

И. М. КОЧЕТОВ



**КАЛИБРОВКА ВАЛКОВ  
С ПРИМЕНЕНИЕМ СИСТЕМ  
РАЗВЕРНУТЫХ КАЛИБРОВ**

И. М. КОЧЕТОВ

14/VI-72  
статья

**КАЛИБРОВКА ВАЛКОВ  
С ПРИМЕНЕНИЕМ СИСТЕМ  
РАЗВЕРНУТЫХ КАЛИБРОВ**



**ИЗДАТЕЛЬСТВО «МЕТАЛЛУРГИЯ»**

МОСКВА 1971

**Калибровка валков с применением систем развернутых калибров.** Кочетов И. М. Изд-во «Металлургия», 1971, 112 с.

Проведен анализ существующих методов калибровки профилей, прокатываемых в развернутых калибрах. Рассмотрено формоизменение металла в развернутых калибрах и изложены основы калибровки в них. На основании экспериментальных и теоретических исследований разработан метод калибровки некоторых профилей с применением систем развернутых калибров.

Книга предназначена для инженерно-технических работников прокатных цехов, научно-исследовательских и проектных институтов. Может быть полезна студентам, специализирующимся по сортовой прокатке. Илл. 38. Табл. 6. Библ. 13 назв.

3-12-3

## ВВЕДЕНИЕ

Увеличение производства металла является одной из важнейших народнохозяйственных задач. Директивами XXIV съезда КПСС по пятилетнему плану развития народного хозяйства СССР на 1971—1975 годы предусматривается довести в 1975 г. производство готового проката до 101—105 млн. тонн. Увеличить выпуск экономичных видов проката, в первую очередь листового проката, холоднокатаного листа, гнутых и фасонных профилей, профилей высокой точности, проката из высококачественной и легированной стали, труб и метизов. Поднятие общего уровня производства, расширение объема сортамента и повышение качества товарной продукции металлургических заводов может быть достигнуто путем ввода в действие новых мощностей, усовершенствования производственных процессов, внедрения автоматизации и механизации, создания и освоения новых технологических процессов.

Вопросы, связанные с калибровкой валков, в частности с применением систем развернутых калибров, имеют актуальное значение для теории и практики прокатного производства. В системе развернутых калибров прокатывается значительная часть сортамента профилей: угловая и зетовая сталь, швеллеры, автоободы, специальные профили. Существует ряд методов калибровки профилей, прокатываемых в развернутых калибрах. Эти методы могут быть объединены в три группы:

1) расчет серии калибров по горизонтальным проекциям и регламентированным углам раскрытия полок; 2) расчет калибров по средней линии и углам раскрытия полок пропорционально обжатиям; 3) расчет калибров по методу соответственной полосы. Наиболее распространенным на практике является метод расчета развернутых калибров по средней линии, который наиболее полно отражает характер формоизменения металла при прокатке.

Производственный опыт и проведенные исследования показывают, что основным в разработке калибровки профиля с применением систем развернутых калибров являются расчеты уширения средних линий и соотношения коэффициентов высотных деформаций в элементах калибра. Уширение средних линий в развернутых калибрах не может быть отождествлено с уширением полосы, прокатанной на гладкой бочке, и рассчитано по обычным формулам.

В чистовом фасонном калибре (угловая и зетовая сталь, швеллеры и т. п.) величина уширения значительно превышает величину уширения при прокатке полосы на гладкой бочке. Уширение постепенно убывает, приближаясь к величине уширения на гладкой бочке в первых профильных калибрах. При деформации профиля в развернутом калибре наряду с обжатием имеют место поперечный изгиб и растяжение элементов профиля при одновременном воздействии разных скоростей прокатки на элементы профиля. Правильный расчет высотных деформаций обеспечивает нормальное заполнение углов профиля.

## Глава I

### ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ КАЛИБРОВКИ ВАЛКОВ, ПРОЕКТИРУЕМЫХ В РАЗВЕРНУТЫХ КАЛИБРАХ

#### Расчет калибровки угловой стали по горизонтальным проекциям

Расчеты калибровки угловой стали разработаны Н. Мецом, Б. П. Бахтиновым, Д. И. Старченко и др. Каждый способ имеет свои особенности, однако, за исключением расчета в чистовом калибре, вся серия калибров рассчитывается по горизонтальным проекциям, т. е. горизонтальная проекция последующего по ходу прокатки калибра увеличивается на величину уширения. Связь между высотой калибра и шириной отсутствует.

#### Метод Меца

Построение калибровки (рис. 1) начинается с развертки чистового профиля. Ширина предчистового калибра получается в результате развертки верхней линии очертания чистового профиля минус уширение в чистовом калибре. За уширение в чистовом калибре

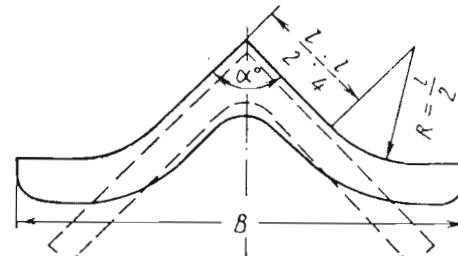


Рис. 1. Построение развернутого калибра  
угловой стали по методу Меца и Старченко

принимается уширение полосы при прокатке на гладкой бочке, увеличенное на 20—30%. Ширину остальных калибров определяют по найденной величине горизонтальной проекции предчистового калибра, уменьшая ее для других калибров на величину впуска (уширения), т. е. на 2—10 мм, учитывая, что уменьшение должно быть больше для первых по ходу прокатки калибров.

Углы раскрытия полок для калибров I, II, III против хода прокатки приняты по  $90^\circ$ , для первого профильного калибра  $145—126^\circ$ , для остальных калибров разность между углами распределяется равномерно. Другие элементы построения калибров видны на рис. 1. Н. Мец провел исследование течения металла в развернутых калибрах угловой стали, в котором было установлено увеличение уширения в местахгиба профиля (увеличение шага нарезки винта с наружной стороны профиля в месте выгиба полок). Исходя из этого, Мец рекомендует увеличивать в чистовом калибре уширение на 20—30% против уширения полосы, получаемой при прокатке на гладкой бочке.

#### Метод Старченко

Как и по методу Меца (см. рис. 1), предчистовой калибр строится посредством развертки верхней линии очертания чистового профиля. Приводятся простые аналитические зависимости горизонтальной проекции калибра от угла раскрытия полок и длины полок:

$$B = b \left( \cos \alpha + \frac{\sin \alpha}{\alpha} \right),$$

где  $B$  — горизонтальная проекция калибра;  
 $b$  — длина полки готового профиля;  
 $\alpha$  — угол между горизонталью и верхней линией очертания калибра.

Уширение определяется по формуле Бахтинова [3]. Углы раскрытия полок регламентированы и приняты по ходу прокатки: в калибре I— $140^\circ$ , II— $116^\circ$ , III— $100^\circ$ , IV— $90^\circ$ , V— $90^\circ$ .

Ширина каждого последующего против хода прокатки калибра уменьшается на величину

$$\Delta b = 0,05H,$$

где  $\Delta b$  — уширение;  
 $H$  — высота задаваемого в калибр раската.

Рекомендуется прокатывать из одного предчистового калибра до четырех профилей угловой стали разной толщины, при этом расчет ведется, исходя из среднеарифметической толщины готового профиля. Д. И. Старченко особо подчеркивает, что среди части специалистов по вопросам калибровки существует переоценка значения степени точности определения величины возможного естественного уширения при прокатке. Он считает, что величина уширения может быть значительно ограничена. Д. И. Старченко является сторонником применения увеличенных обжатий и сокращения числа пропусков при прокатке профилей в развернутых калибрах.

#### Метод Бахтинова

В отличие от приведенных ранее методов, предчистовой калибр для угловой стали по этому методу образуется посредством развертки средней линии чистового

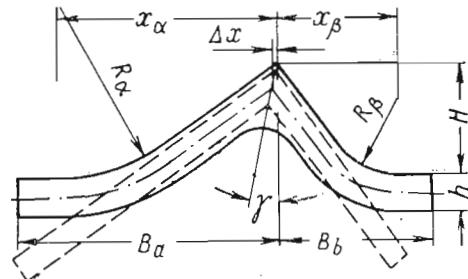


Рис. 2. Построение развернутого калибра угловой стали по методу Бахтинова

калибра (рис. 2) [3]. Радиус развертки внешней линии очертания полки и высота калибра выбираются в зависимости от длины полок. При прокатке в закрытых калибрах высота калибра составляет

$$H = (0,35 \div 0,45) \frac{l_a + l_b}{2},$$

радиус развертки большой и малой полок соответственно

$$R_a = (0,5 \div 1,0) l_a; R_b = (0,5 \div 1,0) l_b.$$

При прокатке в открытых калибрах

$$H = (0,25 \div 0,35) \frac{l_a + l_b}{2},$$

где  $l_a, l_b$  — соответственно длины большой и малой полок.

Высота калибра, угол раскрытия полок и толщина полок связаны уравнениями:

для большой полки

$$\begin{aligned} B_a &= l_a - 0,5h(1 - 1,41 \sin \gamma) + \\ &+ (2R_a + h) \left( \frac{1 - \cos \alpha}{\sin \alpha} - 0,00872\alpha \right) - \\ &- [H + 0,5h(1 - 1,41 \cos \gamma)] \left( \frac{1 - \cos \alpha}{\sin \alpha} \right); \end{aligned}$$

для малой полки

$$\begin{aligned} B_b &= l_b - 0,5h(1 - 1,41 \sin \gamma) + \\ &+ (2R_b + h) \left( \frac{1 - \cos \beta}{\sin \beta} - 0,00872\beta \right) - \\ &- [H + 0,5h(1 - 1,41 \cos \alpha)] \left( \frac{1 - \cos \beta}{\sin \beta} \right), \end{aligned}$$

где  $B_a, B_b$  — горизонтальные проекции соответственно большой и малой полок;

$\gamma$  — угол наклона биссектрисы к вертикали;

$\alpha, \beta$  — углы наклона соответственно большой и малой полок к вертикали;

$h$  — толщина полок;

$R_a, R_b$  — радиусы развертывания соответственно большой и малой полок.

Уширение в калибрах рассчитывается по формуле

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

где  $\Delta b$  — уширение в калибре;

$\Delta h$  — обжатие полосы;

$R$  — катающий радиус валка;

$H$  — высота задаваемой в калибр полосы;

$f$  — коэффициент трения.

Ширина калибра уменьшается против хода прокатки на величину уширения. Уширение для всех калибров рассчитывается так же, как и для прокатки полосы на гладкой бочке. В развернутых калибрах не учитывается, однако, увеличение уширения. Для закрытых калибров уширение, рассчитанное по формуле (1), ограничивается на 30—70 %. Высота калибра убывает от калибра к калибуру на величину половины обжатия полок. Радиус перегиба полок:

для закрытых калибров

$$r' = r\eta + 1,2\Delta h;$$

для открытых калибров

$$r' = r\eta + 2,4\Delta h,$$

где  $r'$  — искомый радиус перегиба полок;

$r$  — радиус перегиба полок в предшествующем калибре;

$\Delta h$  — обжатие полок;

$\eta$  — коэффициент высотной деформации полок.

В методах Старченко и Бахтинова в основу расчета серии калибров берут горизонтальную проекцию без связи с другими параметрами калибра (исключая чистовой). Подобный подход к расчету не дает правильно го заполнения промежуточных калибров, что может привести к переполнению калибров, образованию закатов и значительной выработке валков по ширине ручья или к незаполнению калибров по ширине и получению вторых сортов и брака.

Ни в одном из методов не учитывается влияние изгиба и разности скоростей в элементах калибра на увеличение уширения в калибрах угловой стали, т. е. уширение, получающееся в развернутых калибрах, отождествляется с уширением полосы, прокатанной на гладкой бочке.

В методе Старченко не учитывается связь толщины полок с их шириной, схема развертывания калибров для неравнобокой угловой стали не совсем удачная. Обычно нормальным считается прокат двух размеров угловой

стали по толщине из одного предчистового калибра, прокатка же третьей толщины затруднительна из-за получения готового профиля на пределе по ширине полок. По этому же методу рекомендуется прокатывать до четырех толщин угловой стали из одного предчистового калибра.

В методе Бахтинова введено понятие «смещение вершины угла»  $\Delta x$ , (см. рис. 2), используемое при распределении уширения между малой и большой полками неравнобокой угловой стали. Теоретическими расчетами и исследованиями установлено, что величина уширения для неравнобокой угловой стали должна распределяться пропорционально длинам полок.

### Расчет калибровки угловой стали по методу соответственной полосы

Отношение  $b/h$  (рис. 3) принимается за отношение сторон равновеликого прямоугольника соответственной полосы [4]. Деформация полосы в калибре (уширение, обжатие) рассчитывается по соответственной полосе,

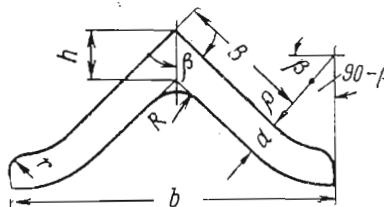


Рис. 3. Построение развернутого калибра угловой стали по методу соответственной полосы

после чего пересчитывается на искомый профиль калибра.

Из рис. 3 следует, что

$$h = \frac{d}{\sin \beta}; \quad b = 2B \sin \beta + 2\rho \cos \beta.$$

Тогда

$$\frac{b}{h} = \frac{2B \sin^2 \beta - 2\rho \sin \beta \cos \beta}{d},$$

где  $b/h$  — отношение характеристических размеров.

Для всех калибров  $B=\rho$ ;  $\rho = \frac{l}{2} \div l$ .

По специальной номограмме определяется отношение  $B/d$ . Площадь калибра определяется по формуле

$$F = 2d \left( B - \frac{h}{2} \cos \beta \right) + 2 [0,5 (\rho + d)^2 - 0,5 \rho^2].$$

Отношения  $R/d$  и  $r/d$  для всех калибров постоянны. Показатель уширения соответственной полосы определяется по формуле

$$\left[ \frac{\Delta b}{\Delta h} \right] = k_1 \left( \frac{\Delta b}{\Delta h} \right),$$

где для угловой стали  $k_1 = 0,425$ .

Применение метода соответственной полосы для калибровки угловой стали является недостаточно обоснованным и не отражает сложный характер деформации металла в развернутых калибрах угловой стали (изгиб профиля, скоростной режим, распределение величины уширения по полкам и др.). В этой методике отсутствует связь между высотой, шириной, толщиной и углами раскрытия полок профиля.

Конструкция чистового калибра и характер развертки неравнобоких подготовительных калибров не применяются в практике калибровки.

### Расчет калибровки угловой стали по средней линии

#### Метод Штернова

Этот метод основан на аналитическом определении средней линии полок в каждом калибре.

Для каждого прохода принимаются следующие коэффициенты высотной деформации [5]:

Калибр	Профили больших размеров	Профили средних и мелких размеров
Чистовой :	1,07—1,12	1,1—1,2
Черновой :	1,6—1,8	1,8—2,2

*Определение размеров предчистового калибра.* Для равнобокой угловой стали (рис. 4)

$$H = (0,4 \div 0,5)l; \quad R = (0,8 \div 0,95)l,$$

где  $l$  — длина средней линии полки.

Для неравнобокой угловой стали (см. рис. 4):

$$H = (0,4 \div 0,45) \frac{l_\alpha + l_\beta}{2}; \quad R_\alpha = (1,0 \div 1,1) l_\alpha; \\ \beta_\beta = (0,7 \div 0,8) l_\beta;$$

$$C_\alpha = \frac{H_2}{\tan \alpha}; \quad C_\beta = \frac{H_2}{\tan \beta}; \quad \tan \alpha = \frac{l_\beta}{l_\alpha}; \quad \tan \beta = \frac{l_\alpha}{l_\beta},$$

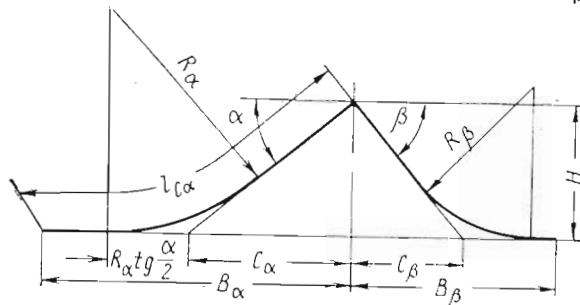


Рис. 4. Схема к определению проекции длины средней линии полок калибра угловой стали [5]

где  $l_\alpha, l_\beta$  — длина средней линии соответственно большой и малой полок чистового калибра;  
 $R_\alpha, R_\beta$  — радиусы развертывания средней линии соответственно большой и малой полок;  
 $H_2$  — высота предчистового калибра.

Высота  $H$  и углы раскрытия полок  $\alpha$  и  $\beta$  убывают пропорционально принятым обжатиям в калибрах. Уширение средней линии профиля определяется по формуле (1) с введением в нее коэффициента  $k$ , учитывающего влияние наклона полок на уширение:

$$\Delta l_{cp} = k \Delta b, \quad (2a)$$

где  $\Delta l_{cp}$  — уширение средней линии полок.  
Коэффициент  $k$  определяется согласно рис. 5.

Для калибров неравнобокой угловой стали общее уширение, найденное по формуле (2a), распределяется пропорционально длине полок, при этом применяется ограничение уширения на 35—50%.

Для равнобокой угловой стали горизонтальная проекция полок

$$B = l - C (\sqrt{1 + \tan^2 \alpha} - 1) + R \left( 2 \tan \frac{\alpha}{2} - 0,0175 \alpha \right).$$

Для неравнобокой угловой стали горизонтальная проекция большой и малой полок определяется соответственно как:

$$B_\alpha = l_\alpha - C_\alpha (\sqrt{1 + \tan^2 \alpha} - 1) + \\ + R_\alpha \left( 2 \tan \frac{\alpha}{2} - 0,01745 \alpha \right);$$

$$B_\beta = l_\beta - C_\beta (\sqrt{1 + \tan^2 \beta} - 1) + \\ + R_\beta \left( 2 \tan \frac{\beta}{2} - 0,01745 \beta \right).$$

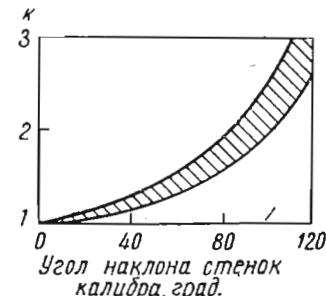


Рис. 5. Зависимость коэффициента, учитывающего увеличение уширения от наклона стенок калибра [5]

Радиусы перегиба полок находятся по формуле

$$r' = r \eta + \Delta h.$$

В калибрах, имеющих разъем сверху, радиусы закруглений на концах полок рассчитываются по формуле Бахтинова:

$$r' = r + \Delta h.$$

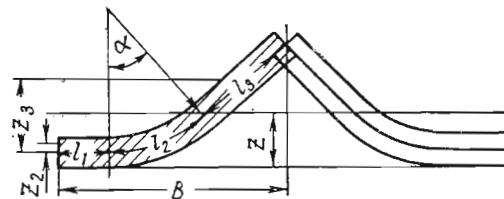


Рис. 6. Схема для аналитического определения положения центра тяжести калибра угловой стали [5]

В калибрах, имеющих разъем снизу,

$$r'' \geq \Delta h.$$

Здесь  $r$  — радиус закругления в предшествующем калибре;  $\Delta h$  — обжатие полок.

Ордината центра тяжести шаблона калибра определяется из выражения (рис. 6)

$$z = \frac{l_2 z_2 + l_3 z_3}{l_{cp}}.$$

### Метод Чекмарева

По этому методу рекомендуется интенсивный режим прокатки. Для средних размеров угловой стали коэффициент высотной деформации  $\eta$  для калибров I—V соответственно равен 1,3; 1,6; 1,8; 1,8; 1,8. Расчет калибров ведут по средней линии. Уширение определяют по формуле Чекмарева [6]

$$\Delta b = \frac{2b_{cp} \Delta h k}{(H+h) \left[ 1 + (1+d) \left( \frac{b_{cp}}{R_\alpha} \right)^n \right]},$$

где  $n$  — показатель степени.

При  $n=1$   $b_{cp} < R_\alpha$  — узкий очаг деформации, при  $n=2$   $b_{cp} > R_\alpha$  — широкий очаг деформации.

Коэффициенты  $k$ , учитывающие влияние наклона стенок калибра на уширение, рекомендуются такие:

Проход I . . . . .	0,7—1,0
Промежуточные проходы . . . . .	1,0—1,5
Чистовой проход . . . . .	1,8—2,0

Величина уширения распределяется пропорционально длине полок.

### Расчет элементов калибра

Углы сгиба (углы между полками) связаны между собой следующим уравнением:

$$\varphi_x = \varphi_{x-1} - 90 \frac{\Delta h_x}{\Delta h_\Sigma},$$

$\Delta h_\Sigma$  — общее обжатие во всех калибрах, кроме первого и последнего;

$\Delta h_x$  — обжатие в любом промежуточном калибре;

$\varphi_x$  и  $\varphi_{x-1}$  — углы сгиба в двух смежных промежуточных калибрах.

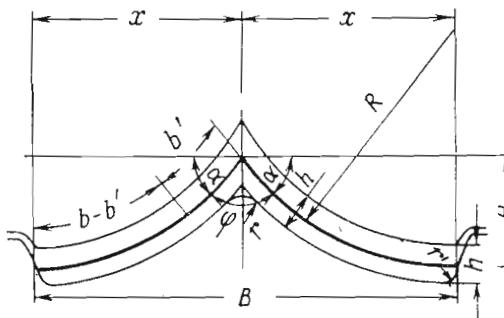


Рис. 7. Схема Чекмарева для построения и расчета развернутого калибра угловой стали

Между размерами калибра (рис. 7) существуют следующие зависимости:

$$\alpha = 90 - 0,5\varphi, \quad R = \frac{b - b'}{\alpha} = \frac{x}{\sin \alpha} - \frac{b'}{\tan \alpha},$$

$$x = b' \cos \alpha + R \sin \alpha = H \left( \frac{1}{\sin \alpha} + \frac{1}{\tan \alpha} \right) - b',$$

$$H = b' \sin \alpha + R(1 - \cos \alpha),$$

$$B = 2b' \cos \alpha + 2 \frac{(b - b') \sin \alpha}{\alpha},$$

$$b' = \frac{b \frac{\sin \alpha}{\alpha} - \frac{B}{2}}{\frac{\sin \alpha}{\alpha} - \cos \alpha}.$$

Закругления угла калибра с внутренней стороны

$$r_{x-1} = r_x \eta_{x-1},$$

где  $\eta_{x-1}$  — коэффициент обжатия;

$r_x$ ,  $r_{x-1}$  — радиусы в двух смежных промежуточных калибрах.

Для нижнего края полки радиус закругления

$$r'_x = r'_{x+1} + \Delta h_{x+1}, \text{ или } r'_x = 0,5h_x,$$

где  $r'_x, r'_{x+1}$  — радиус закругления с нижней стороны в двух смежных промежуточных калибрах;

$h_x$  — толщина полок в  $x$ -ом калибре;

$\Delta h_{x+1}$  — обжатие полок в  $(x+1)$ -ом калибре.

Для верхнего края полки радиус закругления

$$r''_x \approx \Delta h_{x+1}, \text{ или } r''_x \approx 0,35h_x,$$

где  $r'_x$  — радиус закругления верхнего края полки в  $x$ -ом калибре;

$\Delta h_{x+1}$  — обжатие полок в  $(x+1)$ -ом калибре.

Нейтральная линия калибра совмещается с линией, делящей площадь калибра пополам. Этим обеспечивается равенство катающих радиусов верхнего и нижнего валков.

### Метод Кучко

Калибровку равнобокой угловой стали производят с учетом задачи квадратной заготовки в первый профильный калибр на ребро (одна из диагоналей заготовки устанавливается вертикально). Расчет калибров осуществляется по средней линии [7].

Уширение каждой полки в калибрах для неровнобокой угловой стали рассчитывается по формуле

$$\Delta b = 0,2\Delta h. \quad (2)$$

В калибрах неровнобокой угловой стали уширение для большой полки:

$$\Delta b = 0,2\Delta h \frac{l_a}{l_b}, \quad (3)$$

для малой полки:

$$\Delta b = 0,2\Delta h \frac{l_b}{l_a}. \quad (4)$$

Здесь  $\Delta b$  — уширение полки;

$\Delta h$  — обжатие полки;

$l_a, l_b$  — соответственно длины большой и малой полок в чистовом калибре.

Для равнобокой угловой стали при прокатке заготовки на ребро угол раскрытия полок во всех калибрах принят  $90^\circ$ . Для неравнобокой угловой стали углы раскрытия полок изменяются от  $90$  до  $130^\circ$ .

Высота калибра  $H$  изменяется в соответствии с изменением углов раскрытия полок.

### Метод Литовченко

Этот метод основан на аналитическом определении длины средней линии полок в каждом калибре (рис. 8) [8].

Рекомендуется принимать угол  $\beta$  в пределах от  $30$  до  $45^\circ$ . При  $\beta=30^\circ$  величина  $R_{cp} = (1,5-2,4) \frac{l_{cp}}{\pi}$ , а при  $\beta=45^\circ$  величина  $R_{cp} = (1,0 \div 1,6) \frac{l_{cp}}{\pi}$ .

Здесь  $R_{cp}$  — радиус развертывания средней линии полки;  $l_{cp}$  — длина средней линии чистового калибра.

Координата центров радиусов

$$x = l_{c,h} \sin \frac{\alpha}{2} + R_{cp} \cos \frac{\alpha}{2}.$$

Ширина калибра

$$B = 2 \left[ l_{c,h} \sin \frac{\alpha}{2} + R_{cp} \left( \cos \frac{\alpha}{2} - \sin \varphi \right) + l_r \right].$$

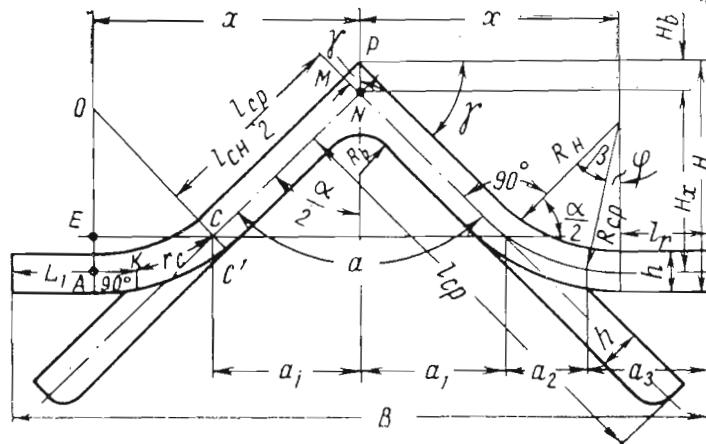


Рис. 8. Построение и основные элементы калибра равнобокой угловой стали по методу Литовченко

## Вертикальная проекция калибра

$$H = 0,5h \frac{1 + \sin \frac{\alpha}{2}}{\sin \frac{\alpha}{2}} + l_{c,h} \cos \frac{\alpha}{2} + R_{cp} \left( \cos \varphi - \sin \frac{\alpha}{2} \right).$$

Изменение углов раскрытия полок в калибрах

$$\alpha_n = 90 + \alpha_x(n-1),$$

где  $n$  — порядковый номер рассчитываемого калибра.

При  $n=7 \alpha_x = 8 \div 10^\circ$ ; при  $n>7 \alpha_x = 5^\circ$ .

