WALZEN UND KALIBRIEREN

PROFESSOR DR.-ING. E. H. HUBERT HOFF
UND
DR.-ING. HABIL. THEODOR DAHL †

Mit 202 Abbildungen und 63 Zahlentafeln

1954

VERLAG STAHLEISEN M. B. H. DÜSSELDORF

Хофф Х., Даль Т.

Прокатка и калибровка

Москва
Металлургиздат
1957

ПРЕДИСЛОВИЕ

Авторы этой книги изложили основы прокатного дела в 9-м томе «Библиотеки металлурга», выпускаемой в Дюссельдофре издательством Stahleisen. В предисловии они указали, что техника прокатки и конструкция валков будут освещены Теодором Далем в особом труде «Прокатка и калибровка». К сожалению, моему коллеге, с которым меня связывала долголетняя работа, не суждено было довести эту работу до конца, он скончался год назад. Мне пришлось взять на себя труд по окончанию этой книги, которая была готова только в основных чертах.

Калибровка прокатных валков является важной областью прокатного дела. Но сравнительно немногие прокатчики имеют возможность и время подробно заняться вопросами калибровки, и она всегда является уделом немногих специалистов. В связи с этим часто утверждают, что калибровка есть искусство, которому нельзя ни учить, ни научиться. Это тем более странно, что уже почти 100 лет назад в Германии появился труд Гиннера, посвященный калибровке валков.

Калибровка является искусством в том смысле, что она требует умения, которое приобретается навыком, и в этой области были мастера, создавшие свои школы. Достаточно назвать металлургический завод «Роте Эрде» в Аахене, на котором работали такие крупные специалисты, как Дехез (Dehez), Карл и Матвей Хольцвейлеры. С Карлом Хольцвейлером Теодор Даль работал много лет, и они совместно опубликовали ряд ценных работ.

Накопленные упомянутыми, ныне уже покойными, калибровщиками знания и опыт по прокатке и калибровке автор этих строк использовал в настоящей книге.

Надлежащая подготовка валков и в особенности их калибровка являются основой прокатного дела. Калибровка валков для прокатки заготовок с простой геометрической формой сечения не представляет особых трудностей при соблюдении известных правил деформации металла. Некоторые трудности возникают при калибровке валков для прокатки сортовой (фасонной) стали. В. Тафель называл такую калибровку «неравномерной» вследствие того, что отдельные части профиля подвергаются неодинаковой деформации. Э. Кирхберг первый сделал попытку

произвести для этих калибровок необходимые расчеты. Однако предложенный им метод, помимо его сложности и трудоемкости, не достигает цели, так как он основан на предпосылках, которые в действительности не осуществимы. А. Брово (Brovot) привел в своем труде много калибровок, которые считались образцовыми. Однако за последние годы в области калибровки фасонных профилей достигнуты большие успехи, которые учтены в настоящем труде.

Авторы ограничились немногими примерами для иллюстрации рекомендуемого ими метода калибровки, но зато постарались изложить и обосновать возможно подробно методику расчета. Они показали, что при применении некоторых опытных величин металл прокатывается во всех частях равномерно и одинаково. В практике применяют калибровки, которые не обладают такими качествами. Несомненно, однако, что предпочтение следует отдать таким калибровкам, которые обеспечивают равномерную деформацию во всех частях прокатываемого профиля, что способствует наименьшему износу валков и расходу энергии.

ХУБЕРТ ХОФФ

Апрель 1954 г.

Глава I

ОСНОВЫ ТЕОРИИ ПРОКАТКИ И КАЛИБРОВКИ ВАЛКОВ

1. ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ ПРОКАТКИ

Форма сечения исходного материала

Обычно первой стадией прокатки является деформация слитка, который в зависимости от способа отливки имеет прямоугольное или круглое сечение. Трубы прокатывают иногда из полых слитков. Исключение составляет производство цельнокатаных колес, бандажей и тому подобных изделий, когда слиток перед прокаткой подвергают ковке. При прокатке высоколегированных сталей, например быстрорежущих, исходной заготовкой также служит большей частью предварительно прокованный слиток, так как для этих сталей целесообразно первоначальную деформацию вести в очень узком температурном интервале. Размер и вес слитков, предназначенных для прокатки толстого листа, зависят от размеров готового листа. Однако для большинства других видов проката применяют стандартные слитки, так как в противном случае потребовалось бы слишком много различных типоразмеров слитков и изложниц. Первоначально сечения слитка уменьшают прокаткой на обжимных станах — блуминге, слябинге или заготовочном стане. Прокат, получаемый на этих станах, называют блумами, слябами или заготовкой.

