончательно радиус валка (от его центра до горизонтальной оси калибра) находим из выражения

$$\frac{A_I l_I}{R_I} + \frac{A_{II} l_{II}}{R_{II}} + \cdots + \frac{A_n l_n}{R_n} = 2\pi R - L'.$$

Подставляя численные значения, имеем

$$123{,}5 = 2\pi R - 1759{,}7,$$

откуда

$$R = 299{,}96 \text{ мм}.$$

Принимаем

$$R = 300 \text{ мм}.$$

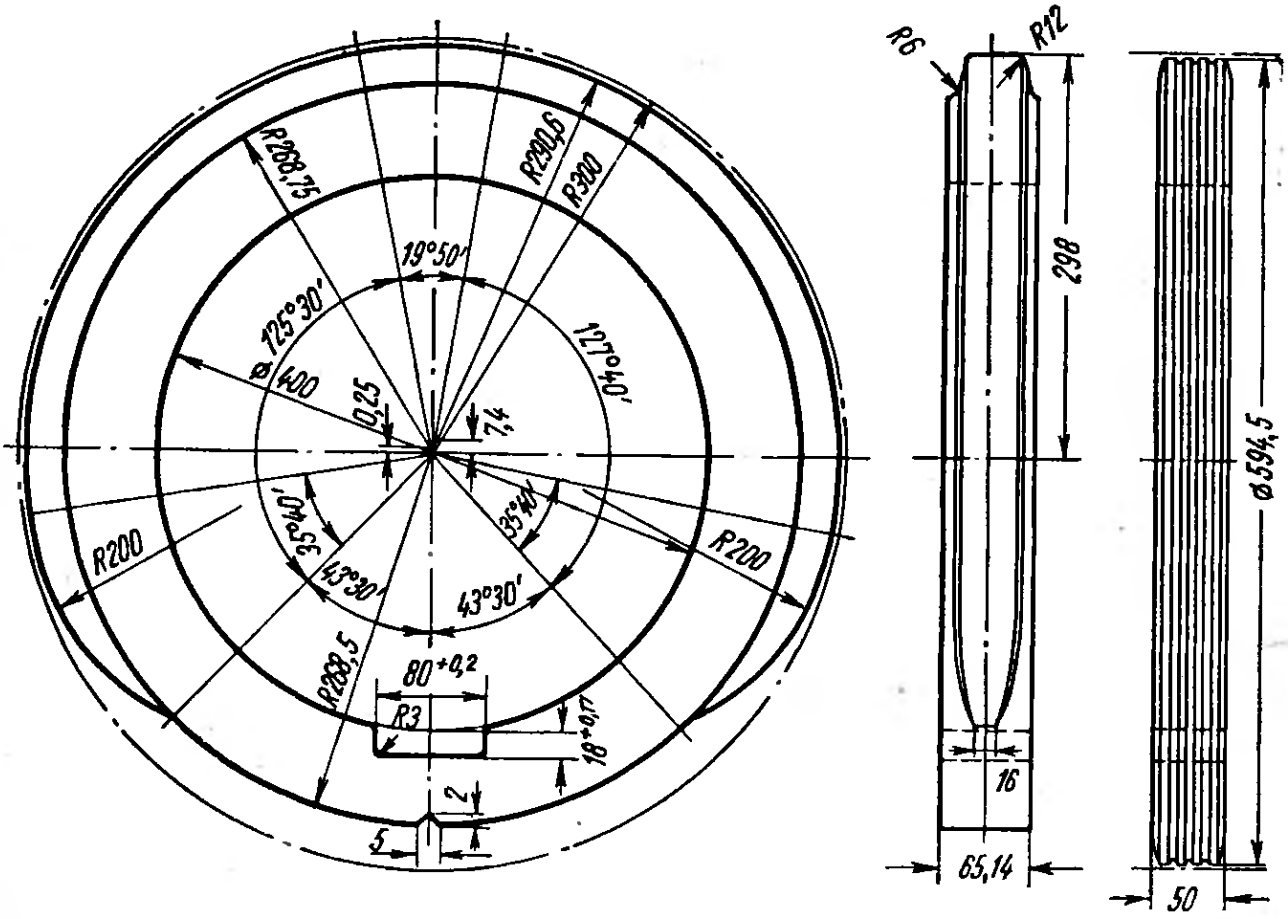



Рис. 234. Валок для прокатки оси прицепа «Ирбит»

Центральные углы, соответствующие участкам валка, рассчитываем по формуле

$$\alpha = 57{,}3\frac{l}{R - A};$$

$$\alpha_{\text{I}} = \alpha_{\text{V}} = 43^\circ\,30'; \quad \alpha_{\text{II}} = 125^\circ\,30';$$
$$\alpha_{\text{III}} = 19^\circ\,50'; \quad \alpha_{\text{IV}} = 127^\circ\,40'.$$

Радиусы по дну калибра с учетом переменной упругой деформации клети $\delta$ (вследствие изменения давления металла на валки) определяем для участков по формуле

$$R_{\text{д}} = \left(R - \frac{h}{2}\right) + \delta,$$

где $h$ — высота калибра на участке.