Радиус внутреннего закругления угла при вершине

$$R_{b_n} = R_{b_{n-1}} \eta_{n-1},$$

где  $R_{b_n}$  — радиус внутреннего закругления угла при вершине в  $n$ -м калибре;

$R_{b_{n-1}}$  — тоже в  $(n-1)$ -м калибре;

$\eta_{n-1}$  — коэффициент высотной деформации полок в  $(n-1)$ -м калибре.

Уширение полок рассчитывают по формуле (1) с учетом влияния изгиба полок в чистовом и первом фасонном калибрах. В закрытых калибрах предусматривается стесненное уширение. Для неравнобокой угловой стали общее уширение распределяется пропорционально длинам полок. Угол наклона биссектрисы в вершине угла постоянен для всех калибров. Приращение углов раскрытия полок одинаково для малой и большой полок.

## Метод Мерекина

Этот метод основан на определении последовательно изменяющихся углов  $\alpha_x$ ,  $\varphi_x$  и  $\psi_x$  (рис. 9), образуемых конструктивными точками, радиусами очертания полок и длиной средних линий полок [9]. Размеры калибров на рис. 9 определены на основании соотношений:

$$l_{nb} = (0,15 \div 0,45) l_b; \quad R_a = (0,5 \div 0,75) l_a;$$

$$l_{na} = (0,15 \div 0,45) l_a; \quad R_b = (0,5 \div 0,75) l_b.$$

Здесь  $l_a$  и  $l_b$  — соответственно длины большой и малой полок в чистовом калибре.

Величины уширения полок для чистового и предчистового калибров определяются:  
для большой полки

$$\Delta b_a = [0,55\Delta h + 0,01(l_a + l_b)] \frac{l_a}{l_a + l_b};$$

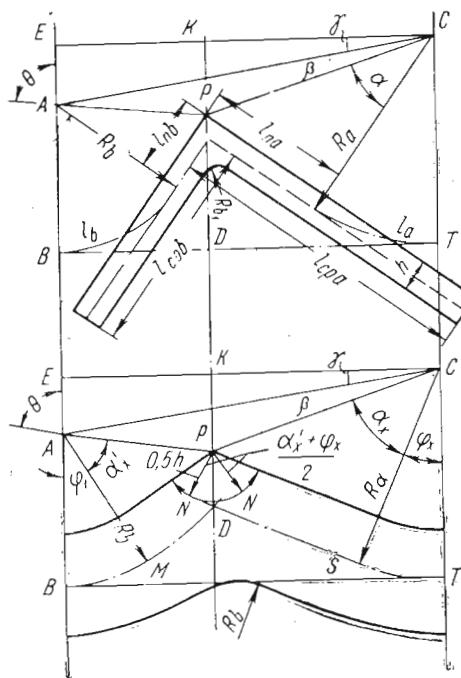


Рис. 9. Построение развернутых калибров угловой стали по методу Мерекина

для малой полки

$$\Delta b_b = [0,55\Delta h + 0,01(l_a + l_b)] \frac{l_b}{l_a + l_b}.$$

Для других калибров уширение определяют:  
для большой полки

$$\Delta b_a = 0,55\Delta h \frac{l_a}{l_a + l_b}; \quad (5)$$

для малой полки

$$\Delta b_b = 0,55 \Delta h \frac{l}{l_a + l_b}, \quad (6)$$

где  $\Delta b_a$ ,  $\Delta b_b$  — соответственно уширение большой и малой полок;

$l_a$ ,  $l_b$  — соответственно длина большой и малой полок в чистовом калибре;

$\Delta h$  — обжатие полки.

Длина средней линии полки в предчистовом калибре: для большой полки

$$l_{cp\ a_2} = l_{cp\ a_1} - [0,55 \Delta h_1 + 0,01 (l_a + l_b)] \frac{l_a}{l_a + l_b};$$

для малой полки

$$l_{cp\ b_2} = l_{cp\ b_1} - [0,55 \Delta h_1 + 0,01 (l_a + l_b)] \frac{l_b}{l_a + l_b},$$

где  $l_{cp\ a_1}$ ,  $l_{cp\ b_1}$  — соответственно длина средней линии большой и малой полок в чистовом калибре;

$l_{cp\ a_2}$ ,  $l_{cp\ b_2}$  — то же в предчистовом калибре;  
 $\Delta h_1$  — обжатие полки в чистовом калибре.

Длина средней линии полки для других калибров уменьшается на величину уширения, определяемого по формулам (5), (6).

Радиус внутреннего закругления в предчистовом калибре

$$R_{b_2} = \frac{\frac{h_2}{h_1} [(R_{b_1} - h_1) \sqrt{2} - R_{b_1}] \cos \frac{\psi\varphi}{2} - h_2}{1 - \cos \frac{\psi\varphi}{2}},$$

где  $R_{b_1}$  — радиус внутреннего закругления в чистовом калибре;

$R_{b_2}$  — то же в предчистовом калибре;

$h_1$ ,  $h_2$  — толщина полки соответственно в чистовом и предчистовом калибрах;

$\psi$ ,  $\varphi$  — углы согласно рис. 9.

Радиус внутреннего закругления для остальных калибров

$$R_{b_n} = R_{b_{n-1}} \eta_{b_{n-1}},$$

где  $R_{b_n}$  — радиус внутреннего закругления в  $n$ -ном калибре;

$R_{b_{n-1}}$  — радиус внутреннего закругления в  $(n-1)$ -ом калибре;

$\eta_{b_{n-1}}$  — коэффициент высотной деформации полки в  $(n-1)$ -ом калибре.

Во всех рассмотренных ранее методах расчета калибровок угловой стали не приводится соотношение высотных деформаций ( $\eta$ ) в вершине угла и полках профиля. Выполнение этого определенного соотношения необходимо для устойчивого получения вершины прямого угла на готовом профиле.

В методе Штернова увеличение уширения в развернутых калибрах для всех размеров угловой стали в зависимости от угла раскрытия полок учитывается специальным коэффициентом. Как будет показано далее, на основании исследований установлено, что этот коэффициент должен изменяться в зависимости от размера угловой стали и диаметра валков стана.

В методе Кучко уширение полки в калибрах определяется по формулам (2) — (4). Между тем нельзя применять для всех калибров один и тот же коэффициент уширения. В данной работе получено, что для чистового и предчистового калибров он значительно больше, чем для первых по ходу прокатки профильных калибров.

Следовательно, наиболее рациональными, проверенными на практике, являются методы расчета калибровок угловой стали, в основу которых положена длина средней линии профиля (методы Чекмарева, Кучко, Мерекина, Штернова, Литовченко). В этих методах учтено увеличенное уширение средней линии профиля; основные параметры калибра связаны аналитической зависимостью, а величина уширения в калибрах неравнобокой угловой стали распределяется пропорционально длинам полок. Методы расчета калибров угловой стали по горизонтальным проекциям надо считать устаревшими и утратившими применение вследствие несовершенства и значительных ошибок, которые приводят к известным трудностям при освоении прокатки профилей угловой стали.

## Расчет калибровки швеллера с применением развернутых калибров

### Метод Старченко

Развернутый метод построения калибров включает соединение двух развернутых калибров угловой стали в один швеллерный [2]. При этом чистовой и предчистовой калибры имеют особую конструкцию (рис. 10).

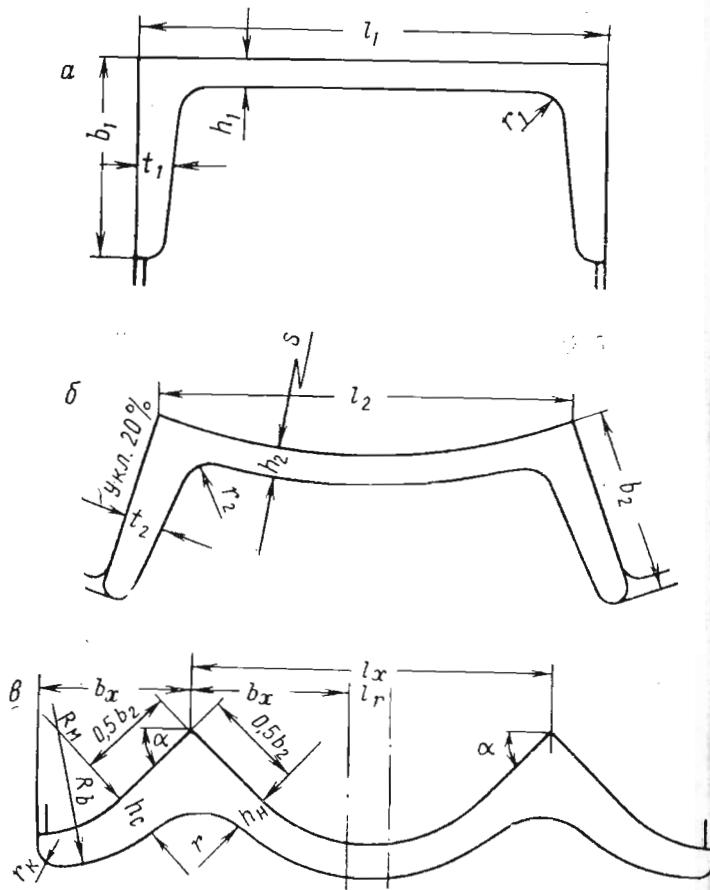


Рис. 10. Построение развернутых швеллерных калибров по методу Старченко

Обжатие  $\eta$  и вытяжку  $\lambda$  рассчитывают по формулам

$$\eta = \frac{H}{h}; \quad \lambda = \frac{F_n}{F_{n+1}}.$$

Калибр	$\eta$	$\lambda$
Чистовой . . . . .	1,05—1,3	1,05—1,25
Предчистовой . . . . .	1,10—1,50	1,10—1,40
Подготовительный . . . . .	1,20—2,0	1,10—1,80

Углы раскрытия полок постоянны и составляют для калибра III—45°, IV—40°, V—32°, VI—20°.

Размеры чистового калибра определяются по готовому профилю с учетом температурной усадки его при остывании (см. рис. 10, а).

#### Расчет предчистового калибра

Толщина полки предчистового калибра (см. рис. 10, б), определяется по формуле

$$t_2 = t_1 \eta_1,$$

где  $t_2$  — средняя толщина полки в предчистовом калибре;

$\eta_1$  — коэффициент высотной деформации в чистовом калибре.

Ширина полки в предчистовом калибре меньше, чем в чистовом на величину уширения, определяемого по формуле

$$\Delta b_1 = \frac{b_1 h_1}{D},$$

где  $\Delta b_1$  — уширение полки в чистовом калибре;

$b_1$  — ширина полки в чистовом калибре;

$h_1$  — толщина стенки в чистовом калибре;

$D$  — номинальный диаметр валков стана.

Размеры стенки предчистового калибра определяют подобно размерам полки. Коэффициенты высотной деформации в чистовом и предчистовом калибрах сохраняются одинаковыми по всем элементам профиля.

#### Расчет первого развернутого швеллерного калибра

Горизонтальная проекция и радиус развертки полки (см. рис. 10, в) соответственно составляют:

$$b_x = 0,5b_2 \left( \cos \alpha + \frac{\sin \alpha}{\alpha} \right), \quad R_m = \frac{0,5b_2}{\alpha};$$

горизонтальная проекция стенки

$$l_x = \cup l_2 - \Delta l_2.$$

При расчете последующих развернутых калибров  $l_x$  постоянно.

Горизонтальная проекция каждой полки убывает от калибра к калибуру на величину уширения. Расчет уширения производится по формуле (1). Коэффициенты обжатий для развернутых калибров одинаковы только по стенке и краям полок.

$$\eta = \eta_k \sqrt[n-3]{\frac{h_{k3}}{h_3}},$$

где  $\eta$  — коэффициент обжатия по основанию полок развернутых швеллерных калибров;

$\eta_k$  — коэффициент обжатия по краям полок и стенке, принимаемый в зависимости от прочности валков и мощности двигателя прокатного стана в пределах 1,60—1,80;

$n$  — общее число фасонных швеллерных калибров;  $h_{k3}$  и  $h_3$  — толщина по краям и по основанию полок первого по ходу расчета развернутого швеллерного калибра.

Положения нейтральной линии калибра (рис. 11):

$$z_n = \frac{\Phi + 0,5q}{W}; z'_n = \frac{\Phi' + 0,5q}{W},$$

где  $\Phi$  и  $\Phi'$  — площади, указанные на рис. 11.

Расчет развернутых швеллерных калибров по методу Старченко, как и для развернутых калибров угло-

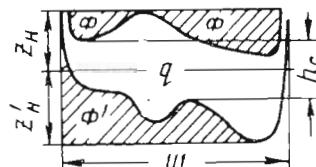


Рис. 11. Схема для определения нейтральной линии калибра по методу Старченко

вой стали, осуществляют по горизонтальной проекции, а развертки полок и стенок — по верхним линиям очертания калибра. В этом случае возможны переполнение или незаполнение промежуточных калибров. Величину

уширения определяют не по средней линии калибра, а по горизонтальной проекции. При этом уширение зависит только от толщины задаваемого в калибр раската.

В методе Старченко не учитываются связи между коэффициентами деформаций в полке, стенке и углах соединения полок со стенками, отсутствуют ложные фланцы в подготовительных калибрах. Это приводит к невыполнению вершины прямых углов на готовом профиле.

Углы раскрытия полок приняты произвольно. Необходимо же изменение углов раскрытия полок по калибрам производить пропорционально обжатиям. Конструкция контрольного предотделочного калибра приводит к образованию усов на профиле, в месте разъема калибра. Формулы для определения нейтральной линии калибра дают неточные результаты, поскольку они учитывают только площадь и ширину калибра, а не характер расположения площади по элементам калибра. Например, построение чистового швеллерного калибра № 12 по линейному методу на стане 600 Салдинского металлургического завода привело к поломке шеек и трефов вследствие получившейся большой разницы в скоростях валков.

### Метод Илюковича

При расчете по этому методу [10] используют первые три калибра обычной калибровки с открытыми фланцами, считая против хода прокатки; калибр IV и последующие — развернутого типа (рис. 12, а — г).

Размеры чистового калибра принимают равными размерам готового профиля в горячем состоянии с учетом прокатки на минусовый допуск. Уклон наружных граней полок 1,24%, уширение по стенке произвольное. Уклон полок предчистового калибра 35%.

Для калибра IV (рис. 12, а) принимают следующие соотношения:

$$R_2 = (1 \div 1,5)h; H = (1 \div 1,4)R; R = (0,4 \div 0,6)b; C = (1,2 \div 1,4)R,$$

где  $R_2$  — радиус развертки внешней стороны стенки;  $H$  — вертикальная проекция полки;  $R$  — радиус развертки внешней стороны полки;  $C$  — координата центра радиуса  $R$ .

Радиус изгиба наружных граней полок  $R$  и его координату  $C$  принимают постоянными для всех калибров, а вертикальные проекции полок  $H'$ , против хода проката,

в развернутых калибрах сохраняется постоянное отношение  $\frac{H'}{H} = \text{const}$ .

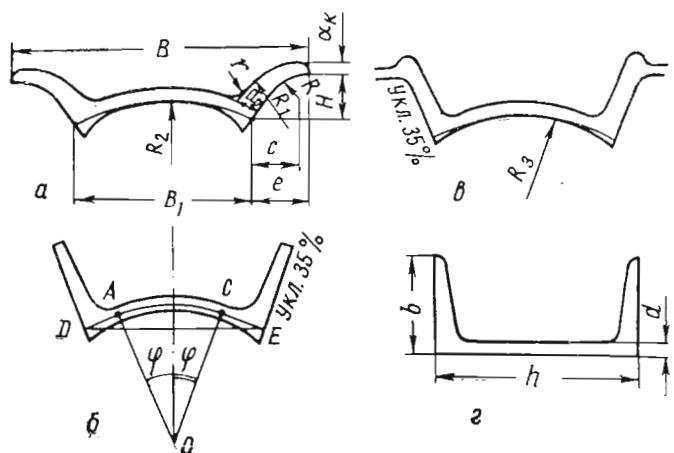


Рис. 12. Построение развернутых швеллерных калибров по методу Илюковича

ки, рассчитывают в зависимости от среднего обжатия полок:

$$H' = H - \frac{(a'_o - a_o) + (a'_k - a_k)}{4},$$

где  $H'$  — вертикальная проекция полки в искомом калибре;

$H$  — то же в известном, предшествующем калибре;

$a'_o$  — толщина основания полки в искомом калибре;

$a'_k$  — то же в известном, предшествующем калибре;

$a_o$  — толщина конца полки в искомом калибре;

$a_k$  — то же в известном, предшествующем калибре.

Радиус изгиба внутренних сторон полок находят по выражениям

$$R'_b = R_b + \frac{a_o + a_k}{2},$$

где  $R'_b, R_b$  — соответственно радиусы изгиба внутренних сторон полок в искомом и известном предшествующем калибре.

Для радиуса  $r$  сопряжения полки со стенкой в раз-

вернутых калибрах, а также размеры оснований полок определяют путем умножения их на принятые коэффициенты деформации:

$$d' = d k_c; \quad a'_o = a_o k_n; \quad a'_k = a_k k_n,$$

где  $d'$ ,  $d$  — соответственно толщина стенки в искомом и известном предшествующем калибре;

$k_c$  — коэффициент деформации стенки;

$k_n$  — коэффициент деформации полки.

Длина средней линии стенки убывает от калибра к калибру на величину уширения. Соответственно изменяется горизонтальная проекция стенки  $B_1$ .

Высоту ложных фланцев и радиус закругления полок определяют конструктивно. Углы уклона наружных граней полок принимают конструктивно от 66,6% в калибре VIII до 195% в калибре V.

Общая ширина развернутого калибра  $B$  убывает от калибра к калибру на величину назначенног о уширения.

По сравнению с калибровкой с открытыми фланцами прокатка швеллера № 10 на стане 550 по данной калибровке имеет следующие преимущества.

Расход валков уменьшается в 1,5—2,0 раза и при переходе к облегченному швеллеру № 10 увеличивается производительность стана при уменьшении веса погонного метра профиля на 14%.

Расчет калибровки швеллеров по методу Илюковича с применением систем развернутых калибров производится по горизонтальной проекции, а не по средней линии, как в случае расчета стенок всех калибров; величина уширения во всех калибрах принята конструктивно. Это неизвестный законченный аналитический расчет калибровки. Многие параметры определены конструктивно. Выпуск полок в отделочном калибре составляет всего 12%, хотя применяют выпуск 10—15%.

### Метод Стефанова и Протасова

Этот метод построения развернутых калибров швеллера почти не отличается от метода Илюковича (калибровка из развернутых калибров по методу сгибания с

применением контрольного калибра). Различие заключается в увеличенной высоте калибров, т. е. в меньшей развертке полок, задаваемых в прямополочный калибр (рис. 13), при этом создаются более благоприятные условия для задачи полосы в калибр. Принятый метод расчета основан на равенстве коэффициентов вытяжки по элементам профиля [11]. Основными в этом случае счи-

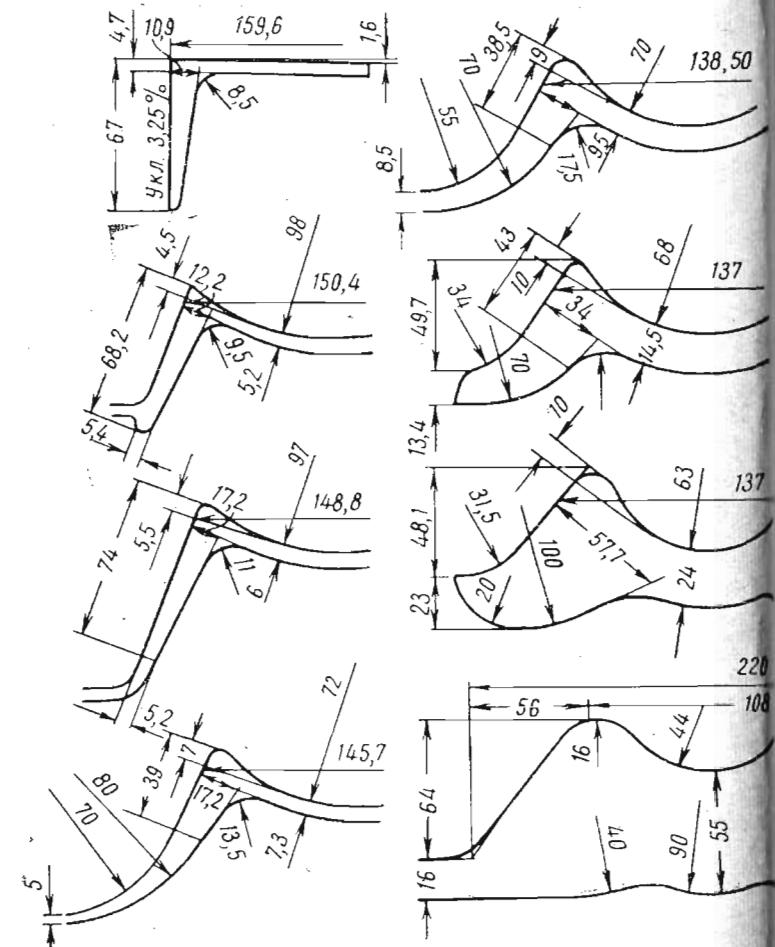


Рис. 13. Построение развернутых калибров для швеллера № 16 по методу Стефанова и Протасова

таются коэффициенты вытяжки стенки калибра, которые выбирают, учитывая уменьшение пластичности металла от калибра к калибуру, а также положение калибра в валках (для равнотропности бочки валка калибы, расположенные на середине валка, нагружаются меньше крайних) и износ калибров. Уширение стенки и полок в калибре принимают на основании опыта проверенных при работе на стане калибровок. Основные элементы калибров определены конструктивно с учетом опыта работающих калибровок швеллера с открытыми фланцами.

При прокатке швеллера № 16 по этой калибровке была достигнута повышенная износостойкость валков, высокая производительность стана и значительно снижен средний вес профиля. Число проходов уменьшилось на 2, снизился расходный коэффициент металла из-за уменьшения концевой обрези, возможности настройки стана по мере износа калибров и прокатки швеллера в минусовом поле допусков.

Расчет серии калибров основан на равенстве коэффициентов вытяжки по элементам профиля. Величина уширения полок и стенки взята без расчета, по опытным данным. Более рациональным надо считать расчет калибровки аналитическим методом по средней линии.

Выпуск внешних граней полок чистового калибра составляет всего 3,25 %. В настоящее время успешно работают калибровки с выпуском 10—15 %.

## Глава II

# ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ МЕТАЛЛА В РАЗВЕРНУТЫХ КАЛИБРАХ

Исследование уширения и коэффициентов высотных деформаций в элементах развернутого калибра проводили на крупносортных станах 650, 600, 550, 500 и мелкосортных станах 300 и 280. Для исследования вырезали

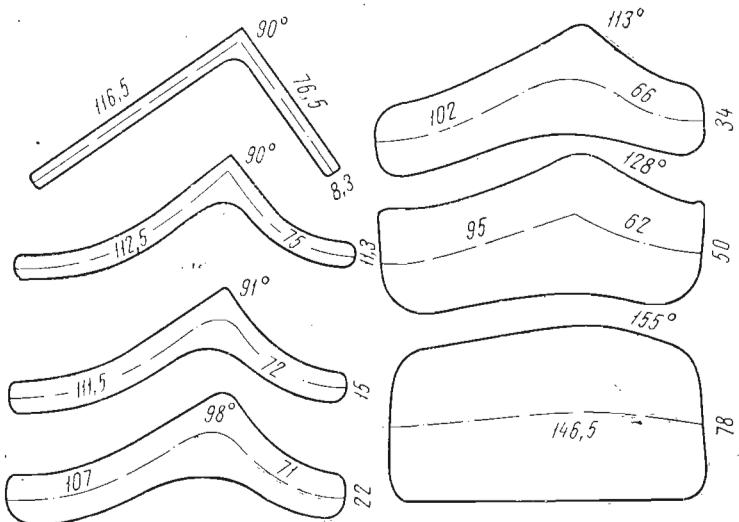


Рис. 14. Отпечатки темплетов от раскатов на стане 600 угловой стали  $120 \times 80 \times 8$  мм

темплеты профилей угловой и зетовой стали, швеллера и автообода от средней части раската после каждого калибра. Прокатку производили по существующей на стапне технологии. Отобранные темплеты с торцовой сторо-

ны механически обрабатывали с чистотой поверхности  $\Delta_5 - \Delta_7$ . С обработанной поверхности производили отиск профиля на бумагу. На бумажном отпечатке графическим способом наносили среднюю линию профиля. Измеряли длину средней линии, толщину полок и стенки,

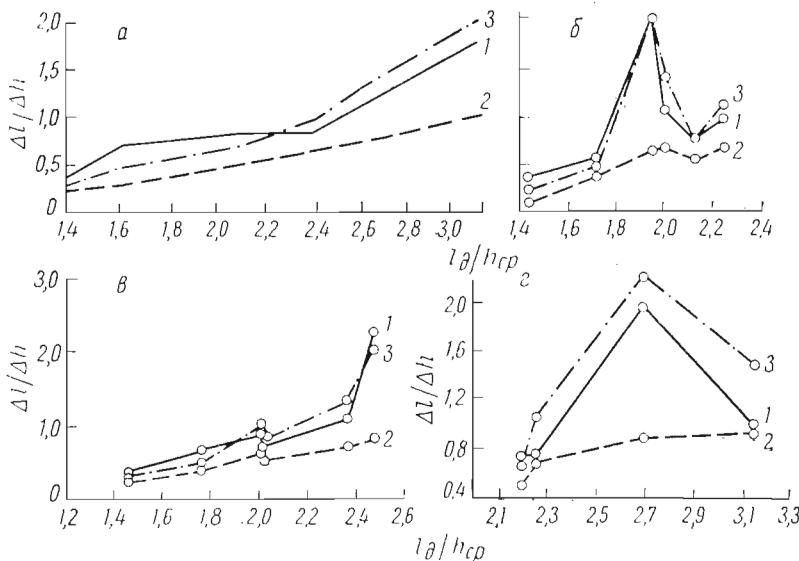


Рис. 15. Зависимость показателя уширения ( $\Delta l / \Delta h$ ) от отношения длины очага деформации к средней высоте ( $l_d / h_{cp}$ ) в развернутых калибрах угловой стали:  
а —  $120 \times 80 \times 8$  мм; б —  $125 \times 125 \times 9$  мм; в —  $100 \times 63 \times 8$  мм; г —  $130 \times 90 \times 8$  мм;  
1 — опытная; 2 — по формуле Губкина; 3 — по формуле (8)

длину биссектрисы по вершинам углов каждого отпечатка профиля.

Для всех исследованных профилей получены зависимости показателя уширения  $\Delta l / \Delta h$  от изменения отношения длины очага деформации к средней его высоте  $l_d / h_{cp}$ . На рис. 15, 17, 19, 22 кривая 1 рассчитана по фактической величине уширения средней линии профиля, кривая 2 получена на основе расчета уширения по формуле Губкина [13]

$$\Delta b = \left(1 + \frac{\Delta h}{H}\right) \left(f \sqrt{R \Delta h} - \frac{\Delta h}{2}\right) \frac{\Delta h}{H}; \quad (7)$$

кривая 3 по формуле (8). Представлены графики изменения коэффициентов высотной деформации в элементах развернутого калибра по проходам.

### Исследование уширения средних линий и коэффициентов высотных деформаций в развернутых калибрах угловой стали

На стане 600 прокатывали угловую сталь  $120 \times 80 \times 8$  мм,  $130 \times 90 \times 8$  мм и  $125 \times 80 \times 10$  мм. На рис. 14 представлены отпечатки с темплетов угловой стали  $120 \times 80 \times 8$  мм с нанесенными средними линиями. Результаты измерений этих темплетов и расчетные параметры прокатки их даны в табл. 1.