На блумингах прокатывают стандартные слитки весом от 3 до 8 *т* в зависимости от мощности стана[1].

Деформация металла на гладких цилиндрических валках

При пропуске (проходе) слитка прямоугольного сечения между гладкими цилиндрическими валками сечение его уменьшается с Q_0 до Q_1, высота — с h_0 до h_1, а длина возрастает с l_0 до l_1. При этом ширина его увеличивается с b_0 до b_1 (рис. 1). Если заготовку еще раз пропустить в том же положении через валки, то ширина

[1] На современных блумингах и слябингах можно прокатывать слитки весом до 16—18 *т* (*Прим. ред.*)

ее возрастает с b_1 до b_2. Такой проход металла между валками называют плоским (прокатка плашмя). Если из слитка квадратного сечения прокатывают блум меньшего сечения, также квадратной формы, то после нескольких проходов заготовку необходимо повернуть (скантовать) на 90° и задать ее в валки так, чтобы более длинное ребро стало вертикальным (рис. 2). Такой проход называют ребровым. Прямоугольные и квадратные профили прокатывают при ребровых и плоских проходах, пока не будет получен профиль требуемого сечения. Прокатку с полностью свобод-

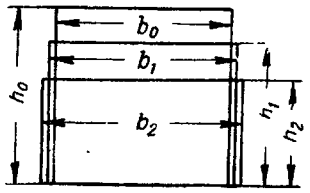


Рис. 1. Изменение размеров прокатываемого металла в простом случае прокатки

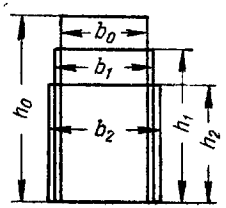


Рис. 2. Изменение размеров прокатываемого металла при ребровых проходах

ным уширением на практике, как правило, не применяют, так как для получения хорошего качества проката необходима деформация металла в обоих направлениях поперечного сечения.

Прокатка в калибрах

Деформацию металла плашмя и на ребро можно осуществлять также при прокатке в калиброванных валках. Калибры получают путем протачивания на рабочей части (бочке) валка концентрически расположенных углублений или выступов (рис. 3). Название калибров определяется их формой. Последовательно расположенные калибры образуют систему калибров. Применяют следующие системы калибров на валках:

а) круг — круг;
б) стрельчатый — стрельчатый;
в) квадрат — квадрат;
г) ромб — ромб;
д) овал — овал;
е) восьмиугольник — восьмиугольник;
ж) ромб — квадрат;
з) овал — квадрат;
и) овал — круг.

Ящичные, квадратные, стрельчатые и ромбические калибры позволяют производить лишь небольшие обжатия за каждый проход. Однако они дают возможность получать большой диапазон различных квадратных или примерно квадратных сечений, вследствие чего эти калибры можно охарактеризовать как подготовительные. При прокатке по системе квадрат — ромб, квадрат —

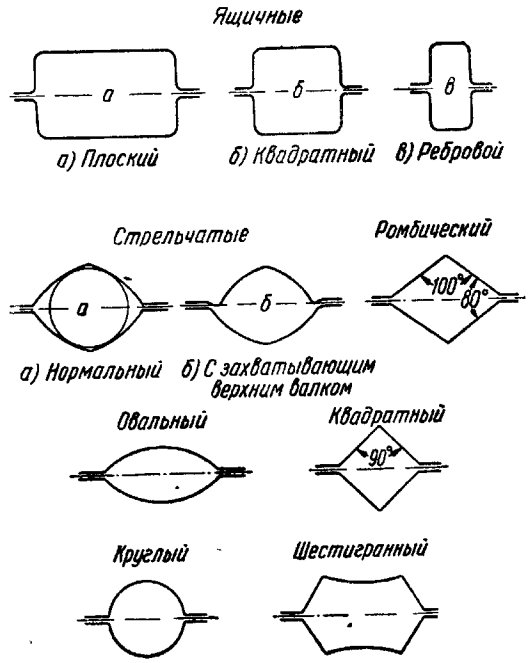


Рис. 3. Стандартные черновые калибры

овал, овал — круг, овал — овал допустимая вытяжка за проход значительно возрастает. Нужное квадратное сечение получается за меньшее число проходов.