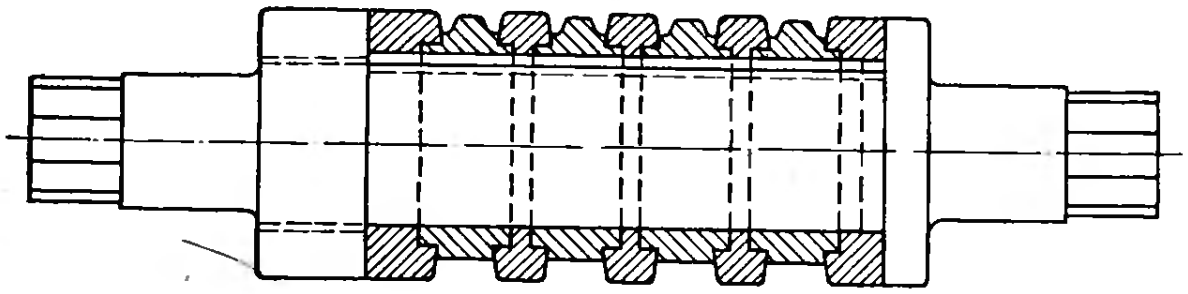


Рис. 235. Составной валок для периодической прокатки

По данным расчета построили профиль валка для прокатки оси прицепа «Ирбит» (рис. 234). Валки целесообразно делать составными с дублированными ручьями, как это схематически показано на рис. 235. Для уменьшения заусенцев бурты в зазоре валков делают в виде лабиринтового уплотнения.

# ЛИТЕРАТУРА


1. Чекмарев А. П., Нефедов А. А., Николаев В. А. Теория продольной прокатки. Изд-во «Металлургия», 1965.
2. Бахтинов Б. П., Штернов М. М. Калибровка прокатных валков, Металлургиздат, 1953.
3. Полухин П. И., Федосов Н. М., Королев А. А., Матвеев Ю. М. Прокатное производство. Изд-во «Металлургия», 1968.
4. Целиков А. И. Основы теории прокатки. Изд-во «Металлургия», 1965.
5. Мутьев М. С. Калибровка черновых валков. Изд-во «Металлургия», 1964.
6. Мерекин Б. В. Некоторые вопросы калибровки прокатных валков. Изд-во «Металлургия», 1964.
7. Литовченко Н. В., Диомидов Б. Б., Курдюмова В. А. Калибровка валков сортовых станов. Металлургиздат, 1963.
8. Смирнов В. С., Григорьев А. К., Давильбеков Н. Х. Деформация металла в ромбических и овальных калибрах. Изд-во «Металлургия», 1967.
9. Прокатное производство. Справочник, т. 1 и 2. Металлургиздат, 1962.
10. Вусатовский З. Основы прокатки. Изд-во «Металлургия», 1966.
11. Старченко Д. И. Развернутая калибровка фасонных профилей. Металлургиздат, 1952.
12. Хофф Х., Даль Т. Прокатка и калибровка. Металлургиздат, 1957.
13. Тарновский И. Я., Пальмов Е. В., Тягунов В. А., Макаев С. В., Котельников В. П., Андреюк Л. В. Прокатка на блюминге. Металлургиздат, 1963.
14. Чекмарев А. П., Павлов В. Л., Мелешко В. И., Токарев В. А. Теория прокатки крупных слитков. Изд-во «Металлургия», 1968.
15. Шулаев И. П. Прокатка на обжимных и заготовочных станах. Изд-во «Металлургия», 1964.
16. Гоpенштейн М. М., Погоржельский В. И. Совершенствование режимов обжатий на блюмингах СССР. Черметинформация, 1965, сер. 6, инф. 4.
17. Тягунов В. А. Режимы прокатки на реверсивных станах. Металлургиздат, 1954.
18. Логоватовский А. А. Нормирование процессов на блюмингах. Изд-во «Металлургия», 1966.
19. Литовченко Н. В., Диомидов Б. Б. Повышение производительности прокатных станов. Металлургиздат, 1958.