Таблица 1

Значение технологических параметров при прокатке неравнобокой угловой стали  $120 \times 80 \times 8$  мм на стане 600  
(заготовка  $h_0 \times b_0 = 90 \times 140$  мм)

Номера калибра (против хода прокатки)	$h$ , мм	$\eta$	$l$ , мм	$\Delta l_a$ , мм	$\Delta l_b$ , мм	$\frac{\Delta l}{\Delta h}$	$\eta_y$	$\alpha$ , град.	$R_k$ , мм	$h_{cp}$ , мм	$l_d$ , мм	$\frac{l_d}{h_{cp}}$
I	6,5	1,375	193,0	4,0	1,5	1,835	1,44	90	296	9,5	29,7	3,14
II	7,7	1,360	187,5	2,0	2,0	1,080	1,35	90	294	13,5	32,2	2,63
III	9,6	1,470	183,5	4,5	1,0	0,800	1,32	91	292	18,5	45,0	2,43
IV	13,8	1,540	178,0	5,0	5,0	0,830	1,24	98	289	28,0	59,0	2,10
V	21,8	1,470	168,0	7,0	4,0	0,690	1,29	113	283	42,0	67,0	1,59
VI	37,8	1,560	157,0	—	—	0,375	1,23	128	275	64,0	87,5	1,39
VII	60,8	1,500	146,5	—	—	—	—	155	261	—	—	—

На стане 500 прокатывали угловую сталь  $125 \times 125 \times 9$  мм (ГОСТ 8509—57) и  $100 \times 63 \times 8$  мм (ГОСТ 8510—57). Графики зависимостей показателя уширения от изменения отношения длины очага деформации к средней высоте даны на рис. 15. Изменение коэффициентов высотных деформаций и углов раскрытия полок по проходам для данных профилей приведено на рис. 16.

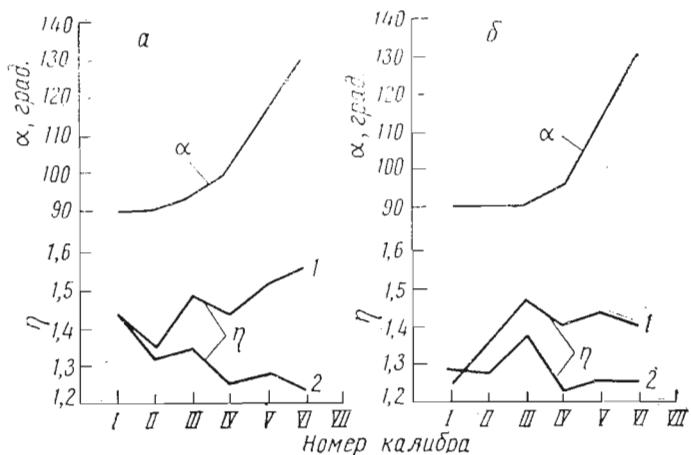


Рис. 16. Изменение коэффициентов высотных деформаций  $\eta$  (1 — в полках, 2 — в углах) и углов раскрытия полок  $\alpha$  в угловой стали:  
а —  $120 \times 80 \times 8$  мм; б —  $125 \times 80 \times 10$  мм

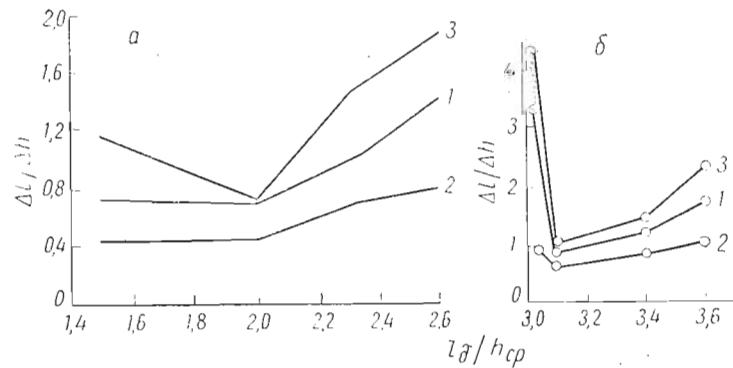


Рис. 17. Зависимость показателя уширения  $(\Delta l / \Delta h)$  от отношения длины очага деформации к средней высоте  $(l_d / h_{cp})$  в развернутых калибрах:  
а — угловой стали  $36 \times 36 \times 4$  мм; б — угловой стали  $45 \times 45 \times 3$  мм; 1 — опытная; 2 — по формуле Губкина; 3 — по формуле (8)

На станах 300 и 280 прокатывали угловую сталь  $45 \times 45 \times 3$  мм (ГОСТ 8509—57) и  $36 \times 36 \times 4$  мм (ГОСТ 8510—57). Графики зависимостей показателя уширения от изменения отношения длины очага деформации к средней его высоте представлены на рис. 17.

Анализируя уширение средних линий при прокатке в развернутых калибрах угловой стали  $120 \times 80 \times 8$  мм,  $130 \times 90 \times 8$  мм,  $125 \times 80 \times 10$  мм,  $125 \times 125 \times 9$  мм и  $100 \times 63 \times 8$  мм (см. рис. 15), необходимо отметить, что показатель уширения  $\Delta l / \Delta h$  для средней линии в чистовых калибрах имеет максимальное значение и находится в пределах 1,80—2,06. Абсолютное обжатие полки в этих калибрах меньше, чем в других профильных калибрах. В предчистовых калибрах при прокатке указанных профилей показатель уширения составляет 1,0—1,47, а в последующих, против хода прокатки, постепенно убывает к первому профильному калибру. Уширение средних линий в развернутых калибрах угловой стали в несколько раз больше уширения, найденного по формуле для случая прокатки полос на валках с гладкой бочкой. То же, но в меньшей мере, наблюдается при прокатке угловой равнобокой стали  $45 \times 45 \times 3$  и  $36 \times 36 \times 4$  мм (см. рис. 17), показатель уширения в чистовых калибрах которой находится в пределах 1,40—1,78, а в предчистовых калибрах 1,0—1,48. Затем он убывает к первому, против хода прокатки, профильному калибру. Здесь так же, как и при прокатке угловой стали больших размеров, фактическое уширение при прочих равных условиях получается значительно больше найденного по формулам (7) применительно к прокатке полосы на валках с гладкой бочкой.

Анализ данных измерений темплетов также подтверждает, что уширение средних линий полок угловой стали распределяется пропорционально их длинам (большой полке соответствует большая часть общего уширения, меньшей — меньшая часть). Условия деформации металла в развернутых калибрах отличны от условий деформации полосы на валках с гладкой бочкой. В развернутых калибрах, кроме обжатия по высоте полок, полоса подвергается поперечному изгибу, а со стороны валков — различному скоростному воздействию на отдельные элементы профиля. При расчете уширения средней линии А. П. Чекмарев [6], Б. В. Мерекин [9], Н. В. Литовченко

[8] и др. рекомендуют уширение, найденное при прокатке полосы на валках с гладкой бочкой, корректировать в зависимости от номера прохода (калибра). А. П. Чекмарев [6] и М. М. Штернов [5] рекомендуют дополнительный коэффициент уширения по калибрам выбирать в зависимости от угла раскрытия полок.

Характер зависимости, представленной кривой 1 (см. рис. 15 и 17), свидетельствует о том, что показатель уширения средней линии увеличивается пропорционально росту отношения длины очага деформации к его средней высоте ( $l_d / h_{cp}$ ). Но кривая 2, полученная по формуле Губкина [13] для случая прокатки полосы на валках с гладкой бочкой, не может отражать изменение фактического показателя уширения средней линии. Поэтому для подсчета величины уширения средней линии в развернутом калибре угловой стали рекомендуется формула

$$\Delta l = \Delta b_{pl} + k_1 k_2 \frac{l_d}{h_{cp}}^*, \quad (8)$$

где  $\Delta l$  — уширение средней линии в развернутом калибре;

$\Delta b_{pl}$  — уширение приведенной полосы при прокатке на валках с гладкой бочкой (определяется по С. И. Губкину [13]);

$k_1$  — коэффициент, учитывающий размер прокатываемой угловой стали ( $k_1 = 1,2$ ; 1,0 и 0,8 для больших, средних и малых размеров соответственно);

$k_2$  — коэффициент, учитывающий степень стеснения уширения в калибре (для закрытого калибра  $k_2 = 0,7$ —0,8, для открытого —  $k_2 = 1$ );

$l_d$  — длина очага деформации приведенной полосы;  $h_{cp} = \frac{H+h}{2}$  — средняя высота очага деформации приведенной полосы.

Кривая 3, приведенная на рис. 15 и 17, получена по формуле (8) для указанных ранее профилей угловой стали, когда  $k_1 k_2 = 1$ .

\* Далее будет показано, что зависимость (8) справедлива при подсчете уширения в развернутом калибре для любого профиля.

Рассмотрим, насколько совпадают кривые для различных размеров угловой стали, построенные по опытным данным и по формуле (8).

Сталь угловая  $120 \times 80 \times 8$  мм (см. рис. 15, а) — совпадение кривых 1 и 3 удовлетворительное (расхождение 10—15%).

Сталь угловая  $130 \times 90 \times 8$  мм (см. рис. 15, г) — в чистом калибре совпадение удовлетворительное, в подготовительных калибрах кривая 1 проходит гораздо ниже кривой 3. Несовпадение можно объяснить тем, что в исследуемой калибровке в закрытых черновых калибрах принято значительное стеснение уширения, что подтверждается наличием «усов» на темплетах.

Сталь угловая  $36 \times 36 \times 4$  мм (см. рис. 17, а) — кривые 1 и 3 не совпадают. Расчетная кривая 3 расположена выше опытной 1. Несовпадение наблюдается также и в чистом калибре. Значительное несовпадение кривых 1 и 3 можно объяснить тем, что рассматриваемый профиль имеет небольшие размеры, прокатывается на валах сравнительно малого диаметра. Поэтому меньше изгиб профиля и разница в воздействии скоростного режима на его элементы. Для уменьшения разности расчетных и опытных значений [кривые 1, 3 (см. рис. 17, а)], коэффициент  $k_1$  в формуле (8) следует брать меньше единицы, например 0,8.

В результате исследования и анализа уширения средних линий полок угловой стали при прокатке в развернутых калибрах следует отметить, что полученные значения уширения средних линий в калибрах при покатке угловой стали подтверждают рекомендации А. П. Чекмарева, Б. В. Мерекина, Н. В. Литовченко и М. М. Штернова о необходимости увеличить расчетные значения уширения для калибров угловой стали, полученные по известным формулам, путем применения специальных коэффициентов для каждого калибра. Подтверждается правильность рекомендованного А. П. Чекмаревым, Б. В. Мерекиным, Н. В. Литовченко принципа о распределении уширения для неравнобокой угловой стали пропорционально длинам полок. Предложенная формула (8) вполне применима для определения уширения в калибрах угловой стали. При этом коэффициент  $k_1$  во втором члене ее правой части позволяет учитывать размеры прокатываемых профилей угловой стали.

### Коэффициенты высотной деформации в элементах калибра угловой стали

Большинство авторов до сих пор не придают значения соотношению коэффициентов высотных деформаций в элементах развернутых калибров угловой стали. Между тем в практике калибровки профилей с применением систем развернутых калибров эти соотношения регулируются определенной величиной радиуса перегиба в месте образования вершины угла.

Учет оптимального соотношения коэффициентов высотных деформаций в элементах калибра угловой стали необходим для получения устойчивого выполнения вершины прямого угла на готовом профиле. Угловая сталь имеет разную толщину по сечению профиля (в полках и вершинах углов), поэтому прокатка ее из заготовки квадратного или прямоугольного сечений будет сопровождаться неравномерным обжатием по ширине, т. е. с различными коэффициентами высотной деформации в полках и в вершине угла профиля. Во всех калибрах угловой стали в вершинах углов отсутствовали закругления, т. е. был дан простор для заполнения вершин углов.

Изменение коэффициента высотной деформации  $\eta$  полок и вершины угла, а также углы раскрытия полок приведены на рис. 16. Здесь во всех сериях темплетов угловой стали коэффициенты высотной деформации  $\eta$  полок и вершин угла для чистовых калибров между собой равны, а в некоторых темплетах  $\eta$  по вершинам угла профиля несколько больше, чем полок. Это обеспечивает более устойчивое заполнение вершины угла на готовом профиле. В предчистом калибре указанные коэффициенты различны: по углам  $\eta$  несколько меньше, чем в полках. В последующих (против хода прокатки) калибрах эта разница увеличивается, достигая максимума в первом профильном калибре. Максимальная разница в коэффициентах высотной деформации в первых по ходу прокатки фасонных калибрах достигается за счет больших углов раскрытия полок и более высокой температуры прокатываемого металла.

В чистом калибре, где сравнительно низкая температура прокатываемой полосы и малый угол раскрытия полок, обычно при выполнении калибровки не допускается разница в величине указанных коэффициентов высот-

ной деформации. На основании результатов данного исследования рекомендованы следующие соотношения коэффициентов высотных деформаций в вершинах угла и полках угловой стали:

Номер калибра	Соотношение коэффициентов	Номер калибра	Соотношение коэффициентов
I	0,0—0,05	V	0,20—0,25
II	0,0—0,05	VI	0,25—0,30
III	0,10—0,15	VII	0,35
IV	0,15—0,20		

### Исследование уширения средних линий и коэффициентов высотных деформаций в развернутых калибрах швеллера

По данной методике выполнено исследование уширения средних линий и коэффициентов высотных деформаций на стане 650 при прокатке швеллера № 16, на стане 600 при прокатке швеллера № 12, на стане 280 при прокатке профиля № 8.

На рис. 18 приведены отпечатки темплетов от раскатов швеллера № 12 на стане 600. Результаты измерений этих темплетов и расчетные параметры прокатки их даны в табл. 2. На рис. 19 даны зависимости показателя уширения от изменения отношения длины очага дефор-

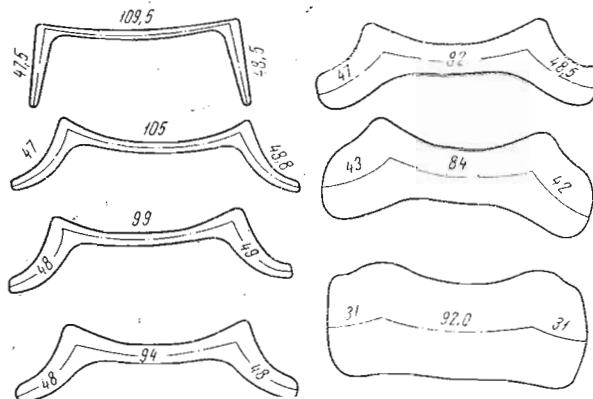


Рис. 18. Отпечатки темплетов от раскатов швеллеров № 12 на стане 600

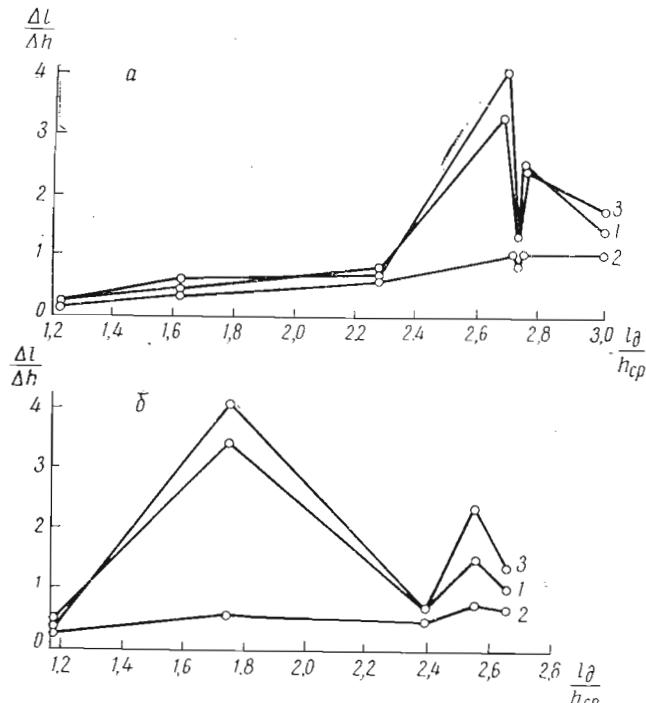


Рис. 19. Зависимость показателя уширения ( $\Delta l / \Delta h$ ) от отношения длины очага деформации к средней высоте ( $l_0 / h_{cp}$ ) в развернутых калибрах:

а — швеллер № 12, б — профиль № 8; 1 — опытная, 2 — по формуле Губкина, 3 — по формуле (8)

Таблица 2  
Значение технологических параметров при прокатке швеллера № 12 на стане 600 (заготовка  $h_0 \times b_0 = 95 \times 145$  мм)

Номер калибра (против хода прокатки) $h_{cp}$ , мм	$\eta_{cp}$	$l$ , мм	$\Delta l$ , мм	$\Delta l_{\pi}$ , мм	$\eta_y$	$\alpha$ , град.	$R_K$ , мм	$h_{cp}$ , мм	$l_d$ , мм	$\frac{l_d}{h_{cp}}$	$\frac{\Delta l}{\Delta h_{cp}}$
I	6,5	1,28	205,5	4,7	0,20	4,3	1,28	90	296,7	7,1	18,8
II	7,7	1,24	200,9	4,8	0,40	4,0	1,21	85	296,1	8,65	23,7
III	9,6	1,44	196,0	6,0	0,50	5,0	1,26	90	295,2	11,7	35,2
IV	13,8	1,58	190,0	10,5	0,25	10,0	1,33	90	293,1	17,8	48,4
V	21,8	1,73	179,5	10,5	5,25	0,0	1,39	85	289,1	29,8	68,0
VI	37,8	1,61	169,0	15,0	11,50	-8,0	1,39	100	281,1	49,3	80,2
VII	60,8	1,56	154,0	9,0	—	—	1,41	114	269,6	77,8	95,6

мации к средней его высоте. Изменение коэффициентов высотных деформаций и углов раскрытия полок по проходам для профилей швеллера приведены на рис. 20, 21.

Анализируя опытные данные по уширению средних линий в развернутых швеллерных калибрах, можно отметить, что в них так же как и для угловой стали, наблюдаются высокие показатели уширения по калибрам, даже несколько выше, чем в калибрах угловой стали. Например для швеллера № 16 в чистом проходе  $\Delta l/\Delta h = 4,28$ , а для угловой стали около 2. В черновых проходах он постепенно понижается к первому профильному калибру.

Для швеллера № 12, как и для швеллера № 16, наблюдается увеличение уширения средней линии профиля. В чистовом калибре показатель  $\Delta l/\Delta h$  равен 4,1, в предчистовом — 2,53 и далее постепенно уменьшается до 0,265 в первом профильном калибре. Показатель уширения в этом случае здесь увеличен по сравнению с показателем уширения для угловой стали, это объясняется большим изгибом профиля швеллера, более низкой температурой его прокатки и меньшей толщиной полосы в однозначных проходах.

На рис. 19, а приведено изменение  $\Delta l/\Delta h$  в зависимости от  $l_{\text{д}}/h_{\text{ср}}$  для швеллера № 12. Видно, что кривые 1 и 2 не имеют сходимости, а сходимость кривых 1 и 3 хорошая. Таким образом, по формуле (8) можно определить величину уширения средних линий для развернутых швеллерных калибров с достаточной степенью точности.

Для профиля № 8 приведено изменение  $\Delta l/\Delta h$  от  $l_{\text{д}}/h_{\text{ср}}$  (см. рис. 19, б); кривая 2, построенная по расчетным данным формулы Губкина, не совпадает с опытной кривой 1. Кривая 3, построенная по расчетным данным формулы (8), по характеру сходна с закономерностью представленной экспериментальной кривой. Однако в некоторой части на кривой 3 получается завышенный показатель уширения по сравнению с опытными данными. Некоторое несовпадение кривых 1 и 3 можно объяснить тем, что размер профиля № 8 по сравнению с размерами швеллеров № 12 и 16 мал, профиль № 8 прокатывается на валках малого диаметра, при этом наблюдается меньший изгиб полок и меньшая разница в воздействии скоростного режима на элементы профиля. Для того

чтобы приблизить совпадение кривых 1 и 3, необходимо коэффициент  $k_1$  в формуле (8) принять равным 0,8—0,85. Заметим, что по всех случаях для построения кривой 3 по формуле (8) для всех профилей взято  $k_1=1$ .

Показатель уширения средней линии профиля № 8 в чистовом калибре составляет 3,4, в предчистовом 1,56, в калибре V—0,5, что значительно выше его значений, полученных расчетным путем по обычным формулам

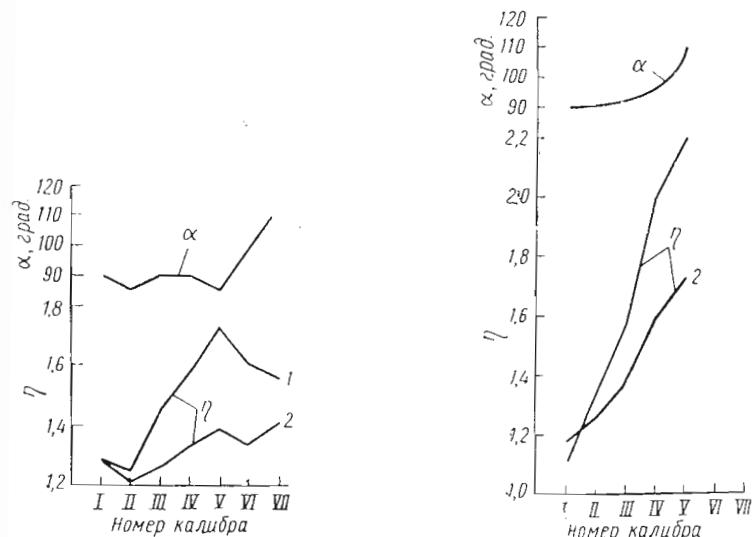


Рис. 20. Изменение коэффициентов высотных деформаций  $\eta$  (1 — в полках, 2 — в углах профиля) и угла  $\alpha$  раскрытия полки и стенки в развернутых калибрах швеллера № 12, стан 600:

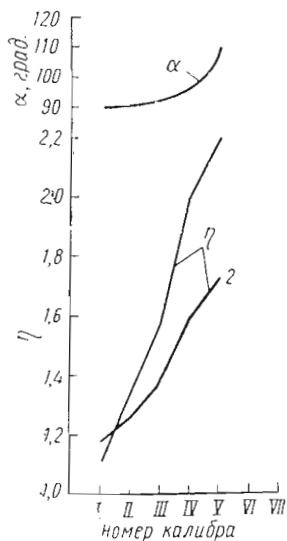


Рис. 21. Изменение коэффициентов высотных деформаций  $\eta$  (1 — в полках, 2 — в углах профиля) и углов  $\alpha$  раскрытия полки и стенки в развернутых калибрах профиля № 8

ущирения, особенно в первых четырех калибрах против хода прокатки. Исходя из вышеизложенного, можно отметить следующее:

1) уширение средней линии в развернутых швеллерных калибрах значительно больше уширения полос, про-

катанных на валках с гладкой бочкой, и не может быть определено по известным формулам уширения;

2) для определения уширения в развернутых швеллерных калибрах применима формула (8). Коэффициент  $k_1$  в этой формуле должен приниматься в зависимости от размера швеллера;

3) уширение средней линии в развернутых калибрах швеллера в основном распределяется пропорционально длинам элементов профиля, как и для неравнобокой угловой стали.

#### Коэффициенты высотной деформации в элементах развернутых швеллерных калибров

При калибровке швеллеров по различным методам соотношение коэффициентов высотной деформации по элементам калибра регулируется высотой ложных фланцев. Оптимальное соотношение коэффициентов высотных деформаций в развернутых швеллерных калибрах необходимо для получения устойчивого выполнения вершины прямого угла на готовом профиле. Так, при освоении калибровки швеллера № 12 на стане 600 Салдинского завода был опробован вариант калибровки без ложных фланцев, как это рекомендует Д. И. Старченко [2]. В результате готовый профиль имел невыполнение (утяжку) внешних вершин прямых углов.

Графики изменения коэффициентов высотной деформации в вершинах углов и средних коэффициентов высотной деформации полок и стенок, а также углов раскрытия полок со стенкой приведены на рис. 20 и 21. Видно, что в чистовых калибрах коэффициенты высотной деформации почти совпадают, а для швеллера № 12 и профиля № 8 коэффициенты высотной деформации в вершинах углов несколько выше средних значений коэффициентов высотной деформации полок и стенок. В последующих калибрах эти коэффициенты в углах профиля уменьшаются относительно значений средних коэффициентов высотных деформаций полок и стенок. Наибольшая разница значений коэффициентов высотных деформаций наблюдается в первых по ходу прокатки профильных калибрах, что достигается за счет больших углов раскрытия полки со стенкой и более высокой температурой прокатываемого металла.

#### Исследование уширения средних линий в развернутых калибрах профилей зет и автообода ГАЗ-53

Был исследован специальный профиль  $36 \times 36 \times 23 \times 8 \times 7 \times 6$  мм из титанового сплава ОТ-4 на стане 300. Изменение  $\Delta l/\Delta h$  от  $l_d/h_{cp}$  представлено на рис. 22, а. Кривая 2 расположена значительно ниже опытной кри-

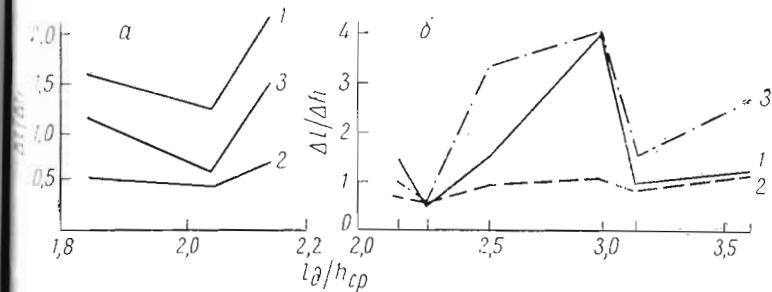


Рис. 22. Зависимость показателя уширения ( $\Delta l/\Delta h$ ) от отношения длины очага деформации к средней высоте ( $l_d/h_{cp}$ ) в развернутых калибрах:

а — зет  $36 \times 36 \times 23 \times 8 \times 7 \times 6$  мм; б — автообода ГАЗ-53

вой 1, т. е. показатели уширения по калибрам, полученные расчетным путем по обычным формулам уширения при прокатке полосы на валках с гладкой бочкой, не соответствуют фактическим. Кривая 3, построенная по расчетным данным формулы (8), также расположена несколько ниже опытной 1, однако по характеру она повторяет опытную кривую. Несовпадение кривых 1 и 3 объясняется физическими свойствами сплавов титана, прокатка которых сопровождается увеличением уширения за счет бочкообразования. Для того чтобы кривые 1 и 3 совпадали или имели близкую сходимость, необходимо чтобы в формуле (8) коэффициент  $k_1$  был больше единицы. В данном случае надо взять  $k_1=2$ , что соответствует примерно удвоенной величине уширения сплавов титана по сравнению с уширением, получающимся при прокатке рядовых сталей на валках с гладкой бочкой.

Из других профилей, прокатываемых в развернутых калибрах, для исследования уширения средней линии в

развернутых калибрах был взят профиль автообода ГАЗ-53. Зависимость  $I/\Delta h$  от  $\Delta l_d/h_{ср}$  для этого профиля представлена на рис. 22, б. Как и для приведенных ранее профилей, кривая 2 расположена значительно ниже, чем 1; 3 — совпадает с кривой 1 только в чистовом калиbre, в остальных калибрах она расположена выше. Несовпадение кривых можно объяснить тем, что в закрытых черновых калибрах было принято значительное стеснение уширения.