Форма поперечного сечения проката, как правило, соответствует форме калибра. Профиль по всей длине проката обычно одинаков. Исключение составляют применяемые для определенных целей профили периодического сечения (периодические профили), из которых изготовляют подковы, рельсовые костыли и т. п. (рис. 4). Для этих профилей применяют периодические калибры соответствующей формы, причем по окружности валков калибры имеют переменную глубину. Калибры переменного сечения выполняют также на валках, применяемых на пильгерных трубопрокатных станах.

При горячей прокатке следует учитывать, что в результате охлаждения до комнатной температуры объем прокатной заготовки уменьшается. Степень уменьшения объема зависит от скорости охлаждения — в воде или на воздухе — и от того, последует ли за охлаждением рекристаллизация. Таким образом, профиль металла в горячем состоянии отличается по размерам от профиля в холодном состоянии. Размеры горячего профиля равны размерам готового профиля, умноженным на коэффициент термического расширения, который для стали меняется от 1,013 до 1,015. Калибры валков станов горячей прокатки следует таким образом конструировать по горячему профилю. Для прокатки круглой стали, например,

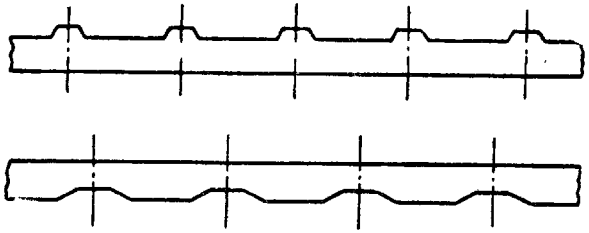


Рис. 4. Периодические профили

$$d_г = (1{,}013 \div 1{,}015)\, d_х,$$

где $d_г$ — диаметр горячего прутка;
$d_х$ — диаметр холодного прутка.

Калибр большей частью ограничен двумя валками. Место, где линия контура калибра переходит с одного валка на другой, называют разъемом калибра. Этот разъем обозначен на рисунках 5—8 буквой *e*. Если разъем калибра образован линиями, параллельными продольной оси валка (рис. 5), то калибр называют открытым. Если разъем образован линиями, перпендикулярными продольной оси валков, то его называют закрытым (рис. 6). Когда разъем калибра образован линиями, наклонными к оси валков, то калибр будет открытым[1], если угол α меньше 60° (рис. 7), и закрытым, если угол α больше 60°. Штрих-пунктирная линия, параллельная оси валков (рис. 5—8), обозначает линию контакта валков в случае, если бы они не имели калибров. Эта линия определяет плоскость прокатки.

[1] В нашей литературе принято, что в тех случаях, когда линии разъема валков находятся вне пределов калибра, последний называется закрытым, в противном случае калибр является открытым (*Прим. ред.*).

Боковые стенки калибра, как правило, имеют наклон (выпуск)[2], поэтому угол α почти никогда не бывает равен 90°. Таким образом, калибр имеет слегка коническую форму, благодаря чему

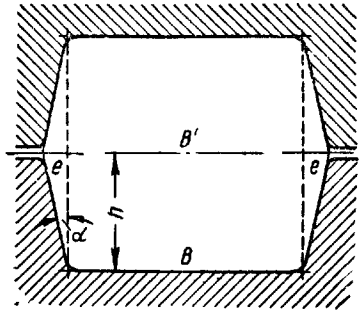


Рис. 5. Открытый ящичный калибр:
e — e — разъем калибра, α — угол уклона боковых стенок калибра (выпуск); $B' = B + 2h \operatorname{tg} \alpha$

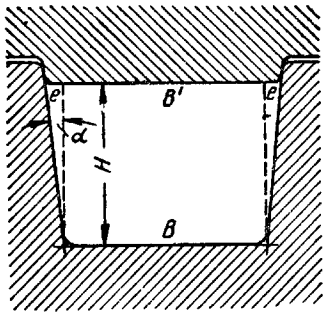


Рис. 6. Закрытый ящичный калибр:
e — e — разъем калибра, α — угол выпуска; $B' = B + 2h \operatorname{tg} \alpha$