20. Диомидов Б. Б., Литовченко Н. В. Резервы прокатного производства. Изд-во «Металлургия», 1964.
21. Росс Е. Бейнон. Калибровка валков и расположение прокатных станов. Металлургиздат. 1960.
22. Зарощинский М. Л. Технологические осиовы проектироваиия прокатных станов. Металлургиздат, 1962.
23. Сб. «Передовой опыт работы обжимного цеха Кузиецкого металлургического комбината (ВНИИО ЧМ). Изд-во «Металлургия», 1965.
24. Кухарский С. В сб. «Калибровка прокатных валков» (материалы международного съезда по калибровке прокатных валков). Изд-во «Металлургия», 1965, с. 57.
25. Виноградов А. П., Виноградов Г. А. Калибровка прокатных валков. Металлургиздат, 1950.
26. Чекмарев А. П., Гречко В. П., Гетмаиец В. В., Ховрин Б. В., Прокатка на мелкосортных станах. Изд-во «Металлургия», 1967.
27. Победин И. С., Дрозд В. Г. Производство сортовой стали. Металлургиздат, 1962.
28. Галатов Н. С., Гетманец В. В., Ващило П. А., Штефан П. Т., Зубанов Н. П., Гречко В. П. Пути повышения производительности современных мелкосортных станов. Изд. Института техиической информации, Киев, 1966.
29. Литовченко Н. В., Гречко В. П., Кулешов М. М. Опыт работы непрерывных проволочных и мелкосортных станов. ЦИИН ЧМ, 1962.
30. Тришевский И. С., Клепанда В. В., Литовченко Н. В. Настройка иепрерывиых прокатных станов. Изд-во «Металлургия», 1964.
31. Гетманец В. В., Сацкий В. А., Альмен И. А., Шапиро М. М. Эксплуатация иепрерывных мелкосортных стаиов. Изд-во «Металлургия», 1965.
32. Ассер Я. Е. Шапиро М. М., Шейиман Э. Л. Настройка иепрерывных проволочных и мелкосортных станов. Изд-во «Металлургия», 1966.
33. Нефедов А. А., Гетманец В. В. Производство катанки. Металлургиздат, 1963.
34. Чижиков Ю. М. Процессы обработки металлов давлением легированных сталей и сплавов. Изд-во «Металлургия», 1965.
35. Протасов А. П., Зуев П. П. Калибровка валков для прокатки быстрорежущей стали. Металлургиздат, 1956.
36. Гинцбург Я. С., Андрацкий К. К. Прокатка качествеииой стали. Металлургиздат, 1953.
37. Чекмарев А. П., Машковцев Р. А. Носенко О. П., Нозадзе А. Д., Рамишвили Ш. Д. Производство трубиой заготовки. Изд-во «Металлургия», 1970.
38. Штернов М. М. Калибровка угловой стали. Металлургиздат, 1961.
39. Смирнов В. С., Богоявленский К. Н., Павлов Н. Н. Калибровка прокатиых валков. Металлургиздат, 1953.
40. Чекмарев А. П., Гуиин И. В., Машковцев Р. А., Филиппов И. Н. Производство облегченных профилей проката. Изд-во «Металлургия», 1965.
41. Макеев С. В., Винокуров И. Я., Мерекин Б. В., Фейгин Г. Д., Скрябин Н. П., Рябоконь Н. К. Производство облегчеиных профилей. Металлургиздат, 1962.
42. Полухин П. И. Прокатка и калибровка двутавровых балок. Металлургиздат, 1956.

43. Чекмарев А. П., Машковцев Р. А. Изиос прокатных валков. Металлургиздат, 1955.
44. Полухин П. И., Грдина Ю. В., Зарвин Е. Я. Прокатка и термическая обработка рельсов. Металлургиздат, 1963.
45. Илюкович Б. М. Прокатка тавровых профилей в открытых калибрах. Металлургиздат, 1961.
46. Филиппов С. Н. Продольная прокатка периодических профилей. Металлургиздат, 1956.
47. Тариовский И. Я., Смирнов В. К., Коцарь С. Л. Продольная прокатка профилей переменного сечения. Металлургиздат, 1962.
48. Чекмарев А. П. Прокатка экономичных профилей, Гостехиздат УССР, 1963.