Величина уширения средней линии в развернутых калибрах для профилей автообода и зет значительно превышает значения, полученные расчетным путем по формулам для условий прокатки полосы на валках с гладкой бочкой. С достаточной точностью уширение в развернутых калибрах для профилей зет и автообода может быть определено по формуле (8) с применением соответствующего коэффициента  $k_1$  в зависимости от размера профиля.

### Глава III

## ОСНОВЫ КАЛИБРОВКИ ВАЛКОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ СИСТЕМ РАЗВЕРНУТЫХ КАЛИБРОВ

### Сортамент профилей, прокатка которых возможна в развернутых калибрах

Прокатка профилей в развернутых калибрах позволяет уменьшить трение в калибрах, снизить расход энергии на прокатку и сократить расход прокатных валков. В развернутых калибрах можно применять увеличенные обжатия вследствие наличия вертикального или близкого к нему давления на металл со стороны валков, что позволяет вести процесс более интенсивно. Поэтому прокатка профилей в системе развернутых калибров является наиболее рациональной. Однако не всякий профиль можно прокатать с применением систем развернутых калибров. К профилям, прокатка которых возможна в развернутых калибрах, относятся такие, где в каждой точке перехода от одного элемента к другому сочленяется не более двух элементов. Обычно эти элементы в своем сечении имеют форму прямоугольных или клиновидных полос (полки) и прямоугольных стенок, сочленяющихся под прямым углом.

С применением систем развернутых калибров прокатывают профили стали угловой равнобокой (ГОСТ 8509—57), стали угловой неравнобокой (ГОСТ 8510—57), швеллеров (ГОСТ 8240—56), стали для шахтного крепления (ГОСТ 5157—53), стали для оконных и фонарных переплетов промышленных зданий (ГОСТ 7511—58), стали зетовой для хребтовой балки вагонов (ГОСТ 5267—63), швеллеров для вагонов (ГОСТ 5267—63), зетовой стали для вагонов (ГОСТ 5267—63), стали углобульбовой для вагонов (ГОСТ 5267—63), стали специальных профилей для сельскохозяйственных машин (ГОСТ 12492—67), стали для шпунтовых свай (ГОСТ 4781—55) и др.

## Обоснование метода расчета поперечной и высотной деформаций в развернутом калибре

При расчете параметров развернутого калибра наиболее важно определить поперечную (уширение) и высотную (обжатие элементов профиля) деформации.

Первоначально поперечную деформацию в развернутом калибре рассчитывали по его горизонтальной проекции. При этом величину уширения всегда принимали положительной. Однако опыт показал, что она часто не соответствует рассчитанной по горизонтальной проекции, а иногда даже получается отрицательной. В развернутом калибре поперечная деформация правильно может быть определена лишь по изменению длины средней линии  $l_{cp}$ , которая при переходе от калибра к калибуру изменяется только на величину уширения. Этот метод определения поперечной деформации свободен от недостатков, присущих приведенному выше, и вполне объясняет причину иногда наблюдаемого отрицательного уширения: при уменьшении общей ширины профиля длина средней линии его увеличивается в результате роста высоты калибра. При расчете поперечной деформации по длине средней линии уширение всегда будет положительным.

Длина средней линии  $l_{cp_n}$  в  $n$ -ном развернутом калибре (рис. 23,  $AO_1 O_2 B$ ) определяется по ее длине в первом (чистовом) калибре  $l_{cp1}$  в соответствии с уравнением

$$l_{cpn} = l_{cp1} - (\Delta l_1 + \Delta l_2 + \dots + \Delta l_{n-1}), \quad (9)$$

где  $\Delta l_1, \Delta l_2, \Delta l_{n-1}$  — уширение средних линий в соответствующих калибрах.

Для удобства расчета параметров и построения калибров составляется уравнение для определения длины средней линии каждого элемента профиля (стенки, полки и др.) и решается относительно горизонтальных проекций  $B_a$  и  $B_h$  (см. рис. 23).

Прокатка профиля с применением систем развернутых калибров осуществляется путем последовательного обжатия и изгиба его элементов. В чистовом калибре полоса путем гибки в сочетании с небольшим обжатием оформляется в готовый профиль. В процессе расчета и построения калибров важно обеспечить правильное последовательное изменение конфигурации калибров по вы-

соте. При этом в черновых калибрах определяющими параметрами являются углы раскрытия средних линий полок  $\alpha_n$  и стенки  $\beta_n$ , высота калибра  $H_n$  и радиус очертания средней линии полок  $r_n$  (см. рис. 23). Для предчистового калибра упомянутые параметры устанавливают

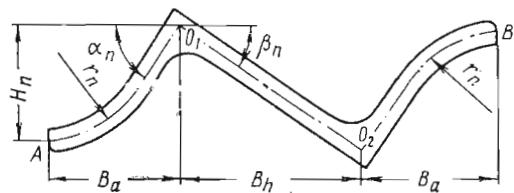


Рис. 23. Развернутый калибр зетовой стали и его основные элементы

опытным путем, исходя из условий максимально возможного развертывания профиля при одновременном обеспечении удовлетворительного захвата полосы валками и получения при прокатке устойчивых размеров профиля. Радиусы очертания участка дуги средних линий полок и горизонтальные проекции их определяются из уравнения длины средних линий полок.

Изменение углов раскрытия средних линий полок (см. рис. 23) по калибрам отдельными исследователями [2] регламентировано на основании опытных данных. Другие исследователи [8] рекомендуют это изменение по арифметической прогрессии.

Изменение углов раскрытия средних линий полок и стенки, а также высоты в калибре надо осуществлять пропорционально обжатиям, как это рекомендует А. П. Чекмарев [6]:

$$\alpha_n = \alpha_2 - (\Delta\alpha_2 + \Delta\alpha_3 + \dots + \Delta\alpha_{n-1}), \quad (10)$$

где

$\alpha_n$  — угол раскрытия средней линии полки в  $n$ -ном калибре;

$\alpha_2$  — угол раскрытия средней линии полки в предчистовом калибре (принимается конструктивно);

$\Delta\alpha_2, \Delta\alpha_3, \Delta\alpha_{n-1}$  — приращения этого угла в соответствующих калибрах.

Приращение  $\Delta\alpha_n$  углов раскрытия средних линий полок в  $n$ -ном калибре определяется из уравнения

$$\Delta\alpha_n = \frac{\alpha_2}{\Sigma\Delta h} \Delta h_n, \quad (11)$$

где  $\Sigma\Delta h$  — сумма обжатий полок во всех развернутых калибрах (исключая чистовой);  
 $\Delta h_n$  — обжатие полки в  $n$ -ном калибре.

Высота  $n$ -ого калибра  $H_n$ , т. е., вертикальная проекция средней линии полки (см. рис. 23), определяется аналогично углам раскрытия средних линий полок:

$$H_n = H_2 - (\Delta H_2 + \Delta H_3 + \dots + \Delta H_{n-1}), \quad (12)$$

где  $H_2$  — высота предчистового калибра (принимается конструктивно);  
 $\Delta H_2, \Delta H_3, \Delta H_{n-1}$  — приращение высот в соответствующих калибрах, определяемое из выражения

$$\Delta H_n = \frac{H_2}{\Sigma\Delta h} \Delta h_n. \quad (13)$$

Радиусы закруглений концов полок следует изменять по калибрам также пропорционально обжатиям. Толщина полки и стенки определяется путем предварительного принятия ряда коэффициентов высотной деформации по проходам в зависимости от мощности привода стана, прочности и износостойкости валков, пластичности металла, формы прокатываемого профиля и др., т. е. для каждого конкретного случая прокатки.

Для устойчивого получения размеров на готовом профиле необходимо в первых двух (против хода прокатки) калибрах принимать равные коэффициенты высотных деформаций в полках, стенках и вершинах углов. В последующих (против хода прокатки) калибрах принимается постепенное нарастание разности в величине коэффициентов высотных деформаций по элементам профиля (полки, стенки, вершины углов), которая достигает максимального значения в последнем профильном калибре.

## Определение коэффициентов высотных деформаций в элементах развернутого калибра

Известно, что фасонный профиль нельзя получить из квадратной или прямоугольной заготовки, минуя прокатку ее в подготовительных калибрах, так как в этом случае не будут выполнены вершины его углов. Заполнение металлом вершин углов в калибре затруднено. Для надежного выполнения вершин углов в калибре должно соблюдаться определенное соотношение коэффициентов высотных деформаций у интенсивно и незначительно обжимаемых элементов профиля. Это условие аналитически можно представить в виде уравнения

$$\eta_{n.c} - \eta_y = c, \quad (14)$$

где  $\eta_{n.c}$  — средний коэффициент высотной деформации полки и стенки профиля;  
 $\eta_y$  — коэффициент высотной деформации вершины угла (определяется как отношение длин биссектрис углов);  
 $c$  — коэффициент, зависящий от номера прохода.

Коэффициенты высотных деформаций  $\eta_{n.c}$  и  $\eta_y$  определяются (рис. 24) из соотношений:

$$\eta_{n.c} = \frac{1}{2} \left( \frac{N'K'}{NK} + \frac{C'D'}{CD} \right); \quad \eta_y = \frac{A'B'}{AB}.$$

В работах [1—5] не придается значение соотношению коэффициентов высотной деформации в элементах развернутого калибра. В практике калибровки профилей эти соотношения регулируются в калибрах угловой и зетовой стали, определенной величиной радиуса перегиба в месте образования вершины угла или устройством специальных ложных фланцев в швеллерных калибрах.

Между тем учет оптимального соотношения высотных деформаций в элементах развернутого калибра важен для получения устойчивого выполнения вершины прямого угла на готовом профиле. Фасонные профили, прокатываемые в развернутых калибрах, имеют разную толщину в полках и вершинах углов, поэтому прокатка их из прямоугольной или квадратной заготовки сопровождается неравномерным обжатием по сечению, т. е. высотные коэффициенты деформации в полках, стенках и вер-

шинах углов профиля получаются разными. Исследования коэффициентов высотных деформаций в элементах профиля (см. гл. II) показали, что на большинстве темпелотов в полках, стенках и вершинах углов для чистого калибра они равны или разняются незначительно (см. рис. 16, 20, 21).

В предчистовых калибрах перечисленные коэффициенты неодинаковы: в вершинах углов они несколько меньше, чем в полках и стенках. В последующих против хода прокатки) калибрах эта разница увеличивается, достигая максимума в последнем калибре.

Максимальная разница в высотных коэффициентах деформации достигается применением больших углов раскрытия полок и благодаря более высокой пластичности металла.

### *Уширение средних линий в развернутых калибрах*

В развернутом фасонном калибре полоса наряду с обжатием испытывает поперечный изгиб. Изогнутые элементы полок и стенки имеют поперечное растяжение, распространяющееся вне зоны деформации металла, т. е. внеконтактную деформацию этих элементов.

Внеконтактная деформация полосы происходит вследствие изгиба полосы при входе в очаг деформации и воздействия жесткого конца прокатываемой полосы. Кроме того, элементы развернутого профиля подвергаются воздействию неравномерного скоростного режима со стороны валков из-за разных величин катящих диаметров валков. Это ведет к увеличенному уширению средних линий в развернутых калибрах по сравнению с уширением при прокатке полос на валках с гладкой бочкой.

Величина уширения средней линии в развернутом калибре определяется формулой (8).

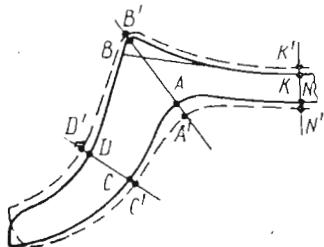


Рис. 24. Пояснение расчета коэффициентов высотных деформаций в элементах развернутого калибра

Рассматривая распределение уширения средних линий в элементах развернутого калибра, здесь можно принять, что полосы средних размеров при прокатке на валках с гладкой бочкой имеют относительно равномерное распределение уширения по ширине полосы. Это положение, по-видимому, справедливо и при прокатке профилей в развернутых калибрах; поэтому общее уширение средней линии  $\Delta l$  в развернутом калибре можно распределить по элементам калибра пропорционально длинам средних линий его элементов. Это подтверждается также равенством вытяжек отдельных элементов профиля (размеры со штрихом относятся к исходному калибру, без штриха к предыдущему по ходу расчета):

$$\frac{F_a'}{F_a} = \frac{F_b'}{F_b} = \frac{F_\theta'}{F_\theta},$$

где  $F_a$ ,  $F_b$  и  $F_\theta$  — площадь отдельных элементов профиля. Выражая площадь каждого элемента профиля как произведение длины средней линии на толщину, получаем

$$\frac{(l_a - \Delta l_a) h'}{l_a h} = \frac{(l_b - \Delta l_b) h'}{l_b h} = \frac{(l_\theta - \Delta l_\theta) h'}{l_\theta h}$$

и, следовательно,

$$\frac{\Delta l_a}{l_a} = \frac{\Delta l_b}{l_b} = \frac{\Delta l_\theta}{l_\theta},$$

где  $l_a$ ,  $l_b$ ,  $l_\theta$  — длина средних линий элементов профиля;

$\Delta l_a$ ,  $\Delta l_b$ ,  $\Delta l_\theta$  — уширение средних линий элементов профиля.

Такой вывод подтверждается исследованием уширения средних линий на ряде профилей (см. табл. 1).

Таким образом, независимо от формы профиля, прокатка которого возможна в развернутых калибрах, расчет калибровки может быть выполнен по уравнению, определяющему длину средней линии, в сочетании с определенным соотношением коэффициентов высотных деформаций в элементах развернутого калибра.

## АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА КАЛИБРОВКИ ВАЛКОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ СИСТЕМ РАЗВЕРНУТЫХ КАЛИБРОВ

Аналитический метод расчета калибровки валков разработан на основе исследования процессов формоизменения металла в элементах развернутого калибра.

### Калибровка угловой стали

Существует несколько способов калибровки угловой стали, представленных на рис. 25.

Калибровки, основанные на сгибании прямых полок (рис. 25, а), считаются устаревшими и в настоящее время

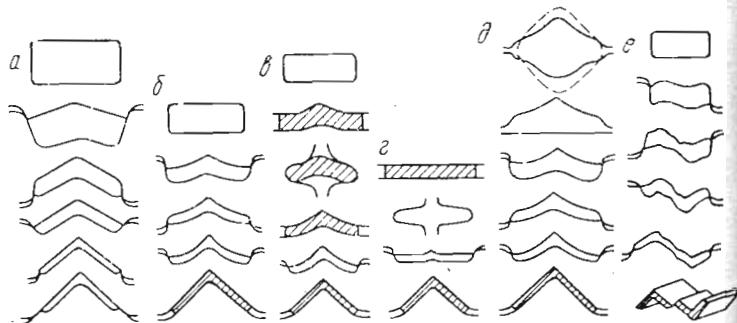


Рис. 25. Способы калибровки угловой стали

не применяются, так как в этом случае формы калибров требуют глубокого вреза в валки, что приводит к ослаблению их прочности. Кроме того, увеличивается трение и искажаются кромки полок, что ухудшает внешний вид готового профиля. Прокатка угловой стали в закры-

тых калибрах с развернутыми полками (рис. 25, б) не имеет указанных недостатков. По этому способу возможно усиление обжатий, что сокращает количество проходов. Кроме того, уменьшаются врезы калибров в валки и трение в калибрах. Все это повышает технико-экономические показатели стана.

Калибровка угловой стали с применением открытых и ребровых калибров (рис. 25, в, г) имеет перед другими калибровками некоторые преимущества: регулировкой ширины полосы можно исключить образование заусенцев, а следовательно, и закатов на профиле; использование одних и тех же калибров для прокатки нескольких смежных размеров угловой стали сокращает парк и расход валков.

К недостаткам калибровки угловой стали со свободным уширением следует отнести некоторые затруднения при настройке стана, связанные с более точной установкой вводящей арматуры, а также возможные колебания ширины полок по длине раската в открытых калибрах.

Калибровка со свободным уширением успешно применяется на полуинерционных и непрерывных станах, оборудованных вертикальными клетями для прокатки средних и малых размеров угловой стали. Это позволяет контролировать ширину полок в ребровых калибрах. Калибровка, приведенная на рис. 25, г является усовершенствованной калибровкой со свободным уширением в сторону увеличения развертывания полок и использования его преимуществ. Применение этой калибровки встречает значительные затруднения при задаче сильно развернутой полосы в чистовой калибр.

Для прокатки равнобокой угловой стали используют калибровку по диагональному методу (рис. 25, д). Здесь квадратная заготовка задается в первый проильный калибр на ребро (на диагональ), что позволяет использовать для получения нужного профиля заготовку меньшего размера. Эту схему прокатки применяют также в тех случаях, когда необходимо получить кромки профиля из углов заготовки (литка) для обеспечения более высокого их качества.

К недостаткам диагонального метода следует отнести: затруднения, связанные с задачей заготовки на ребро, так как задаваемая заготовка находится в неустойчивом положении; увеличение общего коэффициента де-

формации в фасонных калибрах; увеличение обрези от переднего и заднего концов полосы.

В. Вашичек [12] предложил метод получения угловой стали посредством разрезания в чистовом калибре зетового профиля на две части (рис. 25, е). Это позволяет удвоить производительность прокатного стана. Одним из недостатков указанного метода является получение заусенцев при продольной разрезке полосы в чистом калибре.

Схему калибровки в каждом отдельном случае выбирают в зависимости от конструкции прокатного стана, для которого проектируется данная калибровка.

Общий коэффициент деформации принимают, исходя из условий выполнения угла при вершине профиля. На практике установлено, что для получения хорошего выполнения вершины прямого угла на готовом профиле необходимо брать толщину заготовки, задаваемой в первый профильный калибр, в 4—6 раз больше максимальной толщины готового профиля. Чем больше толщина заготовки, тем лучше выполняется вершина прямого угла на готовом профиле. Однако чрезмерное увеличение толщины заготовки потребует увеличения числа профильных калибров. Поэтому чаще всего берут толщину заготовки в 6—8 раз больше толщины полки готового профиля. Принятый общий коэффициент деформации распределяется по проходам согласно общим правилам калибровки:

В чистовых калибрах:

для профилей больших размеров	1,10—1,15
для средних и мелких профилей	1,1—1,25

В черновых калибрах:

для профилей больших размеров	1,4—1,6
для средних и мелких профилей	1,6—2,0

Число фасонных калибров, определяемое коэффициентами деформации, находится обычно в пределах 5—7. Для мелких размеров угловой стали можно иметь 4 фасонных калибра. Для расчета принимаем схему калибровки согласно рис. 25, б.

## Конструкция и расчет чистового калибра

В чистовом калибре (рис. 26) производится, помимо обжатия, выпрямление полок прокатываемой полосы. Поэтому конструкция чистового калибра должна обеспечить надежный захват развернутой полосы и полу-

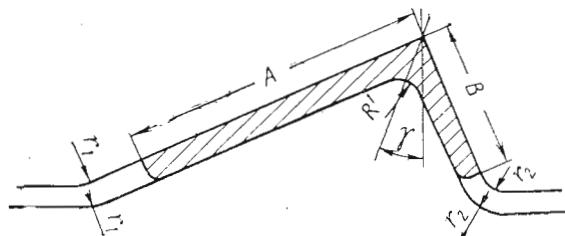


Рис. 26. Чистовой калибр для неравнобокой угловой стали

ние качественного проката. В чистовом калибре для равнобокой угловой стали биссектриса совпадает с вертикалью. Для предотвращения захвата полосы буртами верхнего вала предусмотрены закругления. Толщина полок в чистовом калибре обычно равна минимальной толщине полок прокатываемого профиля. Чистовые калибры выполняют открытыми, закрытые калибры способствуют образованию «усов» на готовом профиле, затрудняют настройку стана, что ведет к потере его производительности. Длина полок калибра обычно равняется номинальной длине полки готового профиля плюс 10—15% на свободное уширение и закругление буртов.

Для неравнобокой угловой стали построение чистового калибра подобно равнобокой угловой стали, но здесь биссектриса прямого угла может располагаться как вертикально, так и наклонно (рис. 26). При вертикальном расположении биссектрисы прямого угла калибра получаются неравные вертикальные проекции полок, ведущие к созданию значительных осевых усилий в валах, к восприятию которых обычные прокатные клети не приспособлены. Это ведет к искажению размеров готового профиля. Поэтому применяют такое расположение чи-

стового неравнобокого калибра угловой стали, которое исключает возникновение осевых усилий в валках; это возможно при равных вертикальных проекциях обеих полок. Тогда биссектриса прямого угла располагается под углом  $\gamma$  к вертикали (см. рис. 26). Угол  $\gamma$  определяется из соотношения

$$\operatorname{tg}(45 + \gamma) = \frac{A}{B},$$

где  $A$  и  $B$  — соответственно длины большой и малой полок угольника.

Расчет чистового калибра на горячий профиль не производят, поскольку он является открытым для уширения полок, а толщина полок свободно регулируется в широких пределах раздвижением валков по вертикали для равнобокой и по наклонной биссектрисе для неравнобокой угловой стали. Для этого в крайних буртах валков предусматривают необходимые зазоры. Радиусы закругления буртов калибра верхнего валка

$$r_1 = (0,1 \div 0,15)B; r_2 = (0,15 \div 0,2)A.$$

#### Конструкция и расчет развернутых черновых калибров для угловой стали

Конструкция развертки полок определяется: углами раскрытия полок  $\alpha$  и  $\beta$ , высотой калибра  $H$  и радиусами  $R_a$  и  $R_b$  (рис. 27). В предчистовом калиbre угол развертки полок  $\varphi = 90^\circ$ . Угол наклона биссектрисы относительно вертикали  $\gamma$  постоянен для всех калибров.

В предчистовом калиbre для угловой стали большое

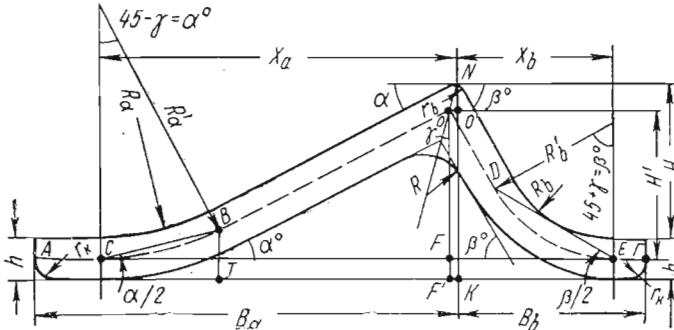


Рис. 27. Развернутый черновой калибр для неравнобокой угловой стали

значение имеет выбор высоты  $H$  и радиусов  $R_a$  и  $R_b$ . Установлено, что с увеличением общей высоты калибра и уменьшением радиусов развертки полок возрастает устойчивость профиля и становится меньше смещение угла при прокатке в чистовом калибре. Кроме того, увеличение общей высоты калибра ведет к увеличению сил трения и, следовательно, ослаблению прочности валков. Имеющиеся данные [1—6] позволяют рекомендовать следующие соотношения для высоты калибра и радиусов развертывания полок:

для равнобокой угловой стали

$$H = (0,4 \div 0,45)A; R = (0,8 \div 1)A$$

и для неравнобокой угловой стали

$$H = (0,4 \div 0,45) \frac{A+B}{2}; R_a = (1 \div 1,1)A;$$

$$R_b = (0,7 \div 0,8)B.$$

Согласно зависимости (9), составляем уравнение средних линий малой и большой полок развернутого калибра:

для большой полки

$$A - \frac{h'}{2} + 0,014A = AC + CB + \Delta A + BO; \quad (15)$$

для малой полки

$$B - \frac{h'}{2} + 0,014B = FE + ED + DO + \Delta B, \quad (15a)$$

где  $A$  и  $B$  — соответственно длины больших и малой полок,

$0,014A$  и  $0,014B$  — соответственно поправки длин большой и малой полок на размер профиля в горячем состоянии.

Уширение большой и малой полок  $n$ -ном калибре соответственно равно:

$$\Delta A_n = \Delta A_1 + \Delta A_2 + \Delta A_3 + \dots + \Delta A_{n-1}; \quad (16)$$

$$\Delta B_n = \Delta B_1 + \Delta B_2 + \Delta B_3 + \dots + \Delta B_{n-1}. \quad (17)$$

Уравнениями (15), (15a) можно пользоваться только в случае графического расчета калибра.

Для аналитического расчета калибра определяем горизонтальные проекции полок  $B_a$  и  $B_b$  (см. рис. 27).

Координату  $x_a$  находим из соотношения

$$x_a = CT + F'T + F'K. \quad (18)$$

Согласно рис. 27,

$$CT = R'_a \sin \alpha; \quad F'T = \frac{OF}{\tan \alpha};$$

$$FF' = 2R'_a \sin^2 \frac{\alpha}{2}; \quad F'K = ON \sin \gamma.$$

Таким образом, из уравнения (18) имеем

$$x_a = R'_a \sin \alpha + H' - 2R'_a \sin \frac{\alpha}{2} + 0,707h \sin \gamma.$$

Следовательно,

$$x_a = \left( R_a + \frac{h}{2} \right) \sin \alpha + \\ + \frac{H + \frac{h}{2} - 0,707 \cos \gamma h - 2 \left( R_a + \frac{h}{2} \right) \sin^2 \frac{\alpha}{2}}{\tan \alpha} + 0,707h \sin \gamma,$$

где второй член дает величину проекции прямого участка полки  $OB$ , т. е.

$$F'T = m.$$

Совершенно аналогичное выражение получаем для координаты  $x_b$  из соотношения:

$$x_b = ET' + F'K;$$

$$x_b = \left( R_b + \frac{h}{2} \right) \sin \beta + \\ + \frac{H + \frac{h}{2} - 0,707h \cos \alpha - 2 \left( R_b + \frac{h}{2} \right) \sin^2 \frac{\beta}{2}}{\tan \beta} - 0,707h \sin \gamma,$$

причем определяющим углом является не угол  $\alpha$ , а угол  $\beta$ . Проекцию большой полки определяем из уравнения

$$B_a = x_a + AC.$$

Участок  $AC$  определяем из уравнения (15):

$$AC = A - \frac{h'}{2} \cdot \Delta A + 0,014A - OB - CB,$$

где дуга  $CB$  — кривая часть средней линии большой полки — равна:

$$CB = \frac{\pi \left( R_a + \frac{h}{2} \right) \alpha}{180},$$

а

$$OB = \frac{F'T}{\cos \alpha} = \frac{m}{\cos \alpha} = n.$$

Следовательно,

$$AC = A - \frac{h'}{2} - \Delta A - n - \frac{\pi \left( R_a + \frac{h}{2} \right) \alpha}{180}.$$

Тогда

$$B_a = x_a + A - \frac{h'}{2} - \Delta A + 0,014A - n - \frac{\pi \left( R_a + \frac{h}{2} \right) \alpha}{180}.$$

Аналогично определяем проекцию малой полки из выражения

$$B_b = x_b + EG.$$

В результате упрощения полученных формул имеем для большой полки

$$B_a = 1,014A - \frac{h'}{2} - \Delta A + \left[ H + \frac{h}{2} - 0,707h \cos \gamma - 2 \left( R_a + \frac{h}{2} \right) \sin^2 \frac{\alpha}{2} \right] \left( \frac{1}{\tan \alpha} - \frac{1}{\sin \alpha} \right) - \frac{\pi \left( R_a + \frac{h}{2} \right) \alpha}{180} + \left( R_a + \frac{h}{2} \right) \sin \alpha + 0,707h \sin \gamma; \quad (19)$$

для малой полки

$$B_b = 1,014B - \frac{h'}{2} - \Delta B + \left[ H + \frac{h}{2} - 0,707h \cos \gamma - 2 \left( R_b + \frac{h}{2} \right) \sin^2 \frac{\beta}{2} \right] \left( \frac{1}{\tan \beta} - \frac{1}{\sin \beta} \right) - \frac{\pi \left( R_b + \frac{h}{2} \right) \beta}{180} + \left( R_b + \frac{h}{2} \right) \sin \beta - 0,707h \sin \gamma. \quad (20)$$

Для равнобокой угловой стали  $\gamma=0$ ,  $\alpha=\beta$  и  $B_a=B_b$ . Тогда выражение для определения проекции полки будет иметь вид:

$$B = 1,014 - \frac{h'}{2} - \Delta A + \left[ H + \frac{h}{2} - 2 \left( R + \frac{h}{2} \right) \sin^2 \frac{\alpha}{2} \right] \times \\ \times \left( \frac{1}{\tan \alpha} - \frac{1}{\sin \alpha} \right) - \frac{\pi \left( R + \frac{h}{2} \right) \alpha}{180} + \left( R + \frac{h}{2} \right) \sin \alpha. \quad (21)$$

Уравнения (19) — (21) справедливы для определения горизонтальных проекций полок любого развернутого калибра угловой стали. При определении горизонтальных проекций полок развернутых калибров угловой стали в этих уравнениях параметры  $A$ ,  $B$ ,  $R_a$ ,  $R_b$ ,  $R$ ,  $\gamma$ ,  $h'$  — постоянные, т. е. они остаются неизменными для любого развернутого калибра. Другие параметры  $\Delta A$ ,  $\Delta B$ ,  $h$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $H$  являются переменными и определяются каждый по отдельному уравнению.