металл легко выходит из ручья. Выпуск составляет большей частью менее 1% высоты калибра, но в калибрах обжимных и черновых валков, а также в фасонных калибрах он может быть значительно больше 1%. После переточки валков ширина калибра

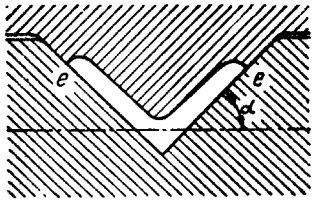


Рис. 7. Открытый калибр ($\alpha < 60°$)

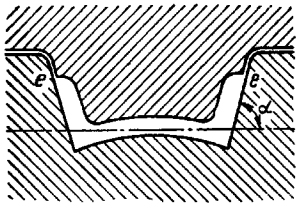


Рис. 8. Закрытый калибр ($\alpha > 60°$)

остается неизменной (см. рис. 32). Данные о величине выпуска калибров для различных профилей приведены в соответствующих разделах.

[2] В нашей практике выпуском обычно называют тангенс угла наклона боковых стенок калибра к оси валков (*Прим. ред.*).

Построение калибров

Чертежи калиброванных валков представляют контуры совместно работающих валков. Они изображают бочку валков с калибрами и ребордами, как правило, в натуральную величину. Если реборды валков выше, чем линия ограничения калибров, то их называют положительными, если ниже — отрицательными (рис. 9). Отрицательные реборды обычно бывают у верхних валков, положительные — у нижних. В некоторых случаях целесообразно обратное расположение реборд. Иногда на одном и том же валке имеются положительные и отрицательные реборды. Чередование положительных и отрицательных реборд в калиброванных валках показано на рис. 9. Валки с положительными ребордами называют матричными, с отрицательными — патричными. Валки для профильной прокатки должны иметь по крайней мере две противоположно расположенные на концах валка реборды (двойные замки) для восприятия горизонтальных усилий на валок. В чертежах валков (насколько возможно) размеры в радиальном направлении обозначают через диаметры, что более удобно при вальцетокарных работах, при которых измерения производят при помощи кронциркуля или других соответствующих измерительных устройств.

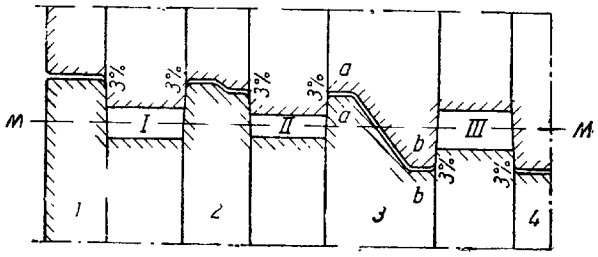


Рис. 9. Часть бочки валков стана дуо. $M — M$ — плоскость прокатки (линия контакта гладких валков до нарезки калибров)

Для калибров *I* и *II* верхний валок является патричным, нижний валок — матричным, реборды в верхнем валке — отрицательные, реборды в нижнем валке — положительные. Для калибра *III* верхний валок является матричным, нижний валок патричным, реборды в верхнем валке отрицательные, в нижнем валке — положительные

В чугунных валках ширина реборд равна их высоте. В тех случаях, когда нет значительных боковых усилий, например при прокатке квадратного и прямоугольного профиля или углового железа, ширина реборд может быть меньше. Ширина реборд стальных литых или кованых валков может быть равна половине их высоты. Крайние реборды делают более широкими, чтобы оставалось достаточно места для установки проводок.

Направление прокатки

Уменьшение площади поперечного сечения (обжатие) проката начинается при входе его в пространство между валками в точках E и E_1 (рис. 10). Обжатие заканчивается в точках A и A_1, если пренебречь упругим смятием валков. Точки A и A_1 лежат в одной плоскости с центрами валков M и M_1. Плоскость, проведенную через эти точки, называют плоскостью выхода металла. Направление входа и выхода проката перпендикулярно по отношению к этой плоскости и называется направлением прокатки.