Уширение средних линий полок ( $\Delta A$  и  $\Delta B$ ) определяется по формуле (8) с последующей разбивкой его пропорционально длинам полок:

$$\Delta A = \frac{A}{A+B} \left[ \left( 1 + \frac{\Delta h}{H} \right) \left( f \sqrt{R \Delta h} - \frac{\Delta h}{2} \right) \frac{\Delta h}{H} + k_1 k_2 \frac{\sqrt{R \Delta h}}{h_{cp}} \right]; \quad (21a)$$

$$\Delta B = \frac{B}{A+B} \left[ \left( 1 + \frac{\Delta h}{H} \right) \left( f \sqrt{R \Delta h} - \frac{\Delta h}{2} \right) \frac{\Delta h}{H} + k_1 k_2 \frac{\sqrt{R \Delta h}}{h_{cp}} \right], \quad (21b)$$

где  $A$  и  $B$  — длины полок;

$\Delta h$  — обжатие полки;

$H$  — толщина полки, задаваемой в калибр;

$f = k'_1 k'_2 k'_3 (1,05 - 0,0005t)$  — коэффициент трения;

где

$R$  — катящий радиус валков;

$R_n$  — номинальный радиус валков;

$k_1$  — коэффициент стеснения уширения, принимается 0,6—0,8;

$$h_{cp} = \frac{H+h}{2}$$

$k_2$  — коэффициент, учитывающий размер угловой стали. Для малых размеров  $k_2 = 0,7 - 0,8$ ; для средних размеров  $k_2 = 1,0$ , для крупных размеров  $k_2 = 1,2$ .

Толщина полки  $h$  по калибрам изменяется согласно принятым частным коэффициентам высотной деформации.

Углы раскрытия полок  $\alpha$  и  $\beta$  изменяются от калибра к калибру пропорционально обжатиям и определяются по уравнениям (10), (11), где

$$\alpha_2 = 45 - \gamma,$$

$$\beta_n = \beta_2 - (\Delta \beta_2 + \Delta \beta_3 + \dots + \Delta \beta_{n-1}),$$

здесь

$$\beta_2 = 45 + \gamma; \quad \Delta \beta_n = \frac{\beta_2}{\Sigma \Delta h} \Delta h_n.$$

Высота калибра  $H$  изменяется по проходам пропорционально обжатиям и определяется по формулам (12), (13);

для равнобокой угловой стали  $H_2 = (0,4 \div 0,45) A$ ;

для неравнобокой угловой стали  $H_2 = (0,4 \div 0,45) \frac{A+B}{2}$ .

Радиус закругления вершины развернутого калибра

$$r_v = n - 1, \quad (22)$$

где  $n$  — порядковый номер калибра.

Радиусы закруглений с внутренней стороныстыка полок предварительно рассчитываются по формуле Бахтинова

$$R' = R \eta + \Delta h, \quad (23)$$

где  $R'$  — радиус перегиба полок в расчетном калибре;

$R$  — радиус перегиба полок в предыдущем калибре.

Величина  $R$  проверяется и корректируется по формуле

$$\eta_p - \eta_y = c,$$

где  $\eta_p$  и  $\eta_y$  — коэффициенты высотной деформации соответственно в полках и углах профиля.

Радиусы закругления концов полок определяем по формуле Бахтинова. В калибрах, имеющих разъем снизу, радиус закругления принимают больше радиуса предыдущего (по ходу расчета) калибра на величину обжатия, т. е.

$$r' = r + \Delta h. \quad (24)$$

В калибрах, имеющих разъем сверху, радиус закругления следует принимать равным или немного больше обжатия в предыдущем калибре, т. е.

$$r' \geq \Delta h. \quad (25)$$

Площадь калибров для угловой стали определяется по формуле Штернова

$$F \approx 1,02(l_{cp\ a} + l_{cp\ b})h,$$

где  $l_{cp\ a}$  и  $l_{cp\ b}$  — длины средних линий большой и малой полок. Нейтральная линия калибра определяется аналитически [8].

#### *Прокатка разных толщин одного и того же номера угловой стали*

Для малых номеров равнобокой угловой стали предусматривается два размера полок по толщине и до 7 толщин полок для больших номеров (ГОСТ 8509—57). Для неравнобокой угловой стали (ГОСТ 8510—57) соответственно предусматривается от двух до четырех толщин полок каждого номера.

Наилучшие условия для прокатки создаются тогда, когда для каждой толщины угловой стали имеются отдельные черновые калибры. Но это связано с увеличением парка волков и простоев стана из-за переплавок. Поэтому группируют по несколько толщин полок и рассчитывают для них отдельно предчистовые, а иногда и черновые калибры.

Чем больше толщина полки одного и того же номера угловой стали, тем короче его средняя линия. Это в свою очередь, как следует из уравнений (19) — (21), приводит к необходимости иметь для профилей с большой толщиной полок предчистовые калибры меньшей ширины. Обычно в каждом предчистовом калибре прокаты-

вается не более трех разных толщин данного номера угловой стали. При этом расчет калибра ведется на среднюю толщину полки. В последующем черновом калибре иногда также прокатывают по две-три толщины профи-

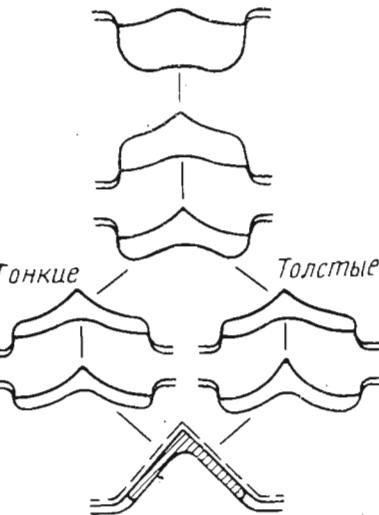


Рис. 28. Схема прокатки нескольких толщин угловой стали в одной калибровке валков

ля угловой стали, а в остальных черновых калибрах — до четырех разных толщин (рис. 28). В этом случае при прокатке тонкого профиля полки должны получаться несколько меньше, а при прокатке толстых — несколько больше номинальных размеров. Эти отклонения должны получаться в пределах, допускаемых ГОСТом на данный размер угловой стали.

#### *Калибровка для прокатки угловой стали со свободным уширением*

Эта калибровка производится в основном тем же способом, что и со стесненным уширением в закрытых калибрах. Здесь важно правильно выбрать общую схему прокатки, увязав ее с конструкцией стана. Чаще всего

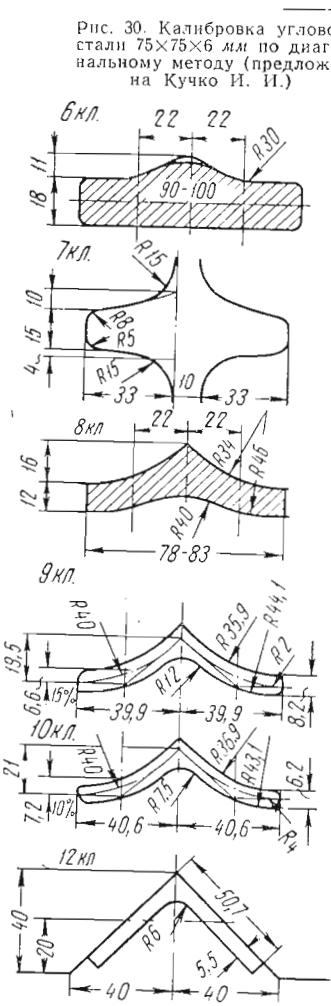
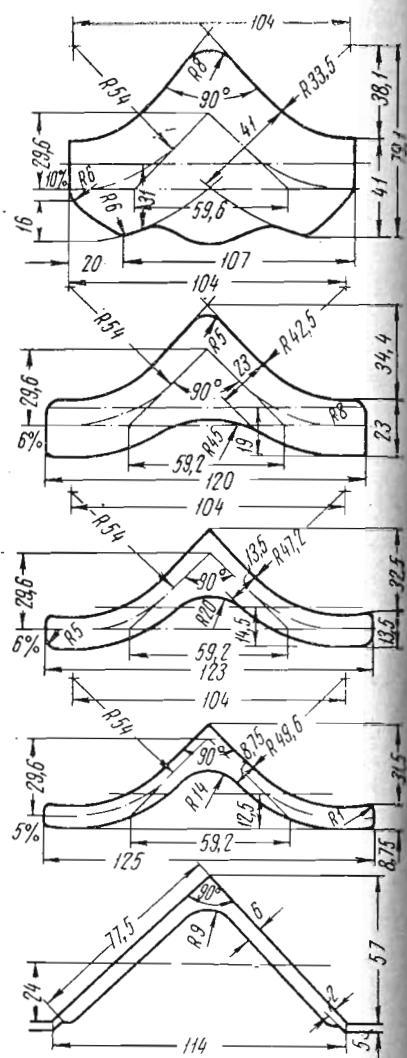


Рис. 29. Калибровка угловой стали 50×50×5÷6 мм с использованием калибров со свободным уширением



калибровки со свободным уширением применяют на непрерывных станах для прокатки малых размеров угловой стали. Пример использования калибров со свободным уширением для получения угловой стали приведен на рис. 29.

Для предупреждения изменения размеров полосы, поступающей в чистовой калибр, предчистовой, а иногда два или три калибра, предшествующие чистовому, выполняют закрытыми. Чем больше в калибровке закрытых калибров, тем легче происходит настройка на профиль и устойчивее работает стан, но тем в меньшей степени используются преимущества калибров со свободным уширением. Устройство целой серии (более двух) открытых калибров затрудняет контроль ширины и симметричности профиля из-за изменения уширения. Для успешной работы калибровки со свободным уширением надо правильно расположить ребровые калибры. Необходимо, чтобы последний по ходу прокатки ребровой калибр, в целях лучшего контроля ширины, был расположен возможно ближе или предшествовал закрытым калибрам, окончательно определяющим ширину профиля. Ребровые калибры должны не сгибать, а лишь обжимать полки профиля по ширине. Поэтому последний по ходу прокатки ребровой калибр должен находиться не ближе номера 1У от чистового калибра. Чем больше ширина полок готового профиля и чем они тоньше, тем дальше от конца прокатки должен быть последний ребровой калибр. По этой причине калибровки со свободным уширением очень редко применяются для прокатки крупных размеров угловой стали.

### Калибровка угловой стали, предусматривающая задачу заготовки в диагональном положении

Возможны два варианта калибровки по этому методу:

1) обычная калибровка со стесненным уширением в развернутых калибрах с задачей в первый профильный калибр ромбической или сходной с ней по форме полосы. При этом в целях увеличения устойчивости задаваемого ромба, первые один-два калибра калибровки корректируются. Ширина первых профильных калибров находится графическим путем, посредством построения необходи-

мой длины средней линии полок. Угол раскрытия полок первых двух профильных калибров и тупой угол задаваемого ромба по возможности берут одинаковыми или близкими между собой. Размеры ромбического калибра находят конструктивно;

2) прокатка угловой стали из квадратной заготовки с постоянной высотой и постоянным углом развертки полок, равным  $90^\circ$  во всех калибрах. В отличие от обычной калибровки со стесненным уширением, здесь, как и в первом случае, первый профильный калибр корректируется с целью более устойчивой прокатки квадратной заготовки. Конструкция калибров, рассчитанных по этому принципу, представлена на рис. 30.

Калибровка по диагональному методу для неравнобокой угловой стали, вследствие недостаточно устойчивого положения заготовки в первом профильном калиbre, применяется редко.

*Пример расчета калибровки  
неравнобокой угловой стали 125×80×8 мм  
для стана 600*

Расчет производится против хода прокатки. Принимаем 7 проходов.

**Чистовой калибр**

Углы наклона биссектрисы прямого угла  $\gamma$  и раскрытия полок  $\alpha$  и  $\beta$ :

$$\operatorname{tg}(45 - \gamma) = \frac{A}{B} = \frac{125}{80} = 1,564; \quad \gamma = 12,33^\circ;$$

$$\alpha = 90^\circ - (45^\circ + 12,33^\circ) = 32,67^\circ;$$

$$\beta = 90^\circ - (45^\circ - 12,33^\circ) = 57,33^\circ.$$

Остальные размеры чистового калибра особого расчета не требуют и принимаются конструктивно (рис. 31).

**Развернутые черновые калибры**

Принимаем следующие коэффициенты высотной деформации полок по проходам: 1,22; 1,33; 1,44; 1,50; 1,50; 1,55; 1,40. Определяем параметры развернутых калибров:

$$H_2 = 0,44 \frac{125 + 80}{2} = 45 \text{ мм}; \quad R_a = 0,72 \cdot 125 = 90 \text{ мм};$$

$$R_b = 0,7 \cdot 80 = 56 \text{ мм.}$$

Величины обжатий, катающих радиусов, средних толщин раскатов по калибрам берем из табл. 3 (см. стр. 70).

Уширение средних линий полок рассчитываем по формулам (21 а) и (21 б), где коэффициенты  $k_1=1$ ,  $k_2=0,7$

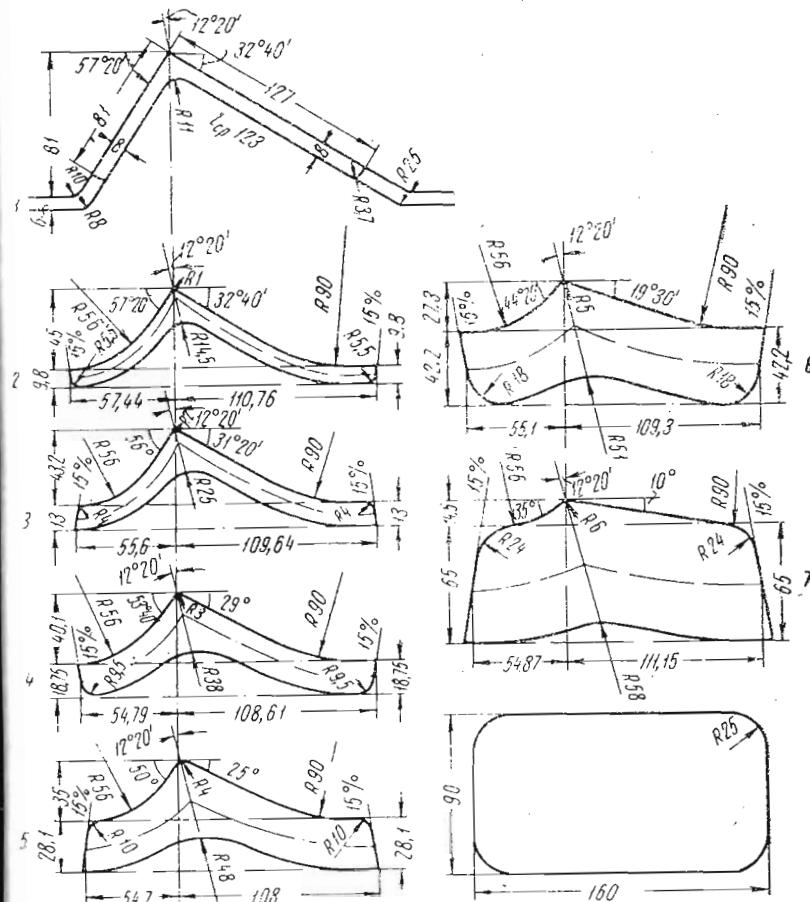


Рис. 31. Калибровка угловой стали 125×80×8 мм

(30 % стеснения уширения для развернутых калибров, в чистовом калибре  $k_2=1$ ).

**Калибр I:**

$$\Delta A + \Delta B = \left(1 + \frac{1,8}{9,8}\right) \left(0,35 \sqrt{296 \cdot 1,8} - \frac{1,8}{2}\right) \frac{1,8}{9,8} +$$

$$+ \frac{V\sqrt{296 \cdot 1,8}}{8,9} = 4,14 \text{ мм};$$

$$\Delta A = \frac{125}{(125+80)} \cdot 4,14 = 2,52 \text{ мм};$$

$$\Delta B = \frac{80}{125+80} \cdot 4,14 = 1,62 \text{ мм}.$$

Калибр II:

$$\begin{aligned}\Delta A + \Delta B &= \left(1 + \frac{3,2}{13}\right) \left(0,34 V\sqrt{295 \cdot 3,2} - \frac{3,2}{2}\right) \frac{3,2}{13} + \\ &+ 0,7 \cdot \frac{V\sqrt{295 \cdot 3,2}}{11,4} = 4,4 \text{ мм};\end{aligned}$$

$$\Delta A = \frac{125}{125+80} \cdot 4,4 = 2,7 \text{ мм}; \quad \Delta B = \frac{80}{125+80} \cdot 4,4 = 1,7 \text{ мм}.$$

Калибр III:

$$\begin{aligned}\Delta A + \Delta B &= \left(1 + \frac{5,75}{18,75}\right) \left(0,33 V\sqrt{293,5 \cdot 5,75} - \frac{5,75}{2}\right) \frac{5,75}{18,75} + \\ &+ 0,7 \frac{V\sqrt{293,5 \cdot 5,75}}{15,87} = 6,06 \text{ мм};\end{aligned}$$

$$\Delta A = \frac{125}{125+80} \cdot 6,06 = 3,3 \text{ мм}; \quad \Delta B = \frac{80}{125+80} \cdot 6,06 = 2,36 \text{ мм}$$

и т. д.

Высоту калибра по проходам рассчитываем по уравнениям (12), (13).

Высота калибра убывает от калибра к калибру пропорционально обжатиям:  
калибр II

$$H_2 = 0,44 \frac{125+80}{2} = 45 \text{ мм};$$

калибр III

$$H_3 = 45 - \frac{45}{82,2} \cdot 3,2 = 43,2 \text{ мм};$$

калибр IV

$$H_4 = 43,2 - \frac{45}{82,2} \cdot 5,75 = 40 \text{ мм}$$

и т. д.

Углы раскрытия полок определяли по уравнениям (10), (11), при этом угол  $\gamma$  постоянен для всех калибров.

Калибр II: углы раскрытия берем такие же, как и в чистовом калибре, т. е.  $\alpha_2 = 32,67^\circ$ ;  $\beta_2 = 57,34^\circ$ .

Калибр III:

$$\alpha_3 = 32,67^\circ - \frac{32,67^\circ}{82,2} \cdot 3,2 = 31,33^\circ;$$

$$\beta_3 = 57,33^\circ - \frac{32,67^\circ}{82,2} \cdot 3,2 = 56^\circ.$$

Калибр IV:

$$\alpha_4 = 31,55^\circ - \frac{32,67^\circ}{82,2} \cdot 5,75 = 29^\circ;$$

$$\beta_4 = 56^\circ - \frac{32,67^\circ}{82,2} \cdot 5,75 = 53,67^\circ.$$

и т. д.

Горизонтальные проекции полок рассчитывали по уравнениям (19), (20).

Калибр II:

$$\begin{aligned}B_a &= 1,014 \cdot 125 - \frac{8}{2} - 2,52 + \left[ 45 + \frac{9,8}{2} - \right. \\ &\left. - 0,707 \cdot 9,8 \cdot 0,977 - 2 \left( 90 + \frac{9}{8} \right) 0,0784 \right] \left( \frac{1}{0,64} - \frac{1}{0,54} \right) - \\ &- \frac{3,14 \left( 90 + \frac{9,8}{2} \right) 32,67^\circ}{180} + \left( 90 + \frac{9,8}{2} \right) \times \\ &\times 0,54 + 0,707 \cdot 9,8 \cdot 0,2136 = 110,76 \text{ мм}.\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}B_b &= 1,014 \cdot 80 - \frac{8}{2} - 1,62 + \left[ 45 + \frac{9,8}{2} - \right. \\ &\left. - 0,707 \cdot 9,8 \cdot 0,977 - 2,0 \left( 56 + \frac{9,8}{2} \right) 0,23 \right] \left( \frac{1}{1,56} - \frac{1}{0,841} \right) - \\ &- \frac{3,14 \left( 56 + \frac{9,8}{2} \right) 57,33^\circ}{180} + \left( 56 + \frac{9,8}{2} \right) 0,84 - \\ &- 0,707 \cdot 9,8 \cdot 0,21 = 57,44 \text{ мм}.\end{aligned}$$

### Калибр III:

$$B_a = 1,014 \cdot 125 - \frac{8}{2} - (2,52 + 2,7) + \\ + \left[ 43,2 + \frac{13}{2} - 0,707 \cdot 13 \cdot 0,977 - 2 \left( 90 + \frac{13}{2} \right) 0,729 \right] \times \\ \times \left( \frac{1}{0,61} - \frac{1}{0,52} \right) - \frac{3,14 \left( 90 + \frac{13}{2} \right) 31,33^\circ}{180} + \\ + \left( 90 + \frac{13}{2} \right) 0,52 + 0,707 \cdot 13 \cdot 0,21 = 109,64 \text{ мм};$$

$$B_b = 1,014 \cdot 80 - \frac{8}{2} - (1,62 + 1,7) + \left[ 43,2 + \frac{13}{2} - \right. \\ \left. - 0,707 \cdot 13 \cdot 0,977 - 2 \left( 56 + \frac{13}{2} \right) 0,22 \right] \left( \frac{1}{1,482} - \frac{1}{0,829} \right) - \\ - \frac{3,14 \left( 56 + \frac{13}{2} \right) 56}{180} + \left( 56 + \frac{13}{2} \right) 0,829 - \\ - 0,707 \cdot 13 \cdot 0,2136 = 55,6 \text{ мм}$$

И т. д.

### Расчет заготовки, задаваемой в первый профильный калибр

Ширина заготовки определяется из уравнений (19), (20), где все углы и радиусы равны нулю:

#### Параметры калибровки для прокатки неравнобокой (заготовка $h_0 \times b_0$ )

Номер калибра (против хода прокатки)	$\eta$	$h, \text{мм}$	$\Delta B_a, \text{мм}$	$B_a, \text{мм}$	$\alpha, \text{град.}$	$\Delta B_b, \text{мм}$	$B_b, \text{мм}$
I	1,22	8,0	2,52			1,62	
II	1,33	9,8	2,70	110,76	32,6	1,70	57,44
III	1,44	13,0	3,30	109,64	31,3	2,36	55,60
IV	1,50	18,7	4,15	108,61	29,0	2,70	54,80
V	1,50	28,1	4,20	108,00	25,0	2,68	54,70
VI	1,55	42,2	4,30	109,30	19,5	2,77	55,10
VII	1,40	65,5	3,00	111,15	10,0	1,90	54,87

$$B_a = 1,014 \cdot 125 - \frac{8}{2} - (21,57 + 3) = 98,4 \text{ мм};$$

$$B_b = 1,014 \cdot 80 - \frac{8}{2} - (13,83 + 1,9) = 61,39 \text{ мм}.$$

Общая ширина заготовки

$$B = B_a + B_b = 98,4 + 61,39 = 159,79 \text{ мм}.$$

Итак, принимаем заготовку размером 92×160 мм.

### Расчет радиусов закруглений полок

Радиусы перегиба полок определяют графически, для чего из выражения (14) получают разность коэффициентов обжатий в полках и углах по проходам. Затем получают коэффициенты высотных деформаций в вершинах углов. По найденным коэффициентам высотных деформаций находят отрезки биссектрис углов перегиба полок по калибрам. После этого путем подбора радиуса скругляют кривые очертаний нижних сторон полок с концом биссектрисы угла. Принятые коэффициенты высотных деформаций в углах калибров и полках приведены в табл. 3, а конструкция закруглений перегибов полок на рис. 31.

Радиусы закруглений вершин углов калибров определяют из выражений (22), а концов полок снизу — из уравнения (25), сверху — по уравнению (24).

Результаты расчетов параметров калибровки угловой стали 125×80×8 мм приведены в табл. 3 и на рис. 31.

Таблица 3

угловой стали 125×80×8 мм на стане 600  
92×160 мм)

$\beta, \text{град.}$	$H, \text{мм}$	$\eta_y$	$R_K, \text{мм}$	$\frac{l_d}{h_{\text{ср}}}$	$r_b, \text{мм}$	$r_k, \text{мм}$	$R, \text{мм}$	$F, \text{мм}^2$	$\lambda$
—	—	1,22	296,0	2,59	0	3,7	11,0	1 600	1,21
57,3	45,0	1,31	295,1	2,69	1	3,5	14,5	1 960	1,30
56,0	43,2	1,33	293,5	2,58	2	4,0	25,0	2 540	1,40
53,6	40,0	1,32	290,6	2,22	3	9,5	38,0	3 540	1,45
50,0	35,0	1,22	286,0	1,80	4	10,0	48,0	5 120	1,45
44,3	27,3	1,31	279,0	1,50	5	18,0	51,0	7 400	1,46
35,0	14,5	1,29	267,3	1,07	6	24,0	58,0	10 800	1,29

## Калибровка зетовой стали

Подобно угловой стали, калибровка зетовой стали рассчитывается методом уравнений длин средних линий и определенным соотношением коэффициентов высотных деформаций в элементах профиля.

### Расчет и конструирование чистового калибра (рис. 32, а)

Калибр конструируется открытым без ограничения уширения, подобно тому, как это делается при калибровке угловой стали. Ширина стенки рассчитывается на размер в горячем состоянии, т. е.

$$h_1 = 0,014h.$$

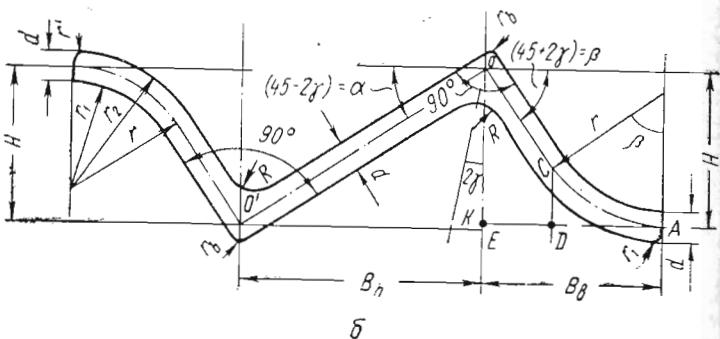
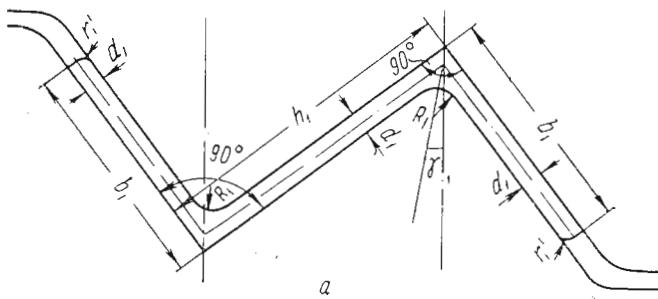


Рис. 32. Конструкция развернутых калибров зетовой стали

Угол отклонения биссектрисы от вертикали  $\gamma$  определяется из выражения

$$\operatorname{tg}(45 + \gamma) = \frac{h}{b}. \quad (26)$$

Радиусы закруглений принимают по готовому профилю. Общую ширину калибра определяют конструктивно. В валках чистовой и черновой клетей при прокатке зетовых профилей возникают значительные осевые усилия. Для компенсации сдвига валков устраивают опорные конусы с уклоном 10—15 %. Осевые усилия в валках приводят к утонению стенки, поэтому в чистовых калибрах толщину стенки растачивают на плюсовой допуск.

Остальные параметры чистового калибра представлены на рис. 32, а.

### Расчет и конструирование развернутых черновых калибров

Для калибра II (рис. 32, б) принимаем высоту калибра

$$H_2 = (0,6 \div 0,65)b,$$

где  $b$  — ширина полки готового профиля.

Угол раскрытия полки

$$\beta_2 = 45^\circ + 2\gamma.$$

Угол раскрытия стенки

$$\alpha_2 = 45^\circ - 2\gamma.$$

Другие параметры развернутых калибров определяем расчетным путем. Согласно уравнению (9), составляем уравнение средней линии полки (рис. 32, б):

$$b + 0,014b - \frac{d}{2} - \Delta b_n = AC + CO,$$

где

$$AC = \frac{\pi \beta}{180}; \quad CO = \frac{OK}{\cos(90 - \beta)};$$

$$OK = H - CD; \quad CD = r - r \cos \beta = r(1 - \cos \beta)$$

или

$$OK = H - r(1 - \cos \beta);$$

$$CO = \frac{H - r(1 - \cos \beta)}{\cos(90 - \beta)}.$$

Уравнение средней линии полки принимает вид

$$b + 0,014b - \Delta b_n = \frac{\pi\beta}{180} + \frac{H - r(1 - \cos\beta)}{\cos(90 - \beta)}. \quad (27)$$

Из этого уравнения определяем

$$r = \frac{1,014b - \frac{d_1}{2} - \Delta b_n - \frac{H}{\cos(90 - \beta)}}{\frac{\pi\beta}{180} - \frac{1 - \cos\beta}{\cos(90 - \beta)}}. \quad (28)$$

Радиусы развертки граней:  
верхней полки

$$r_1 = r - \frac{d}{2}; \quad (29)$$

нижней

$$r_2 = r + \frac{d}{2}. \quad (30)$$

Горизонтальная проекция средней линии полки

$$B_b = r \sin\beta + [H - r(1 - \cos\beta)] \tan(90^\circ - \beta). \quad (31)$$

Горизонтальную проекцию средней линии стенки определяют из уравнения средней линии стенки:

$$OO' = h + 0,014h - \Delta h_n.$$

Из треугольника  $EOO'$  имеем

$$B_h = OO' \cos\alpha,$$

или

$$B_h = (1,014h - \Delta h_n) \cos\alpha. \quad (32)$$

Вертикальную проекцию определяем из выражений:

$$OE = (1,014h - \Delta h_n) \sin\alpha, \quad (33)$$

$$\Delta b_n = \Delta b_1 + \Delta b_2 + \Delta b_3 + \dots + \Delta b_{n-1}, \quad (34)$$

где  $\Delta b_n$  — сумма уширений средних линий полок в предыдущих калибрах;

$\Delta h_n$  — сумма уширений средних линий стенок в предыдущих калибрах, т. е.

$$\Delta h_n = \Delta h_1 + \Delta h_2 + \Delta h_3 + \dots + \Delta h_{n-1}. \quad (35)$$

Уравнения (26) — (35) справедливы для любого чернового калибра зетовой стали, где  $\Delta h_n$ ,  $\Delta b$ ,  $\beta$ ,  $H$  являются переменными величинами.

Уширения средних линий полок и стенок ( $\Delta b_n$  и  $\Delta h_n$ ) определяются по формуле (8). При этом общее уширение распределяется пропорционально размерам полок и стенки в готовом профиле, т. е.

$$\Delta h = \frac{h}{2b+h} \left[ \left( 1 + \frac{\Delta d}{H'} \right) \left( f \sqrt{R\Delta d} - \frac{\Delta d}{2} \right) \frac{\Delta d}{H'} + k_1 k_2 \frac{\sqrt{R\Delta d}}{h_{cp}} \right]; \quad (36)$$

$$\Delta b = \frac{b}{2b+h} \left[ \left( 1 + \frac{\Delta d}{H'} \right) \left( f \sqrt{R\Delta d} - \frac{\Delta d}{2} \right) \frac{\Delta d}{H'} + k_1 k_2 \frac{\sqrt{R\Delta d}}{h_{cp}} \right]. \quad (37)$$

Высота калибра изменяется по проходам пропорционально обжатиям и определяется по формулам (12), (13), т. е.

$$H_n = H_2 - (\Delta H_2 + \Delta H_3 + \dots + \Delta H_{n-1}), \quad (38)$$

где

$$H_2 = (0,6 \div 0,65) b,$$

а

$$\Delta H_n = \frac{H_2}{\Sigma \Delta d} \Delta d_n. \quad (39)$$

Углы раскрытия полок  $\beta$  и стенки  $\alpha$  изменяются от калибра к калибру пропорционально обжатиям полок и стенки и определяются по уравнениям (10), (11), т. е.

$$\alpha_n = \alpha_2 - (\Delta \alpha_2 + \Delta \alpha_3 + \dots + \Delta \alpha_{n-1}), \quad (40)$$

где

$$\alpha_2 = 45 - 2\gamma;$$

$$\Delta \alpha_n = \frac{\alpha_2}{\Sigma \Delta d} \Delta d_n; \quad (41)$$

$$\beta_n = \beta_2 - (\Delta \beta_2 + \Delta \beta_3 + \dots + \Delta \beta_{n-1}), \quad (42)$$

где

$$\beta_2 = 45^\circ + 2\gamma$$

и

$$\Delta \beta_n = \frac{\beta_2}{\Sigma \Delta d} \Delta d_n.$$

Угол  $\gamma$  для всех калибров постоянный.  
Радиус закругления вершин углов

$$r_b = n - 1,$$

где  $n$  — порядковый номер калибра.

Радиус закругления в месте соединения полки со стенкой предварительно рассчитывается по уравнению

$$R = R' \eta + \Delta d,$$

где  $R'$  — радиус скругления в предыдущем калибре;

$R$  — искомый радиус скругления;

$\eta$  — коэффициент высотной деформации в данном калибре;

$\Delta d$  — обжатие в данном калибре.

После этого величина  $R$  проверяется и корректируется по следующему уравнению:

$$\eta_{\text{п.с}} - \eta_y = c,$$

где  $\eta_{\text{п.с}}$ ,  $\eta_y$  — коэффициенты высотных деформаций по полке со стенкой и в углах профиля.

Закругления концов полок определяют по формуле Бахтинова. В калибрах, имеющих разъем со стороны, где на готовом профиле имеется закругление; радиус закругления принимают равным обжатию, увеличенному на радиус закругления в чистовом калибре, т. е.

$$r' = r + \Delta d.$$

С противоположных сторон радиус закругления следует принимать равным или немного больше величины обжатия в предыдущем калибре, т. е.

$$r' \geq \Delta d.$$

Площадь зетовых калибров определяют по формуле Штернова

$$F \approx 1,02(2l_{\text{ср.п}} + l_{\text{ср.с}})d,$$

где  $l_{\text{ср.п}}$  и  $l_{\text{ср.с}}$  — длины средних линий полки и стенки,  
 $d$  — толщина профиля.

Нейтральную линию калибра определяют аналитически [8].

Коэффициенты высотной деформации в калибрах зетовой стали определяют так же, как и в калибрах угловой стали. Для средних и крупных профилей принимают 5—7 проходов, для мелких 4.

Пример расчета калибровки зетовой стали № 8  
для стана 500 (рис. 33, табл. 4)

Примем следующие коэффициенты обжатий полок и стенок для калибров: I—1,25; II—1,35; III—1,45; IV—1,55; V—1,60; VI—1,60.

Калибр I (чистовой)  
Ширина стенки

$$h_1 = 80 \cdot 1,014 = 81,1 \text{ мм};$$

ширина полки

$$b_1 = 65 \cdot 1,014 = 66 \text{ мм.}$$

Угол наклона биссектрисы прямого угла к вертикали ( $\gamma$ ) определяется из выражения

$$\operatorname{tg}(45^\circ + \gamma) = \frac{80}{65}; \quad \gamma = 50^\circ - 45^\circ = 5^\circ.$$

Уширение средней линии стенки

$$\Delta h_1 = \frac{80}{80 + 65 \cdot 2} \left[ \left( 1 + \frac{1,5}{7,5} \right) \left( 0,35 \sqrt{1,5 \cdot 247} - \frac{1,5}{2} \right) \frac{1,5}{7,5} + \right. \\ \left. + \frac{\sqrt{1,5 \cdot 247}}{6,75} \right] = 1,63 \text{ мм.}$$

Уширение средней линии полки

$$\Delta b_1 = \frac{65}{80 + 65 \cdot 2} \left[ \left( 1 + \frac{1,5}{7,5} \right) \left( 0,35 \sqrt{1,5 \cdot 247} - \frac{1,5}{2} \right) \frac{1,5}{7,5} + \right. \\ \left. + \frac{\sqrt{1,5 \cdot 247}}{6,75} \right] = 1,33 \text{ мм.}$$

Калибр II

Угол наклона средней линии стенки к горизонтали

$$\alpha_2 = 45^\circ - 2 \cdot 5^\circ = 35^\circ.$$

Угол наклона средней линии полки к вертикали

$$\beta_2 = 45^\circ + 2 \cdot 5^\circ = 55^\circ.$$

Высота калибра

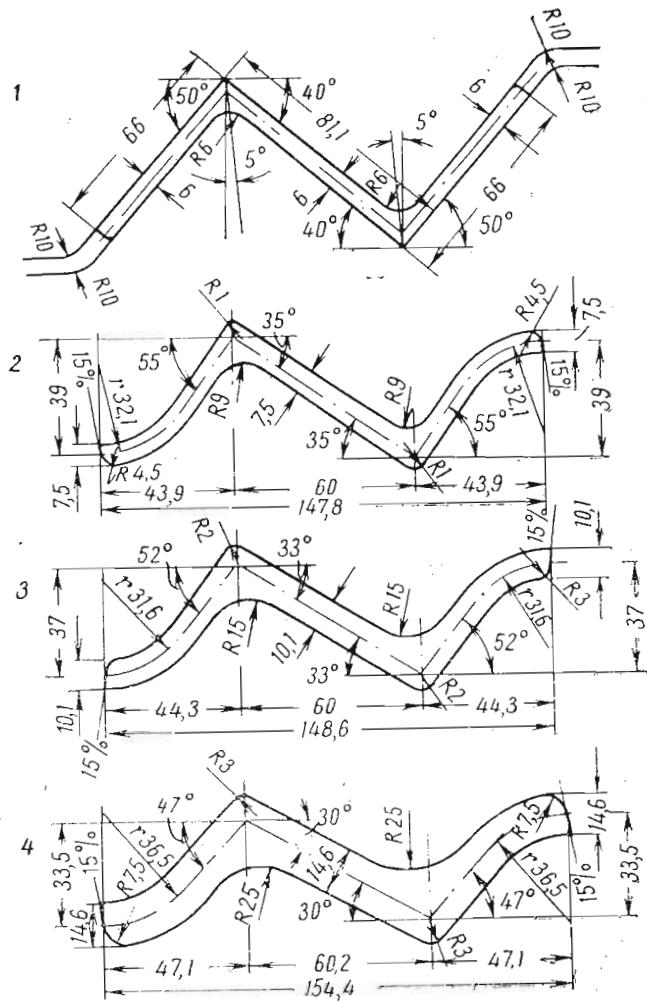
$$H_2 = 0,6 \cdot 65 = 39 \text{ мм.}$$

Горизонтальная проекция средней линии стенки

$$B_{h_2} = (1,014 \cdot 80 - 6 - 1,63) \cos 35^\circ = 60 \text{ мм.}$$

Радиус развертывания средней линии полки

$$r_2 = \frac{1,014 \cdot 65 - \frac{6}{2} - 1,33 - \frac{3,9}{\cos(90 - 55)^\circ}}{\frac{3,14 \cdot 55}{180} - \frac{1 - \cos 55^\circ}{\cos(90 - 55)^\circ}} = 32,1 \text{ мм.}$$



Горизонтальная проекция средней линии полки

$$B_b = 32,1 \sin 55^\circ + [39 - 32,1(1 - \cos 55^\circ)] \times \tan(90 - 55)^\circ = 43,9 \text{ мм.}$$

Уширение средней линии стенки

$$\Delta h_2 = \frac{80}{80 + 65 \cdot 2} \left[ \left( 1 + \frac{2,6}{10,1} \right) \left( 0,34 \sqrt{2,6 \cdot 246,2} - \frac{2,6}{2} \right) \times \left( \frac{2,6}{10,1} + 0,8 \frac{\sqrt{2,6 \cdot 246,2}}{8,9} \right) \right] = 1,75 \text{ мм.}$$

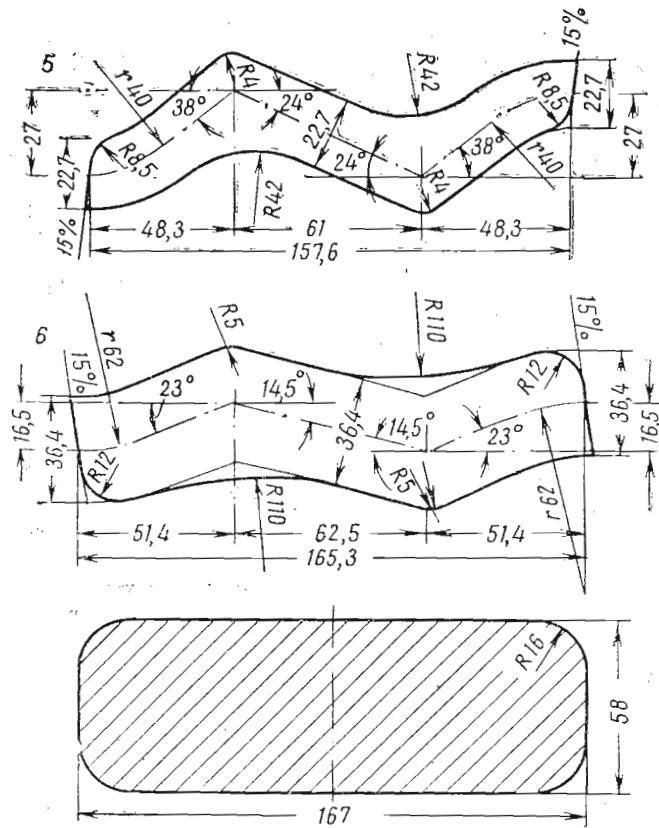


Рис. 33. Калибровка зетовой стали № 8

Таблица 4

## Параметры калибровки для прокатки зетовой стали № 8

Номер калибра (против хода прокатки)	$\eta$	$d$	$\Delta h, \text{мм}$	$B_h, \text{мм}$	$\alpha, \text{град.}$	$\Delta b, \text{мм}$	$B_b, \text{мм}$
I	1,25	6,0	1,63	—	—	1,33	—
II	1,35	7,5	1,75	60,0	35,0	1,43	43,9
III	1,45	10,1	2,15	60,0	33,0	1,75	44,3
IV	1,55	14,6	2,56	60,2	30,0	2,08	47,1
V	1,60	22,7	2,37	61,0	24,0	1,93	48,3
VI	1,60	36,4	2,50	62,5	14,5	2,03	51,4
VII							

Уширение средней линии полки

$$\Delta b_2 = \frac{65}{80 + 65 \cdot 2} \left[ \left( 1 + \frac{2,6}{10,1} \right) \left( 0,34 \sqrt{2,6 \cdot 246,2} - \frac{2,6}{2} \right) \frac{2,6}{10,1} + 0,8 \frac{\sqrt{2,6 \cdot 246,2}}{8,9} \right] = 1,43 \text{ мм}$$

и т. д.

Итак, размеры заготовки:

Высота 58 мм (табл. 4),

ширина  $B_7 = 64,6 - 2,5 + (54,48 - 2,03) = 167 \text{ мм}$ .

Конструкция калибров приведена на рис. 33.

Результаты расчетов параметров калибровки зетовой стали № 8 приведены в табл. 4 и на рис. 33.

## Калибровка швеллеров

Существуют три метода калибровки швеллеров:

1) балочный, при котором используют общие черновые калибры для прокатки балок и швеллеров;

2) калибровка швеллеров с открытыми фланцами при увеличенных выпусках;

3) калибровка швеллеров с применением систем развернутых калибров.

При балочном методе калибровки достигается использование общих черновых калибров для прокатки балок и швеллеров, что уменьшает номинальный парк валков.

Недостатком балочного метода является то, что боль-

стане 500 (заготовка  $h_0 \times b_0 = 58 \times 167 \text{ мм}$ )

$\beta, \text{град.}$	$r, \text{мм}$	$r_1, \text{мм}$	$r_2, \text{мм}$	$H, \text{мм}$	$R_K, \text{мм}$	$\eta_y$	$\frac{t_d}{h_{\text{ср}}}$	$F, \text{мм}$	$\lambda$
—	—	—	—	—	247,0	1,22	2,85	1230	1,22
55	32,1	23,3	35,8	39,0	246,2	1,32	2,82	1500	1,31
52	31,6	26,6	36,6	37,0	245,0	1,35	2,70	1980	1,40
47	36,5	29,2	43,8	33,5	242,7	1,35	2,38	2780	1,49
38	40,0	28,6	51,3	27,0	238,7	1,35	1,77	4160	1,55
23	62,0	43,8	80,2	16,5	231,8	1,30	1,50	6440	1,46

шие обжатия ложных фланцев в черновых калибрах вызывают неравномерную деформацию всего профиля и увеличивают расход энергии при прокатке. Применение калибров с малым выпуском (не более 3%) приводит к быстрой выработке калибров по ширине, что ведет к большому расходу прокатных валков.

Калибровка швеллеров с открытыми фланцами при увеличенных выпусках уменьшает съем стружки по диаметру бочки валков при переточках и допускает, по сравнению с балочным методом, более энергичное обжатие во всех черновых калибрах, что сокращает число проходов при прокатке.

К недостаткам данного метода следует отнести наличие глубоких врезов в калибрах, ограничивающих прочность валка и возможность интенсификации процесса прокатки. Наличие большой разности в катающих диаметрах по сечению калибра приводит к увеличению выработки калибров и увеличению расхода энергии на прокатку.

Все указанные недостатки устранены в методе калибровки швеллеров с применением развернутых калибров, который имеет следующие преимущества: возможность интенсификации процесса деформации металла; сокращение числа фасонных калибров; возможность прокатки швеллера по минусовым допускам; при переточках валков калибры восстанавливаются полностью по шаблонам; снижение степени износа калибров за счет уменьшения разности окружных скоростей по сечению калибра; более

равномерный режим деформации металла в различных элементах калибра; значительно меньший расход прокатных валков; увеличение производительности стана за счет сокращения числа перевалок валков и настроек стана.

К недостаткам метода калибровки швеллеров с применением развернутых калибров можно отнести лишь некоторое затруднение при задаче развернутой полосы в калибр, где происходит ее свертывание. Однако на производительность стана это практически не влияет.

В последнее время для прокатки швеллеров начали применять чистовые калибры с выпуском наружных граней полок до 10—15%. Это улучшает поверхность полок, позволяет прокатать профиль на минусовые допуски, уменьшает расход валков.

В настоящее время балочный метод калибровки швеллеров почти не применяется. Большое распространение имеет метод калибровки швеллеров в открытых фланцах с увеличенными выпусками. Метод калибровки с применением систем развернутых калибров начинает внедряться в производство и вытесняет два первых.

Прокатка швеллера с применением систем развернутых калибров осуществляется, подобно прокатке угловой стали, посредством постепенного обжатия и сгибания элементов его из прямоугольной заготовки. При этом наряду с гибкой, элементы профиля получаются и за счет формоизменения (штампований). Элементы штампований преобладают в основном в первых по ходу прокатки калибрах. Элементы гибки профиля особенно ярко выражены в последних калибрах. Однако в любом развернутом калибре имеют место гибка и штампованием.

Будут рассмотрены два типа калибровок швеллеров с применением развернутых калибров: калибровка с контрольным калибром и без контрольного калибра.

Применение контрольного калибра гарантирует получение полок профиля определенной ширины, что особенно важно при внедрении калибровки с применением развернутых калибров. Однако наличие калибра с прямыми полками требует глубоких врезов ручьев в валки, которые уменьшают прочность валков, повышают трение в калибре и требуют устройства буртов сравнительно больших диаметров.

## Калибровка швеллера без применения контрольного калибра

Каждый развернутый калибр швеллера представляет как бы соединение двух развернутых калибров угловой стали. Чистовой калибр также развернут за счет изгиба стенки, обычно уклон неизогнутых полок к вертикали составляет 10—15%. Свертывание прокатанного профиля осуществляется в холодном состоянии на ролико-правильной машине по обычной технологии правки.

### Выбор коэффициентов деформации

В целях получения готового профиля с хорошо выполненным вершинами углов рекомендуется толщину заготовки принимать не менее, чем в 8—10 раз больше средней толщины готового профиля:

$$H = (8 \div 10) \left( \frac{t + d}{2} \right),$$

где  $H$  — толщина заготовки;

$t$  — толщина полки по средней части;

$d$  — толщина стенки.

Коэффициенты высотной деформации рекомендуется брать для черновых калибров аналогичными с черновыми калибрами угловой стали, а для чистового калибра несколько меньше коэффициента высотной деформации для чистового калибра угловой стали:

Калибр	Коэффициент высотной деформации
Чистовой:	
большие размеры . . .	1,07—1,10
средние и малые размеры	1,10—1,15
Черновой:	
большие размеры . . .	1,3—1,6
средние и малые размеры	1,4—2,0

Количество фасонных калибров для мелких размеров швеллера берется 4—5, для средних и крупных 5—7, для особо крупных размеров до 9 калибров.

Расчет и конструирование чистового калибра производится, согласно заданным размерам профиля (рис. 34, а). Выпуск наружных граней полок устанавливается 10—15% за счет изгиба стенки.

Место изгиба стенки оформляется радиусом, равным ширине стенки ( $R=h$ ). Размеры полок и стенки рассчитываются с учетом усадки профиля при остывании.

На рис. 34, б показан чистовой развернутый калибр с выпуском полок 10–15%. В отличие от угловой стали,

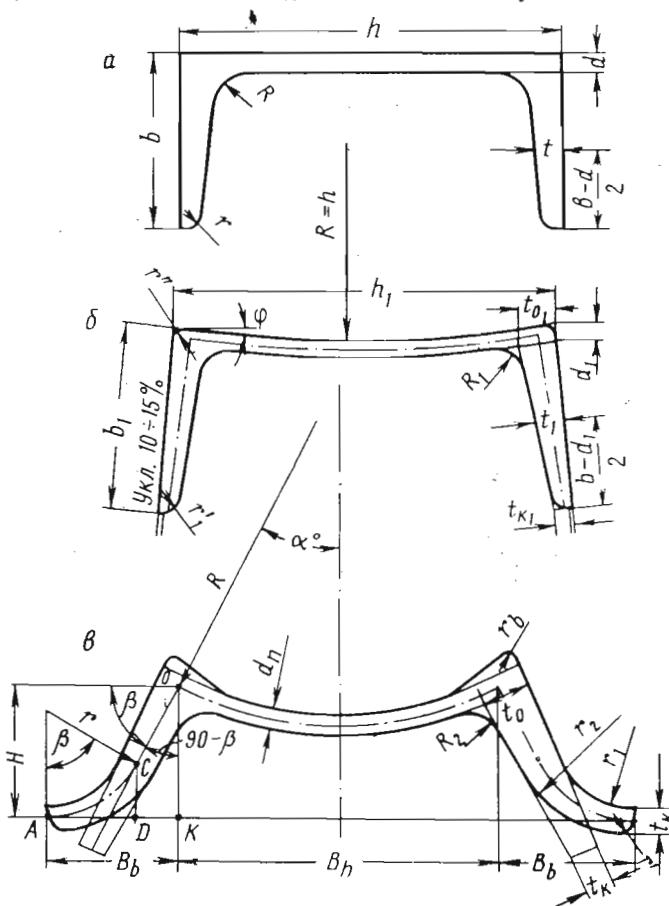


Рис. 34. Конструкция развернутых швеллерных калибров без контрольного калибра

чистовой швеллерный калибр имеет ограниченное уширение полок, поскольку, как показала практика прокатки швеллеров, без ограничения уширения возможны колеба-

ния ширины полок, выходящие за пределы допусков. Обычно ширина полок в калибре устанавливается близкой к плюсовому допуску, чтобы предупредить выход ширины полок за плюсовой предел.

#### Ширина полки

$$b_1 = 1,014b + 0,75T,$$

где

$T$  — допустимое положительное отклонение по ширине полки; радиусы закруглений

$$R_1 = R; r_1 = r; R' = h;$$

ширина стенки

$$h_1 = 1,014h \cos \varphi.$$

#### Расчет и конструирование черновых калибров

Конструкция развертки полок и стенки определяется следующими параметрами: углом раскрытия полок  $\beta$ , высотой калибра  $H$ , углом развертки средней линии стенки  $\alpha$ , радиусом развертки средней линии полки  $r$  и радиусом развертки средней линии стенки  $R$  (рис. 34, в). В отличие от калибровки угловой стали,  $r$  — переменный радиус, а  $R$  — постоянный радиус для всех черновых калибров. Все другие параметры калибров — переменные.

На основе проверенных на практике данных для первого развернутого швеллерного калибра (предчистового) принимаются следующие параметры: высота калибра  $H_2 = (0,6—0,65)b$ ; угол развертки полки  $\beta_2 = 65^\circ$ ; радиус развертки стенки  $R = 1,25h$ .

Другие параметры развернутых калибров определяются расчетным путем.