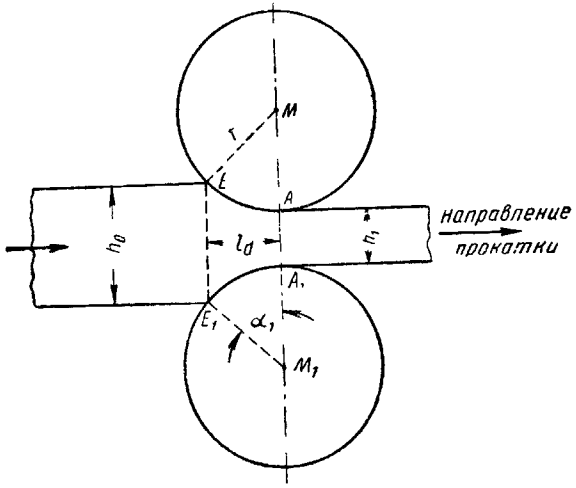


Рис. 10. Зона деформации при прокатке:

α_1 — угол захвата; l_d = проекция длины дуги захвата:

$$\Delta h = h_0 - h_1; \quad \cos\alpha_1 = 1 - \frac{\Delta h}{2r}$$

Деформация деталей стана при прокатке (пружинение)

При прохождении прокатываемого металла между валками вследствие упругой деформации валков, подшипников, нажимных винтов, станины и других деталей валки расходятся, что приводит к увеличению сечения калибра. Такое явление иногда называют пружинением или «игрой» валков. Во время прокатки калибры валков изнашиваются. Для компенсации деформации деталей клети при прокатке и износа калибров величина сечения калибра

регулируется путем сближения валков, в пределах зазора между ними. Таким образом, назначение зазора между валками — компенсация увеличения калибра, вызванного износом или деформацией деталей стана. Зазор для средних и малых станов составляет 0,5—0,8%, а для крупных станов 0,8—1,5% диаметра валков и определяется состоянием стана, размерами калибра и износостойкостью валков. Зазор должен быть учтен при обработке валков на вальцетокарных станках и всегда обозначается на чертежах калиброванных валков.

Необходимо следить, чтобы реборды валков при холостом ходе нигде не соприкасались, что особенно важно при прокатке сортовых профилей на станах с линейным расположением клетей. Такое соприкасание опасно из-за различного диаметра валков по клетям и может привести к поломке валков, цапф или муфт. Зазор валков, однако, не должен быть слишком большим, чтобы не уменьшилась точность прокатки. Более подробно по этому вопросу сказано в разделах, посвященных прокатке сорта и проволоки.

Изготовление калиброванных валков

При проектировании калибров сначала наносятся очертания горячего конечного профиля. Исходя из этого профиля, определяют очертания предчистовых и черновых калибров вплоть до калибра, в котором прокатывают размеры исходной для данного стана заготовки. Последовательность калибров, спроектированных в порядке процесса прокатки от заготовки до готового профиля, называют калибровкой данного профиля.

По чертежам калибров изготовляются шаблоны из цинкового или стального листа толщиной не более 1 *мм*. Шаблоны должны точно соответствовать чертежам калибров, их используют калибровщики и вальцетокари при обточке валков и для правильной установки валков в рабочих клетях. При расточке валков по шаблонам и монтажным чертежам выполняют калибры на одном валке; после этого по монтажным чертежам и при установке на вальцетокарном станке спаренных валков нарезают калибры на втором валке.

Обжатие заготовки по высоте и ширине

Уменьшение высоты заготовки $\Delta h = h_0 - h_1$ называют абсолютным обжатием. При прокатке может происходить также боковое обжатие, т. е. уменьшение размеров полосы в горизонтальном направлении.

Боковое обжатие в отдельных частях калибра применяют чаще всего при прокатке фланцевых профилей (балки, рельсы, швеллеры). Боковое обжатие может происходить как в открытой, так и в закрытой части калибра. Открытая часть калибра образуется

двумя валками. При вращении валков стенки открытого калибра сближаются и обжимают металл с боков. Закрытая часть калибра врезана в один валок. Поверхности, образующие калибр, не могут менять свое взаимное расположение, вследствие чего происходит лишь проскальзывание металла по валкам (рис. 11) и некото-

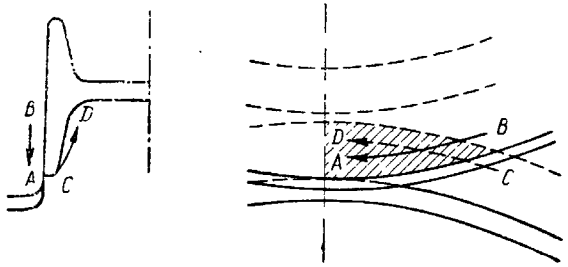


Рис. 11. Открытый калибр. Неблагоприятное воздействие пересекающихся плоскостей прокатки

рое боковое обжатие более широкой части закрытого фланца у его основания, не достигающее величины обжатия открытого фланца.