Согласно зависимости (9), составляем уравнение средней линии полки (рис. 34, в):

$$b - \frac{d'}{2} + 0,014b - \Delta b_n = AC + CO, \quad (43)$$

где

$$AC = \frac{\pi r \beta}{180}; \quad CO = \frac{OK}{\cos(90 - \beta)};$$

$$OK = H - CD; \quad CD = r - r \cos \beta^\circ = r(1 - \cos \beta).$$

или

или

$$OK = H - r(1 - \cos \beta),$$

тогда

$$CO = \frac{H - r(1 - \cos \beta)}{\cos(90 - \beta)}.$$

Выражение (43) принимает вид

$$b - \frac{d'}{2} + 0,014b - \Delta b_n - \frac{\pi \beta}{180} + \frac{H - r(1 - \cos \beta)}{\cos(90 - \beta)}, \quad (44)$$

откуда

$$r = \frac{1,014b - \frac{d'}{2} - \Delta b_n - \frac{H}{\cos(90 - \beta)}}{\frac{\pi \beta}{180} - \frac{1 - \cos \beta}{\cos(90 - \beta)}}, \quad (45)$$

где  $b$  — ширина полки;

$d'$  — толщина стенки;

$\Delta b_n$  — уширение полки в предыдущих калибрах:

$$\Delta b_n = \Delta b_1 + \Delta b_2 + \dots + \Delta b_{n-1}.$$

Радиусы развертки внутренней и внешней граней полок

$$r_1 = r - \frac{t_0 + t_k}{2}; \quad r_2 = r + \frac{t_0 + t_k}{2};$$

горизонтальная проекция средней линии полки

$$B_b = r \sin \beta + [H + r(1 - \cos \beta)] \operatorname{tg}(90 - \beta). \quad (46)$$

Угол развертывания средней линии стенки ( $\alpha$ ) определяется по уравнению средней линии стенки, составленному также на основании зависимости (9):

$$1,014h - \frac{t_0}{2} - \Delta h_n = \frac{\pi R \alpha}{90},$$

откуда

$$\alpha = \frac{90 \left( 1,014h - \frac{t_0}{2} - \Delta h_n \right)}{\pi R}. \quad (47)$$

Горизонтальная проекция средней линии стенки

$$R_h = 2R \sin \alpha, \quad (48)$$

где  $h$  — ширина стенки;

$t_0$  — толщина основания полки;

$\Delta h_n$  — уширение стенки в предыдущих калибрах.

Уширение для  $n$ -го калибра составляет

$$\Delta h_n = \Delta h_1 + \Delta h_2 + \dots + \Delta h_{n-1}.$$

Уравнения (45) — (48) справедливы для любого развернутого швейлерного калибра, где  $\Delta h_n$ ,  $\Delta b_n$ ,  $\beta^\circ$ ,  $r$ ,  $\alpha$  и  $H$  являются переменными величинами.

Уширение средней линии полок и стенки ( $\Delta b$  и  $\Delta h$ ) определяется по формуле (8). Полученная величина уширения распределяется пропорционально размерам полок и стенки по ширине, т. е.:

$$\Delta h = \frac{h}{2b+h} \left[ \left( 1 + \frac{\Delta h'_{cp}}{H} \right) \left( f \sqrt{R \Delta h'_{cp}} - \frac{\Delta h'_{cp}}{2} \right) \frac{\Delta h'_{cp}}{H} + k_1 k_2 \frac{\sqrt{R \Delta h'_{cp}}}{h_{cp}} \right]; \quad (49)$$

$$\Delta b = \frac{b}{2b+h} \left[ \left( 1 + \frac{\Delta h'_{cp}}{H} \right) \left( f \sqrt{R \Delta h'_{cp}} - \frac{\Delta h'_{cp}}{2} \right) \frac{\Delta h'_{cp}}{H} + k_1 k_2 \frac{\sqrt{R \Delta h'_{cp}}}{h_{cp}} \right], \quad (50)$$

где  $b$  и  $h$  — соответственно длины полок и стенки;

$$\Delta h'_{cp} = \frac{\Delta d + \Delta t}{2} — среднее обжатие полки и стенки,$$

где  $\Delta d$  и  $\Delta t$  — обжатие стенки и полки;

$$H = \frac{H_c + H_n}{2} — средняя толщина задаваемой заготовки;$$

где  $H_c$  и  $H_n$  — толщина стенки и полки задаваемой полосы;

$$f = k'_1 k'_2 k'_3 (1,05 - 0,0005 t^\circ) — коэффициент трения;$$

$$R = R_h - \frac{0,5(t+d)}{2} — катающий радиус (определеняется по средней толщине профиля),$$

где  $R_h$  — номинальный радиус валков стана;

$t$  — толщина полки;

$d$  — толщина стенки

$$h_{cp} = \frac{0,5(H_c + H_n) + 0,5(t+d)}{2};$$

$k_1$  — коэффициент стеснения уширения;  $k_1 = 0,6 \div 0,8$ ;  
 $k_2$  — коэффициент, учитывающий размер швеллера;  
для малых размеров  $k_2 = 0,7 \div 0,8$ ; для средних  
размеров  $k_2 = 1$ ; для крупных размеров  $k_2 = 1,2$ .

Углы раскрытия средних линий полок  $\beta$  изменяются от калибра к калибру пропорционально обжатиям полок и определяются по уравнениям (10), (11), т. е.

$$\beta_n = \beta_2 - (\Delta\beta_2 + \Delta\beta_3 + \dots + \Delta\beta_{n-1}), \quad (51)$$

где

$\beta_n$  — угол раскрытия полки в  $n$ -ном калибре;

$\beta_2$  — угол раскрытия полки во втором калибре (принимается конструктивно равным  $65^\circ$ );

$\Delta\beta_2, \Delta\beta_3, \dots, \Delta\beta_{n-1}$  — соответственно приращение углов раскрытия полок во 2, 3.... ( $n-1$ )-ном калибрах.

$\Delta\beta_n = \frac{\beta_2}{\sum \Delta t} \Delta t_n$  — приращение угла раскрытия полки в  $n$ -ном калибре.

$\Sigma \Delta t$  — сумма обжатий полок во всех развернутых (исключая чистовой) калибрах;

$\Delta t_n$  — обжатие полки в  $n$ -м калибре.

Высота калибра изменяется по проходам пропорционально обжатиям и определяется подобно углам раскрытия полок по формулам (12), (13):

$$H_n = H_2 - (\Delta H_2 + \Delta H_3 + \dots + \Delta H_{n-1}), \quad (52)$$

где

$$H_2 = (0,6 \div 0,65)b;$$

$$\Delta H_n = \frac{H_2}{\Sigma \Delta d} \Delta d_n, \quad (53)$$

где  $\Delta d_n$  — обжатие стенки в  $n$ -ном калибре.

Радиус закругления вершины угла

$$r_v = n, \quad (54)$$

где  $n$  — порядковый номер калибра.

Радиус закругления в месте соединения полки со стенкой с внутренней стороны

$$R' = R\eta_{cp}, \quad (55)$$

где  $R$  — радиус закругления в предыдущем калибре;  
 $\eta_{cp}$  — средний коэффициент высотной деформации в определяемом калибре.

### Ложные фланцы

По конструкции представляют собой своеобразную треугольную форму.

Основное назначение их — получение хорошего выполнения вершин углов на готовом профиле. Весь расчет ложных фланцев сводится к получению соотношения коэффициентов высотных деформаций в элементах развернутого швеллерного калибра по уравнению (14) и рис. 24.

Закругления концов полок определяются по формуле Бахтинова. В калибрах, имеющих закругления снизу, радиус закругления принимается больше радиуса чистового калибра на величину обжатия в предыдущем калибре, т. е.

$$r' = r_1 + \Delta t_k, \quad (56)$$

где  $\Delta t_k$  — обжатие конца полки.

В калибрах, имеющих закругления сверху, радиус закругления следует принимать равным или немного больше обжатия в предыдущем калибре, т. е.

$$r' \geq \Delta t_k. \quad (57)$$

Площадь швеллерных калибров определяется планиметрированием.

Нейтральная линия каждого калибра определяется по методу Литовченко [8].

### Расчет калибровки швеллера № 12 без применения в системе развернутых калибров контрольного калибра для стана 600 (рис. 35 и табл. 5)

Принимаем следующие коэффициенты высотных деформаций соответственно для полки и стенки калибра I—1,14; 1,14; II—1,30; 1,30; III—1,40; 1,47; IV—1,58; 1,65; V—1,70; 1,80; VI—1,50; 1,70; VII—1,42; 1,70.

Большая неравномерность деформации приходится на первые по ходу прокатки калибры, в которых металл имеет сравнительно высокую пластичность.

Таблица 5

Параметры калибровки для прокатки швеллера № 12  
(заготовка  $b_0 \times h_0 = 87 \times 159$  мм)

Номер калибра (против хода прокатки)	$\eta_c$	$d, \text{мм}$	$\Delta h, \text{мм}$	$B_h, \text{мм}$	$\alpha, \text{град.}$	$\eta_p$	$t, \text{мм}$	$\eta_{IK}$	$t_{IK}, \text{мм}$	$\eta_{to}$	$t_o, \text{мм}$	$\Delta b, \text{мм}$	$B_b, \text{мм}$	$\beta, \text{град.}$	$r, \text{мм}$	$H, \text{мм}$	$\Delta c, \text{мм}$	$R_K, \text{мм}$	$\eta_y$	$\frac{l_d}{h_{cp}}$	$F, \text{мм}^2$	$\lambda$
I	1,14	4,8	1,49	—	—	1,14	7,7	1,14	5,20	1,14	10,2	0,69	—	—	—	0,75	297,0	1,15	2,25	1330	1,12	
II	1,30	5,5	2,55	108,0	21,1	1,30	8,5	1,30	5,93	1,30	11,6	1,18	33,27	65,0	28,8	32	2,07	296,5	1,31	3,10	1490	1,27
III	1,47	7,1	3,54	105,5	20,6	1,40	11,0	1,45	7,70	1,35	15,0	1,63	32,50	63,0	27,8	31	3,93	295,5	1,25	3,10	1900	1,43
IV	1,65	10,5	4,92	102,6	20,0	1,58	15,5	1,68	11,20	1,48	20,3	2,27	33,00	59,0	27,7	29	7,90	293,5	1,43	2,82	2720	1,50
V	1,80	17,3	5,82	98,1	19,1	1,70	24,5	1,90	18,80	1,50	30,0	2,70	34,38	51,5	30,0	25	14,60	289,5	1,48	2,30	4080	1,60
VI	1,70	30,0	5,03	92,7	18,0	1,50	41,0	1,64	36,00	1,37	45,0	2,32	36,25	38,0	38,5	18	20,75	282,2	1,30	1,68	6530	1,45
VII	1,70	51,0	4,42	87,7	17,0	1,42	61,5	1,50	—	1,50	61,5	2,04	37,70	21,0	61,5	10	30,75	271,9	1,30	1,27	9500	1,41

### Чистовой калибр I

Выпуск наружных граней полок принимаем 10%. Радиус закругления изгиба стенки  $R=h=120$  мм. Ширина стенки  $1,014 \cdot 0,995 \cdot 120 = 121$  мм.

Ширина полки  $52 \cdot 1,014 + 1,5 = 54,2$  мм.

Толщины стенки и полок, а также все радиусы закругления принимаются номинальными по ГОСТ 8240—56.

Уширение стенки и полок определяется по формулам (49) — (50):  
уширение полки

$$\Delta b_1 = \frac{52}{120 + 52 \cdot 2} \left[ \left( 1 + \frac{0,75}{7} \right) \left( 0,4 \sqrt{0,75 \cdot 296,9} - \frac{0,75}{2} \right) \times \right. \\ \left. \times \frac{0,75}{7} + \frac{\sqrt{0,75 \cdot 296,9}}{6,62} \right] = 0,69 \text{ мм};$$

уширение стенки

$$\Delta h_1 = \frac{120}{120 + 52 \cdot 2} \left[ \left( 1 + \frac{0,75}{7} \right) \left( 0,4 \sqrt{0,75 \cdot 296,9} - \right. \right. \\ \left. \left. - \frac{0,75}{2} \right) \frac{0,75}{7} + \frac{\sqrt{0,75 \cdot 296,9}}{6,62} \right] = 1,49 \text{ мм.}$$

### Черновые калибры

#### Калибр II

Высота калибра  $H_2 = 0,615 \cdot 52 = 32$  мм; угол развертки средних линий полок  $\beta_2 = 65^\circ$ ; радиус развертки средней линии стенки  $R = 1,25 \cdot 120 = 150$  мм (постоянен для всех черновых калибров).

Радиус развертки полки определяем по формуле (45)

$$r_2 = \frac{1,014 \cdot 52 - \frac{4,8}{2} - 0,69 - \frac{32}{\cos(90-65)^\circ}}{\frac{3,14 \cdot 65}{180} - \frac{1 - \cos 65}{\cos(90-65)^\circ}} = 28,8 \text{ мм};$$

уширение стенки

$$\Delta h_2 = \frac{120}{120 + 52 \cdot 2} \left[ \left( 1 + \frac{2,07}{9,07} \right) \left( 0,39 \sqrt{2,07 \cdot 296,5} - \right. \right. \\ \left. \left. - \frac{2,07}{2} \right) \frac{2,07}{9,07} + 0,8 \frac{\sqrt{2,07 \cdot 296,5}}{8} \right] = 2,55 \text{ мм};$$

уширение полки

$$\Delta b_2 = \frac{52}{120 + 52 \cdot 2} \left[ \left( 1 + \frac{2,07}{9,07} \right) \left( 0,39 \sqrt{2,07 \cdot 296,5} - \right. \right. \\ \left. \left. - \frac{2,07}{2} \right) \frac{2,07}{9,07} + 0,8 \frac{\sqrt{2,07 \cdot 296,5}}{8} \right] = 1,18 \text{ мм.}$$

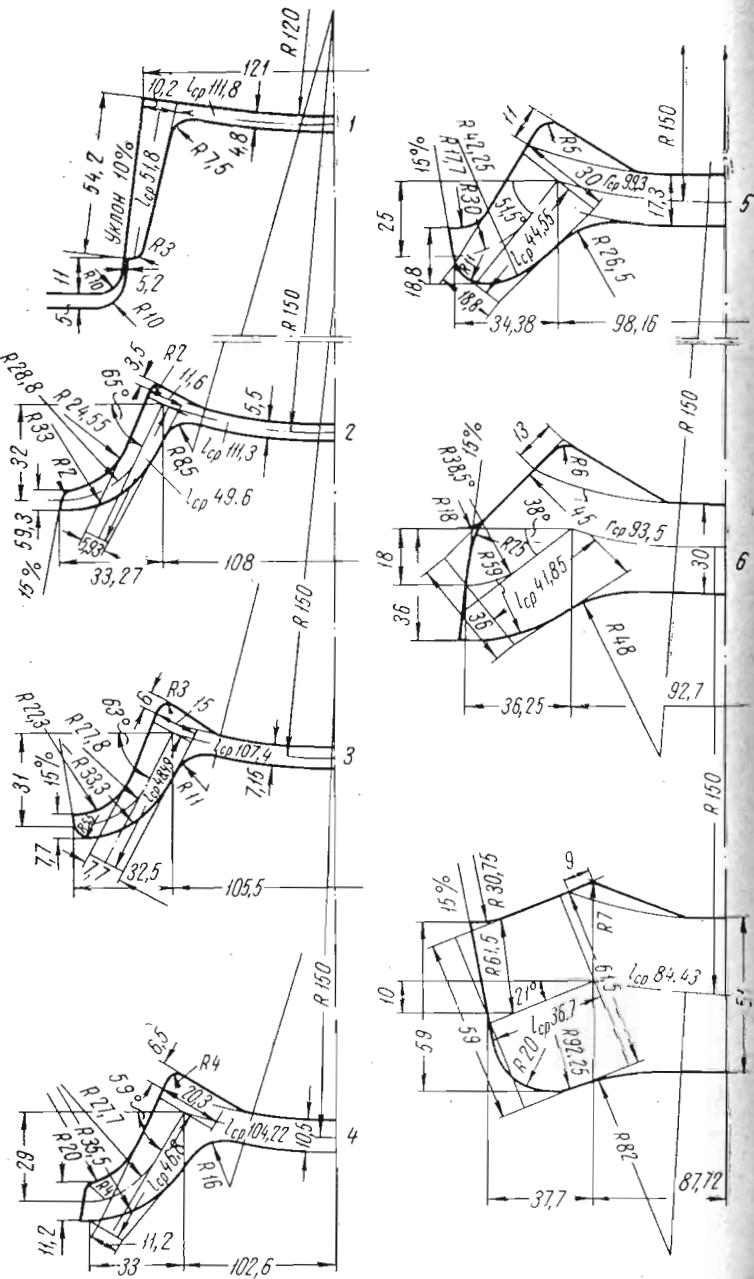


Рис. 35. Калибровка швейлера № 12 в системе развернутых калибров без применения контрольного калибра

Горизонтальную проекцию средней линии полки определяем по формуле (46):

$$B_b = 28,8 \cdot 0,906 + [32 - 28,8(1 - \cos 65^\circ)] \operatorname{tg}(90 - 65)^\circ = \\ = 33,27 \text{ мм};$$

угол развертки средней линии стенки определяем по формуле (47):

$$\alpha_2 = \frac{90(1,014 \cdot 120 - 10,2 - 1,49)}{3,14 \cdot 1,25 \cdot 120} = 21,15^\circ.$$

Горизонтальная проекция средней линии стенки определяется по формуле (48):

$$B_{h_2} = 2 \cdot 120 \cdot 1,25 \sin 21,15^\circ = 108 \text{ мм.}$$

Калибр III. Высоту калибра определяем по формуле (52):

$$H_3 = 32 - \frac{32}{78,5} \cdot 2,5 = 31 \text{ мм.}$$

Угол развертки средней линии полки определяем по формуле (51):

$$\beta_3 = 65 - \frac{65}{78,5} \cdot 2,5 = 63^\circ.$$

Уширение стенки

$$\Delta h_3 = \frac{120}{120 + 32 \cdot 2} \left[ \left( 1 + \frac{3,93}{13} \right) \left( 0,38 \sqrt{3,93 \cdot 295,5} - \frac{3,93}{2} \right) \frac{3,93}{13} + 0,8 \frac{\sqrt{3,93 \cdot 295,5}}{11} \right] = 3,54 \text{ мм};$$

уширение полки

$$\Delta b_3 = \frac{52}{120 + 52 \cdot 2} \left[ \left( 1 + \frac{3,93}{13} \right) \left( 0,38 \sqrt{3,93 \cdot 295,5} - \frac{3,93}{2} \right) \frac{3,93}{13} + 0,8 \frac{\sqrt{3,93 \cdot 295,5}}{11} \right] = 1,63 \text{ мм};$$

радиус развертки средней линии полки

$$r_3 = \frac{1,014 \cdot 52 - \frac{4,8}{2} - 1,87 - \frac{31}{\cos(90 - 63)^\circ}}{\frac{3,14 \cdot 63}{180} - \frac{1 - \cos 63^\circ}{\cos(90 - 63)^\circ}} = 27,8 \text{ мм};$$

горизонтальная проекция средней линии полки

$$B_{b_3} = 27,8 \cdot 0,891 + [31 - 27,8(1 - \cos 63^\circ)] \operatorname{tg}(90^\circ - 63^\circ) = 32,5 \text{ мм};$$

угол развертки средней линии стенки

$$\alpha_3 = \frac{90(1,014 \cdot 120 - 10,2 - 4,04)}{3,14 \cdot 1,25 \cdot 120} = 20,6^\circ;$$

горизонтальная проекция средней линии стенки

$$B_{h_3} = 2 \cdot 120 \cdot 1,25 \cdot 0,3518 = 105,5 \text{ мм.}$$

*Расчет размеров заготовки, задаваемой в профильный калибр I*

Ширину заготовки определяем из уравнения (9):

$$l_{\text{cp}_8} = l_{\text{cp}_7} - 2\Delta b_7 - \Delta h_7,$$

где  $l_{\text{cp}_8}$  — длина средней линии восьмого калибра, т. е. ширина заготовки;

$l_{\text{cp}_7}$  — длина средней линии седьмого калибра;  
 $\Delta h_7$ ,  $2\Delta b_7$  — уширение средней линии стенки и полок в седьмом калибре;

$$l_{\text{cp}_7} = 2l_{\text{cp.p.}} + l_{\text{cp.c.}},$$

где  $l_{\text{cp.p.}}$  — длина средней линии полки в калибре VII;  $l_{\text{cp.c.}}$  — то же для стенки;

$$l_{\text{cp.p.}} = 52 \cdot 1,014 - \frac{4,8}{2} = 10,79 = 39,53 \text{ мм};$$

$$l_{\text{cp.c.}} = 120 \cdot 1,014 - 10,2 = 22,44 = 88,45 \text{ мм};$$

$$l_{\text{cp.}} = 2 \cdot 39,53 + 88,45 = 167,5 \text{ мм};$$

$$l_{\text{cp}_8} = 167,5 - 2 \cdot 2,04 - 4,42 = 159 \text{ мм.}$$

Размеры заготовки составят  $159 \times 87$  мм.

Радиусы закруглений в месте соединения полки со стенкой с внешней стороны определяют по формуле (54), а с внутренней стороны по (55). Радиусы закруглений полок снизу определяют по формуле (56), сверху по (57). Результаты вычислений приведены на рис. 35 и в табл. 5.

Ложные фланцы конструируются треугольной формы, рассчитаны по формуле (14) и приведены на рис. 35.

### Калибровка швеллера с применением в системе развернутых калибров контрольного калибра (рис. 36, а—д)

Чистовой калибр I (рис. 36, б) рассчитывается так же, как и в калибровке швеллера без контрольного калибра.

Ширина полки

$$b_1 = 1,014 + 0,75T;$$

ширина калибра

$$h_1 = 1,014h \cos \varphi;$$

радиусы закруглений конца полки  $r'_1 = r$ ; в месте соединения полки со стенкой  $R_1 = R$ .

Общий и частные коэффициенты деформаций принимаются из калибровки швеллера без контрольного ка-

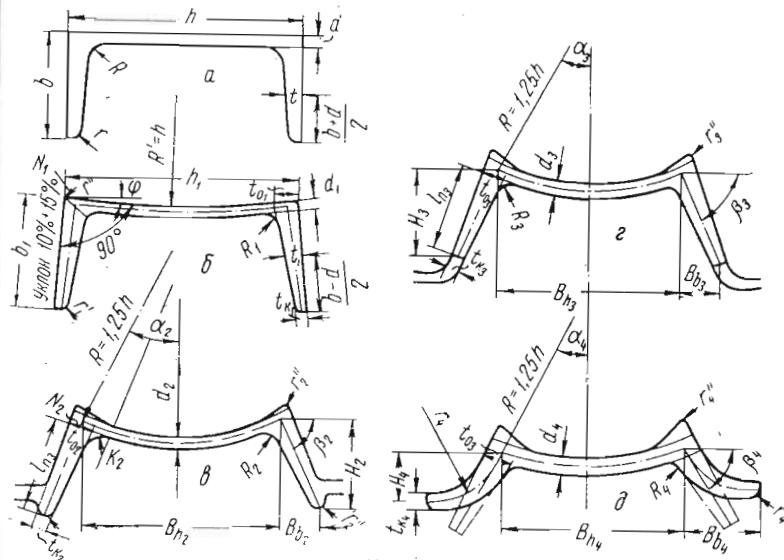


Рис. 36. Конструкция развернутых швеллерных калибров с контрольным калибром

либра, исключая контрольный калибр II, где отсутствует обжатие концов полок.

Величина уширения полок и стенки во всех калибрах

определяется так же, как и в калибровке без контрольного калибра, по формулам (49)–(50), исключая контрольный калибр II (рис. 36, в), где полки не имеют уширения, а уширение стенки определяется также по формуле (50).

### Предчистовой контрольный калибр II

Основное назначение — контроль ширины полок. Применяется конструкция калибра полузакрытого типа (рис. 36, в).

Радиус развертки средней линии стенки  $R = 1,25h$ .

Угол развертки средней линии стенки определяется из уравнения средней линии

$$\frac{2\pi R \alpha_2}{360} = 1,014h - t_o - \Delta h_1,$$

откуда

$$\alpha_2 = \frac{90(1,014h - t_o - \Delta h_1)}{\pi R}.$$

Горизонтальная проекция средней линии стенки

$$B_{h_2} = 2R \sin \alpha_2.$$

Горизонтальная и вертикальная проекции средней линии полки соответственно:

$$B_{b_2} = \left(1,014b - \frac{d}{2} - \Delta b_1\right) \cos \beta_2;$$

$$H_2 = \left(1,014b - \frac{d}{2} - \Delta b_1\right) \sin \beta_2.$$

Для калибра II принимаем  $\beta_2 = 70^\circ$ .

Коэффициенты высотной деформации всех элементов калибра I равны между собой, поэтому размеры стенки и полок по толщине в калибре II получают умножением указанных толщин калибра I на коэффициент высотной деформации в калибре I.

### Калибр III

Конструкция: стенка, развернутая радиусом  $R = 1,25h$ , полки прямые (рис. 36, г).

Угол развертки средней линии стенки определяется из уравнения средней линии:

$$1,014h - t_o - \Delta h_1 - \Delta h_2 = 2 \frac{2\pi R \alpha_3}{360},$$

откуда

$$\alpha_3 = \frac{(1,014h - t_o - \Delta h_1 - \Delta h_2) 90}{\pi R}.$$

Горизонтальная проекция средней линии стенки

$$R_{h_3} = 2R \sin \alpha_3.$$

В контрольном калибре полки обжимаются по ширине.

Величина обжатия полки определяется из условия равенства вытяжек в стенке и полках. При этом концы полок в калибре II не обжимаются во избежание образования «усов» в разъеме калибра, поэтому по толщине они делаются равными или даже толщина конца полки калибра III несколько меньше, чем толщина конца полки калибра II, т. е.

$$t_{k_3} = (1 \div 0,9) t_{k_2}.$$

Коэффициенты деформации основания полок и стенки равны между собой:

$$\frac{t_{o_3}}{t_{o_2}} = \frac{d_3}{d_2} = \eta_2.$$

В калибрах II и III принимаем равные вытяжки элементов профиля. Из этого условия определяется ширина полки калибра III  $l_{n_3}$  (рис. 36, г):

$$l_{n_3} = \frac{t_{o_3} + t_{k_3}}{2} = \eta_2 \frac{t_{o_2} + t_{k_2}}{2} l_{n_2};$$

$$l_{n_3} = \eta_2 \frac{t_{o_2} + t_{k_2}}{t_{o_3} + t_{k_3}} l_{n_2},$$

где  $l_{n_2}$  определяется из уравнения средней линии:

$$l_{n_2} = 1,014b - \frac{d_1}{2} - \frac{d_2}{2} - \Delta b_1.$$

Тогда

$$l_{n_3} = \eta_2 \frac{t_{o_2} + t_{k_2}}{t_{o_3} + t_{k_3}} \left(1,014b - \Delta b_1 - \frac{d_1}{2} - \frac{d_2}{2}\right).$$

Угол развертки средней линии полки убывает пропорционально обжатию полки во втором калибре, т. е.

Параметры калибровки для прокатки швеллера № 16  
(заготовка  $h_0 \times b_0$ )

Таблица 6

Номер калибра (против хода прокатки)	$\eta_c$	$d$ , мм	$\Delta h$ , мм	$B_h$ , мм	$\alpha$ , град.	$\eta_{\Pi}$	$t$ , мм	$\eta_{tK}$	$t_K$ , мм	$\eta_{t0}$	контрольным калибром) на стане 650 (220 мм)											
											$u$ , мм	$\Delta b$ , мм	$B_b$ , мм	$\beta$ , град.	$r$ , мм	$H$ , мм	$\eta_{cp}$	$R_K$ , мм	$\eta_y$	$\frac{t_d}{h_{cp}}$	$F$ , мм <sup>2</sup>	$\lambda$
I	1,15	4,7	2,06	151,0	—	1,15	8,0	1,15	5,0	1,15	1,0	0,83	—	84,0	—	1,15	359,5	1,23	2,71	1 800	1,12	
II	1,29	5,4	2,43	146,0	21,4	1,29	9,2	1,00	5,7	1,29	2,6	—	21,1	70,0	—	58,0	1,29	359,1	1,30	3,02	2 020	1,28
III	1,43	7,0	4,25	143,4	21,0	1,38	11,0	1,56	5,7	1,30	6,4	1,70	24,5	68,5	—	62,2	1,40	358,2	1,26	3,32	2 560	1,38
IV	1,55	10,0	5,00	140,0	20,5	1,48	15,2	1,66	9,0	1,41	1,4	2,00	45,9	65,5	43,0	40,0	1,51	356,6	1,32	3,02	3 540	1,42
V	1,75	15,5	6,60	135,0	19,7	1,56	22,5	1,80	15,0	1,45	0,0	2,64	47,1	60,0	45,0	36,6	1,65	349,0	1,40	2,60	5 000	1,50
VI	1,80	27,1	7,30	129,0	18,8	1,59	35,2	1,81	27,0	1,45	3,5	2,92	50,2	49,5	48,3	30,6	1,69	344,4	1,39	2,05	7 500	1,60
VII	1,80	49,0	7,15	122,3	17,8	1,57	56,0	1,80	49,0	1,40	3,0	2,87	50,0	31,0	60,0	20,0	1,68	337,2	1,33	1,55	12 000	1,56

$$\beta_3 = \beta_2 - \frac{\beta_2}{\Sigma \Delta t} \Delta t_2.$$

Горизонтальная проекция средней линии полки

$$B_{b_3} = \left[ \eta_2 \frac{t_{o_2} + t_{k_2}}{t_{o_3} + t_{k_3}} \left( 1,014b - \Delta b_1 - \frac{d_1}{2} - \frac{d_2}{2} \right) + \frac{d_3}{2} \right] \cos \beta_3.$$

Вертикальная проекция средней линии полки

$$H_3 = \left[ \eta_2 \frac{t_{o_2} + t_{k_2}}{t_{o_3} + t_{k_3}} \left( 1,014b - \Delta b_1 - \frac{d_1}{2} - \frac{d_2}{2} \right) + \frac{d_3}{2} \right] \sin \beta.$$

Радиусы закругления буртов у разъема калибра принимают конструктивно; выпуск нижнего ручья 10—15%.

#### Калибр IV

Конструкция калибра — развернутые полки и стенки (рис. 36, δ). Расчет параметров калибра производится подобно расчету развернутых калибров в калибровке без контрольного калибра.

Принимаем следующие параметры:

высота калибра  $H_4 = (0,60—0,65) b_1$

угол развертки средней линии полки  $\beta_4 = 65^\circ$

радиус развертки средней линии стенки  $R = 1,25h$

радиус развертки средней линии полки

$$r_4 = \frac{l_{n_3} - \frac{d_3}{2} - \Delta b_3 - \frac{H_4}{\cos(90 - \beta_4)}}{\frac{\pi \beta_4}{180} - \frac{1 - \cos \beta_4}{\cos(90 - \beta_4)}},$$

горизонтальная проекция средней линии полки

$$B_{b_4} = r_4 \sin \beta_4 + [H_4 - r_4 (1 - \cos \beta_4)] \tan(90 - \beta_4);$$

горизонтальная проекция средней линии стенки

$$B_{h_4} = 2R \sin \alpha_4.$$

Угол развертки средней линии стенки определяется из уравнения средней линии:

$$1,014h - t_0 - \Delta h_1 - \Delta h_2 - \Delta h_3 = 2 \frac{2\pi R \alpha_4}{360};$$

$$\alpha_4 = \frac{90 (1,014h - t_0 - \Delta h_1 - \Delta h_2 - \Delta h_3)}{\pi R}.$$

Параметры последующих развернутых калибров, включая размер заготовки, рассчитывают подобно калибровке без контрольного калибра.

*Расчет калибровки швеллера № 16 с применением в системе развернутых калибров контрольного калибра для стана 650 (рис. 37, табл. 6).*

Принимаем следующие коэффициенты высотных деформаций по полкам и стенкам для калибра I—1,15; 1,15; II—1,30; 1,30; III—1,38; 1,43; IV—1,48; 1,55; V—1,57; 1,75; VI—1,59; 1,80; VII—1,58; 1,80.

Коэффициенты высотных деформаций оснований и

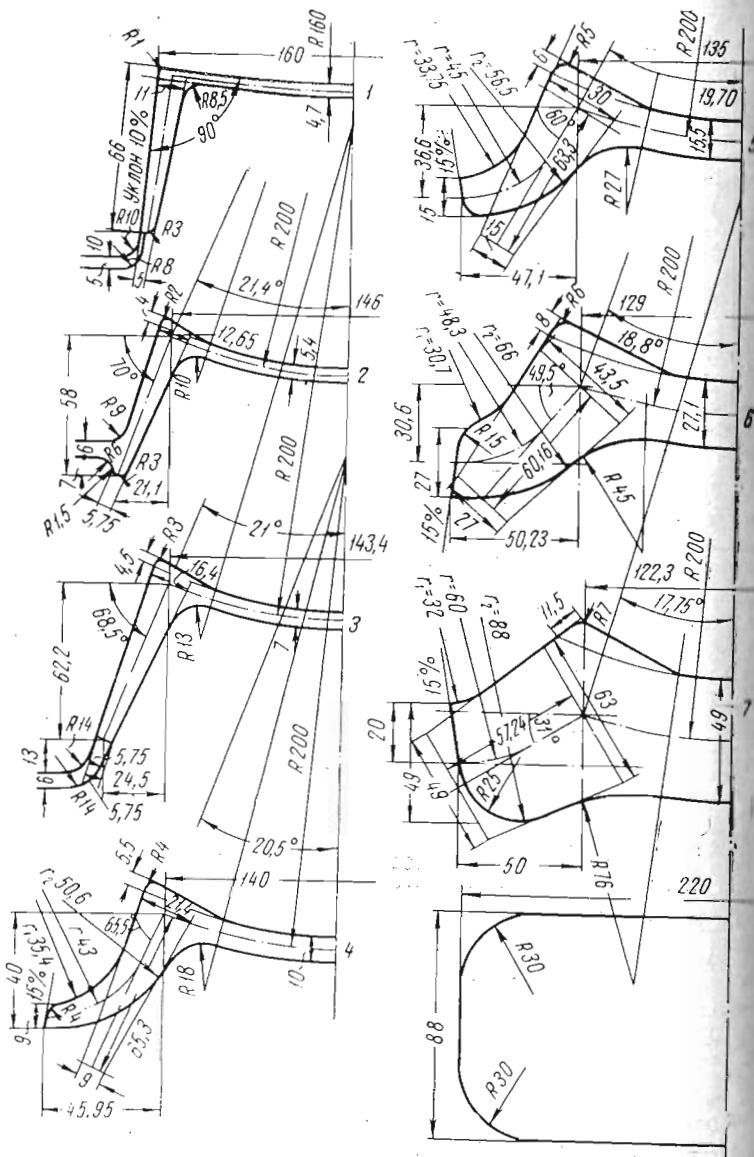


Рис. 37. Калибровка швейлера № 16 в системе развернутых калибров с применением контрольного калибра

концов полок, а также средние коэффициенты высотных деформаций по калибрам приведены в табл. 6.

#### Калибр I

Выпуск наружных граней полок принимаем 10%; радиус закругления стенки  $R = h = 160 \text{ мм}$ ; ширина стенки  $1,014 \cdot 0,995 \cdot 160 = 161 \text{ мм}$ ; ширина полки  $64 \cdot 1,014 + 0,75 \cdot 2,5 \approx 66,8 \text{ мм}$ .

Толщина стенки и полок, а также все радиусы закруглений принимаются номинальными по ГОСТ 8240—56  
Уширение средней линии стенки

$$\Delta h_1 = \frac{160}{160 + 64 \cdot 2} \left[ \left( 1 + \frac{0,95}{7,4} \right) (0,4 \sqrt{0,95 \cdot 359,5} - \frac{0,95}{2}) \frac{0,95}{7,4} + \frac{\sqrt{0,95 \cdot 359,4}}{6,82} \right] = 2,06 \text{ мм};$$

Уширение средней линии полки

$$\Delta b_1 = \frac{64}{160 + 64 \cdot 2} \left[ \left( 1 + \frac{0,95}{7,4} \right) (0,4 \sqrt{0,95 \cdot 359,5} - \frac{0,95}{2}) \frac{0,95}{7,4} + \frac{\sqrt{0,95 \cdot 359,5}}{6,82} \right] = 0,83 \text{ мм}.$$

#### Калибр II

Радиус развертки средней линии стенки  $R = 1,25 \times 160 = 200 \text{ мм}$  остается постоянным для всех последующих калибров

угол развертки средней линии стенки

$$\alpha_2 = \frac{(1,014 \cdot 160 - 11) 90}{3,14 \cdot 200} = 21,4^\circ;$$

горизонтальная проекция средней линии стенки

$$R_{h_2} = 2 \cdot 200 \sin 21,4^\circ = 145,96 \text{ мм}.$$

Угол развертки средней линии полки принимаем  $\beta_2 = 70^\circ$ .  
Горизонтальная проекция средней линии полки

$$B_{b_2} = (1,014 \cdot 64 - 2,4 - 0,83) \cos 70^\circ = 21,1 \text{ мм};$$

высота калибра

$$H_2 = (1,014 \cdot 64 - 2,4 - 0,83) \sin 70^\circ = 58 \text{ мм}; \\ \text{ширина полки}$$

$$l_{n_2} = 1,014 \cdot 64 - 2,4 - 0,83 - 2,7 = 59 \text{ мм};$$

уширение средней линии стенки

$$\Delta h_2 = \frac{160}{160 + 64 \cdot 2} \left[ \left( 1 + \frac{1,7}{9} \right) \left( 0,39 \sqrt{1,7 \cdot 359,1} - \left( \frac{1,7}{2} \right) \frac{1,7}{9} + 0,8 \frac{\sqrt{1,7 \cdot 359,1}}{8,15} \right) \right] = 2,43 \text{ мм.}$$

### Калибр III

Угол развертки средней линии полки  $\beta_3 = 70 - \frac{70}{80,6} = 68,5^\circ$ ;  
ширина полки

$$l_{n_3} = 1,295 \frac{5,75 + 12,65}{5,75 + 16,4} \cdot 59 = 63,5 \text{ мм.}$$

горизонтальная проекция средней линии полки

$$B_{\beta_3} = \left( 63,5 + \frac{7}{2} \right) \cos 68,5^\circ = 24,5 \text{ мм.}$$

высота калибра

$$H_3 = \left( 63,5 + \frac{7}{2} \right) \sin 68,5^\circ = 62,2 \text{ мм.}$$

угол развертки средней линии стенки

$$\alpha_3 = \frac{(1,014 \cdot 160 - 11 - 2,06 - 2,43) 90}{3,14 \cdot 200} = 21^\circ;$$

горизонтальная проекция средней линии стенки

$$B_{h_3} = 2 \cdot 200 \sin 21^\circ = 143,36 \text{ мм.}$$

уширение средней линии стенки

$$\Delta h_3 = \frac{160}{160 + 64 \cdot 2} \left[ \left( 1 + \frac{3,6}{12,6} \right) \left( 0,38 \sqrt{3,6 \cdot 358,2} - \left( \frac{3,6}{2} \right) \frac{3,6}{12,6} + 0,8 \frac{\sqrt{3,6 \cdot 358,2}}{10,8} \right) \right] = 4,25 \text{ мм.}$$

уширение средней полки

$$\Delta b_3 = \frac{64}{160 + 64 \cdot 2} \left[ \left( 1 + \frac{3,6}{12,6} \right) \left( 0,38 \sqrt{3,6 \cdot 358,2} - \left( \frac{3,6}{2} \right) \frac{3,6}{12,6} + 0,8 \frac{\sqrt{3,6 \cdot 358,2}}{10,8} \right) \right] = 1,7 \text{ мм.}$$

### Калибр IV

Высота калибра  $H_4 = 0,625 \cdot 64 = 40 \text{ мм.}$   
угол развертки средней линии полки

$$\beta_4 = 68,5 - \frac{70}{80,6} \cdot 3,6 = 65,5^\circ;$$

радиус развертки средней линии полки

$$r_4 = \frac{\frac{63,5 + \frac{7}{2} - 1,7 - \frac{40}{\cos(90 - 65,5)^\circ}}{3,14 \cdot 65,5} - \frac{1 - \cos 65,5^\circ}{\cos(90 - 65,5)^\circ}}{180} = 43 \text{ мм.}$$

горизонтальная проекция средней линии полки

$$B_{b_4} = 43 \sin 65,5^\circ + [40 - 43(1 - \cos 65,5^\circ)] \operatorname{tg}(90 - 65,5^\circ) = 45,95 \text{ мм.}$$

угол развертки средней линии стенки

$$\alpha_4 = \frac{90(1,014 \cdot 160 - 11 - 4,49 - 4,25)}{3,14 \cdot 200} = 20,5^\circ;$$

горизонтальная проекция средней линии стенки

$$B_{h_4} = 2 \cdot 200 \sin 20,5^\circ = 140,08 \text{ мм.}$$

уширение средней линии стенки

$$\Delta h_4 = \frac{160}{160 + 64 \cdot 2} \left[ \left( 1 + \frac{6,4}{19} \right) \left( 0,37 \sqrt{6,4 \cdot 356,6} - \left( \frac{6,4}{2} \right) \frac{6,4}{19} + 0,8 \frac{\sqrt{6,4 \cdot 356,6}}{15,8} \right) \right] = 5 \text{ мм.}$$

уширение средней линии полки

$$\Delta b_4 = \frac{64}{160 + 64 \cdot 2} \left[ \left( 1 + \frac{6,4}{19} \right) \left( 0,37 \sqrt{6,4 \cdot 356,6} - \left( \frac{6,4}{2} \right) \frac{6,4}{19} + 0,8 \frac{\sqrt{6,4 \cdot 356,6}}{15,8} \right) \right] = 2 \text{ мм.}$$

### Калибр V

Угол развертки средней линии стенки

$$\alpha_5 = \frac{(1,014 \cdot 160 - 11 - 8,74 - 5) \cdot 90}{3,14 \cdot 200} = 19,7^\circ;$$

горизонтальная проекция средней линии стенки

$$B_{h_6} = 2 \cdot 200 \sin 19,7^\circ = 135 \text{ мм};$$

угол развертки средней линии полки

$$\beta_6 = 65,5 - \frac{70}{80,6} \cdot 6,4 = 60^\circ;$$

высота калибра

$$H_6 = 40 - \frac{40}{80,6} \cdot 6,4 = 36,6 \text{ мм};$$

радиус развертки средней линии полки

$$r_5 = \frac{63,5 - 1,7 - 2 + \frac{7}{2} - \frac{36,6}{\cos(90 - 60)^\circ}}{\frac{11 \cdot 60}{180} - \frac{1 - \cos 60^\circ}{\cos(90 - 60)^\circ}} = 45 \text{ мм};$$

горизонтальная проекция средней линии полки

$$B_{b_5} = 45 \sin 60^\circ + [36,6 - 45(1 - \cos 60^\circ)] \operatorname{tg}(90 - 60)^\circ = 47,1 \text{ мм};$$

уширение средней линии стенки

$$\Delta h_5 = \frac{160}{160 + 64 \cdot 2} \left[ \left( 1 + \frac{12,1}{31,17} \right) \left( 0,37 \sqrt{12,1 \cdot 349} - \frac{12,1}{2} \frac{12,1}{31,17} + 0,8 \frac{\sqrt{12,1 \cdot 349}}{25} \right) \right] = 6,6 \text{ мм};$$

уширение средней линии полки

$$\Delta b_5 = \frac{64}{160 + 64 \cdot 2} \left[ \left( 1 + \frac{12,1}{31,17} \right) \left( 0,37 \sqrt{12,1 \cdot 349} - \frac{12,1}{2} \frac{12,1}{31,17} + 0,8 \frac{\sqrt{12,1 \cdot 349}}{25} \right) \right] = 2,64 \text{ мм.}$$

### Калибр VI

угол развертки средней линии стенки

$$\alpha_6 = \frac{(1,014 \cdot 160 - 11 - 13,74 - 6,6) 90}{3,14 \cdot 200} = 18,8^\circ;$$

горизонтальная проекция средней линии стенки

$$B_{h_6} = 2 \cdot 200 \sin 18,8^\circ = 129 \text{ мм};$$

угол развертки средней линии полки

$$\beta_6 = 60 - \frac{70}{80,6} \cdot 12,1 = 49,5^\circ;$$

высота калибра

$$H_6 = 36,6 - \frac{40}{80,6} \cdot 12,1 = 30,6 \text{ мм};$$

радиус развертки средней линии полки

$$r_6 = \frac{63,5 + \frac{7}{2} - 3,7 - 2,64 - \frac{30,6}{\cos(90 - 49,5)^\circ}}{\frac{3,14 \cdot 49,5}{180} - \frac{1 - \cos 49,5^\circ}{\cos(90 - 49,5)^\circ}} = 48,3 \text{ мм};$$

горизонтальная проекция средней линии полки

$$B_{b_6} = 48,3 \sin 49,5^\circ + [30,6 - 48,3(1 - \cos 49,5^\circ)] \operatorname{tg}(90 - 49,5)^\circ = 50,23 \text{ мм};$$

уширение средней линии стенки

$$\Delta h_6 = \frac{160}{160 + 64 \cdot 2} \left[ \left( 1 + \frac{21,3}{52,5} \right) \left( 0,37 \sqrt{21,3 \cdot 344,4} - \frac{21,3}{2} \frac{21,3}{52,5} + 0,8 \frac{\sqrt{21,3 \cdot 344,4}}{41,83} \right) \right] = 7,3 \text{ мм};$$

уширение средней линии полки

$$\Delta b_6 = \frac{64}{160 + 64 \cdot 2} \left[ \left( 1 + \frac{21,32}{52,5} \right) \left( 0,37 \sqrt{21,32 \cdot 344,4} - \frac{21,32}{2} \frac{21,32}{52,5} + 0,8 \frac{\sqrt{21,32 \cdot 344,4}}{41,83} \right) \right] = 2,92 \text{ мм.}$$

### Калибр VII

угол развертки средней линии стенки

$$\alpha_7 = \frac{(1,014 \cdot 160 - 11 - 20,34 - 7,3) 90}{3,14 \cdot 200} = 17,8^\circ;$$

горизонтальная проекция средней линии стенки

$$B_{h_7} = 2 \cdot 200 \sin 17,8^\circ = 122,28 \text{ мм};$$

угол развертки средней линии полки

$$\beta_7 = 49,5 - \frac{70}{80,6} \cdot 21,3 = 31^\circ;$$

высота калибра

$$H_7 = 30,6 - \frac{40}{80,6} \cdot 21,3 = 20 \text{ мм};$$

радиус развертки средней линии полки

$$r_7 = \frac{63,5 + \frac{7}{2} - 6,34 - 2,92 - \frac{20}{\cos(90-31)^\circ}}{\frac{3,14 \cdot 31}{180} - \frac{1 - \cos 31^\circ}{\cos(90-31)^\circ}} = 60 \text{ мм};$$

горизонтальная проекция средней линии полки

$$B_b = 60 \sin 31 + [20 - 60(1 - \cos 31^\circ)] \tan(90 - 31)^\circ = 50 \text{ мм};$$

уширение средней линии стенки

$$\Delta h_7 = \frac{160}{106 + 64,2} \left[ \left( 1 + \frac{35,5}{88} \right) \left( 0,35 \sqrt{35,5 \cdot 337,2} - \frac{35,5}{2} \right) \frac{35,5}{88} + 0,8 \frac{\sqrt{35,5 \cdot 337,2}}{70,25} \right] = 7,15 \text{ мм};$$

уширение средней линии полки

$$\Delta b_7 = \frac{64}{160 + 64,2} \left[ \left( 1 + \frac{35,5}{88} \right) \left( 0,35 \sqrt{35,5 \cdot 337,2} - \frac{35,5}{2} \right) \frac{35,5}{88} + 0,8 \frac{\sqrt{35,5 \cdot 337,2}}{70,25} \right] = 2,87 \text{ мм}.$$

Следовательно, необходимо выбрать следующие размеры заготовки: высоту 88 мм и ширину  $2(54,74 - 2,87) + 123,86 - 7,15 = 220,45$  мм. Окончательные размеры заготовки  $220 \times 88$  мм. Конструкция калибров приведена на рис. 37. Расчет толщин полок и стенок, а также размеров ложных фланцев и радиусов закруглений в элементах калибров приведены в табл. 6 и на рис. 37.

#### Прокатка швеллера в развернутом чистовом калибре

На многих металлургических заводах при прокатке швеллеров применяют чистовые калибры, имеющие выпуск внешних граней полок от 1 до 3%. Недостатком их является малая стойкость калибров, откол буртов из-за повышенных боковых давлений в полках, низкое качество поверхности полок (задиры и царапины). Кроме того,

ограничена возможность уменьшения толщины полок, что затрудняет получение профиля с минусовым допуском в течение всего периода работы калибра, большой съем материала валка по диаметру при ремонтах чистовых валков и др.

На ряде прокатных станов в настоящее время применен и успешно эксплуатируется развернутый чистовой

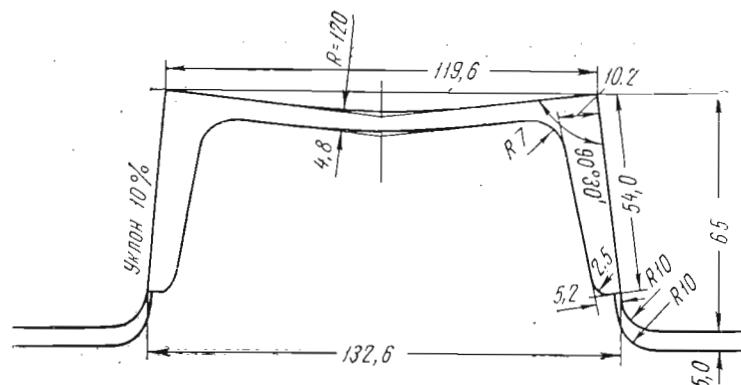


Рис. 38. Развернутый чистовой калибр для швеллера № 12

калибр для швеллера. Уклон внешних граней полок в развернутом чистовом калибре достигает 10—15% за счет изгиба стенки по дуге с радиусом, равным длине стенки прокатываемого швеллера (рис. 38). Правка профиля производится в холодном состоянии на обычных ролико-правильных машинах по обычной технологии правки.

Применение развернутого чистового калибра значительно повышает технико-экономические показатели работы прокатного стана при прокатке швеллеров. Например, прокатка швеллера № 12 на линейном стане 600 в чистовом развернутом калибре с выпуском внешних граней полок 10% против ранее применяемого выпуска 2% показала увеличение стойкости калибра в 1,5 раза, а съем материала чистовых валков при переточках уменьшился по диаметру в 1,5—2 раза. Кроме того, чистовой развернутый калибр позволил получать готовый профиль в минусовом поле допусков с экономией металла 3—5%.

## Об использовании графического метода в калибровке валков с применением систем развернутых калибров

Рассмотренный выше аналитический метод расчета калибровки швеллера, угловой и зетовой стали, основанный на расчетах деформации средней линии и соотношений коэффициентов высотной деформации в элементах развернутого калибра, может быть в принципе применен для расчета калибровки и других профилей, прокатка которых возможна в развернутых калибрах. Для этого аналитический расчет деформации средней линии каждого калибра заменяется графическим, т. е. рассчитанная по формулам (8), (9) длина средней линии графически наносится на калибр, чем и определяется ширина калибра. Изменение высоты калибров и углов раскрытия полок рассчитывается по приведенному ранее методу (см. гл. III).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Мец Н. Горячая прокатка и калибровка валков. ОНТИ, 1937.
2. Старченко Д. И. Развернутая калибровка фасонных профилей. Металлургиздат, 1952.
3. Бахтинов Б. П., Штернов М. М. Калибровка прокатных валков. Металлургиздат, 1953.
4. Смирнов В. С. и др. Калибровка прокатных валков по методу соответственной полосы. Металлургиздат, 1953.
5. Штернов М. М. Калибровка угловой стали. Металлургиздат, 1961.
6. Чекмарев А. П. и др. Производство облегченных профилей проката. Изд-во «Металлургия», 1965.
7. Кучко И. И. В сб. «Технический прогресс в технологии прокатного производства». Металлургиздат, 1960, с. 214.
8. Литовченко Н. В. и др. Калибровка валков сортовых станов. Металлургиздат, 1963.
9. Мерекин Б. В. Технический бюллетень № 2. Изд. НТО ЧМ НТМК, 1958, с. 15.
10. Илюкович Б. М. Сталь, 1961, № 7, с. 621.
11. Стефанов В. Е. и Протасов Н. Ф. Сталь, 1963, № 8, с. 724.
12. Vasicek V. Hufnik, 1955, № 2, Wydawnictwo «Slask», s. 55.
13. Губкин С. И. Теория обработки металлов давлением. Металлургиздат, 1947.

## Оглавление

Введение

Г л а в а I.	Обзор существующих методов калибровки валков, проектируемых в развернутых калибрах . . . . .	3
	Расчет калибровки угловой стали по горизонтальным проекциям . . . . .	5
	Расчет калибровки угловой стали по методу соответственной полосы . . . . .	5
	Расчет калибровки угловой стали по средней линии . . . . .	10
	Расчет калибровки швеллера с применением развернутых калибров . . . . .	11
Г л а в а II.	Исследование процессов формоизменения металла в развернутых калибрах . . . . .	22
	Исследование уширения средних линий и коэффициентов высотных деформаций в развернутых калибрах угловой стали . . . . .	30
	Исследование уширения средних линий и коэффициентов высотных деформаций в развернутых калибрах швеллера . . . . .	32
	Исследование уширения средних линий в развернутых калибрах профилей зет и автообода ГАЗ-53 . . . . .	38
Г л а в а III.	Основы калибровки валков с применением систем развернутых калибров . . . . .	43
	Сортамент профилей, прокатка которых возможна в развернутых калибрах . . . . .	45
	Обоснование метода расчета поперечной и высотной деформаций в развернутом калибре . . . . .	46
Г л а в а IV.	Аналитический метод расчета калибровки валков с применением систем развернутых калибров . . . . .	52
	Калибровка угловой стали . . . . .	52
	Калибровка зетовой стали . . . . .	52
	Калибровка швеллеров . . . . .	72
	Об использовании графического метода в калибровке валков с применением систем развернутых калибров . . . . .	108

## НОВЫЕ КНИГИ серия «ЭКОНОМИКА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА»

**РАССЧИТАНА НА ШИРОКИЙ КРУГ  
РАБОТНИКОВ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ,  
МИНИСТЕРСТВ, ПАРТИЙНЫХ И ОБЩЕСТВЕННЫХ  
ОРГАНИЗАЦИЙ**

**ВЫЙДУТ В 1971 г.**

Бельгольский Б. П. и Медведев И. А. Внутризаводское планирование в черной металлургии.  
Кулиш Г. П. Внутризаводской хозрасчет в черной металлургии.

**ВЫЙДУТ В 1972 г.**

Грацерштейн И. М. Научная организация труда в цветной металлургии.

Попов Д. И. Использование основных фондов на металлургических предприятиях.

Чепланов В. И. Планирование себестоимости, прибыли и рентабельности на металлургических предприятиях.

Ширяев П. А. Капитальное строительство в черной металлургии.

Шкурский А. Г. Внутризаводской хозрасчет в цветной металлургии.

### ВНИМАНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ!

**Книжные магазины принимают предварительные заказы на печатающуюся техническую литературу.**

Заказывайте заблаговременно  
интересующие Вас издания.  
Предварительный заказ гарантирует  
своевременное приобретение книги.