Профили простой формы (полосовые, квадратные, круглые, или овальные) можно получить непосредственно в результате обжатия слитка. То же относится к более сложным профилям, изо-

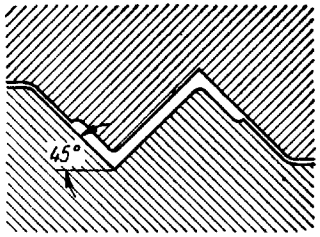


Рис. 12. Калибр для зетового профиля

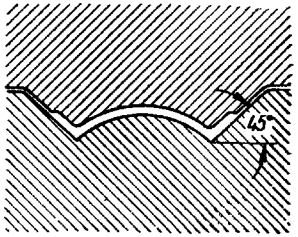


Рис. 13. Калибр для колонного профиля

браженным на рис. 7, 12 и 13. При целесообразном расположении калибров обжатие при прокатке этих профилей распределяется сравнительно равномерно по всему сечению.

На рис. 14 приведена схема обжатия двутавровой балки. Очевидно, непосредственное обжатие имеет место на шейке балки, вследствие чего профиль принимает соответствующую калибру окончательную форму, показанную пунктиром. Фланцы или полки

воспринимают боковое обжатие в верхних половинках тех калибров, которые ограничены обоими валками.

Нижние части фланцев обжимаются в тех участках калибра, которые образуются только нижним валком. В этих участках боковое обжатие должно быть совсем незначительно. Если поступающие в закрытую часть калибра фланцы слишком велики по толщине и пластичность металла сравнительно мала, то эта часть профиля не может достаточно глубоко проникнуть в соответствующие части калибров, и последние остаются незаполненными

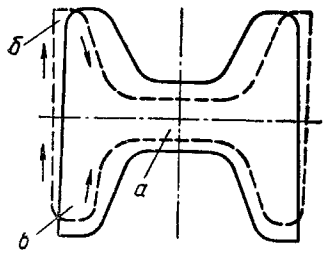


Рис. 14. Деформация в участках калибра для двутавровой балки.

Стрелки показывают направление течения металла: участок *а* — большое вертикальное обжатие, небольшое уширение (шейка балки); участок *б* — небольшое увеличение высоты, большое обжатие по ширине (открытая часть калибра); участок *в* — большое вертикальное обжатие, небольшое обжатие по ширине (закрытая часть калибра)

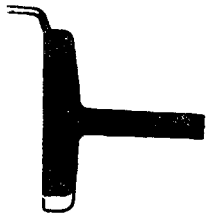


Рис. 15. Увеличенная толщина нижнего фланца ведет к образованию заусенца в верхнем фланце

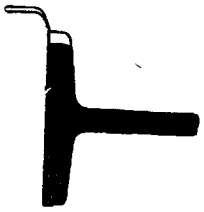


Рис. 16. Недостаточная толщина нижнего фланца ведет к утяжке верхнего фланца

(рис. 15). Вследствие этого некоторый объем металла выжимается наверх и, переполняя ту часть калибра, которая предназначена для верхней половины полки, образует заусенец. Если, наоборот, фланцы, поступающие в открытую часть калибра, будут слишком тонкими, то металл переместится из верхней половины калибра в нижнюю и верхняя часть калибра не будет заполнена (рис. 16).

Рабочий диаметр валков, верхнее и нижнее давление в клети дуо

Диаметр валков, измеренный по калибрам, называют рабочим. Этот диаметр не всегда одинаков у верхнего и нижнего валка. Если рабочий диаметр верхнего валка больше, чем рабочий диаметр нижнего валка, то имеет место *верхнее* давление. Вследствие большей окружной скорости верхнего валка прокатываемая заготовка отклоняется к нижнему, меньшему валку (рис. 17) и тем самым получает фиксированное направление при выходе. При этом у нижнего валка необходимо установить выводные проводки (рис. 18). Они предназначены для того, чтобы оторвать нижнюю часть прокатываемой полосы от дна калибра и тем самым

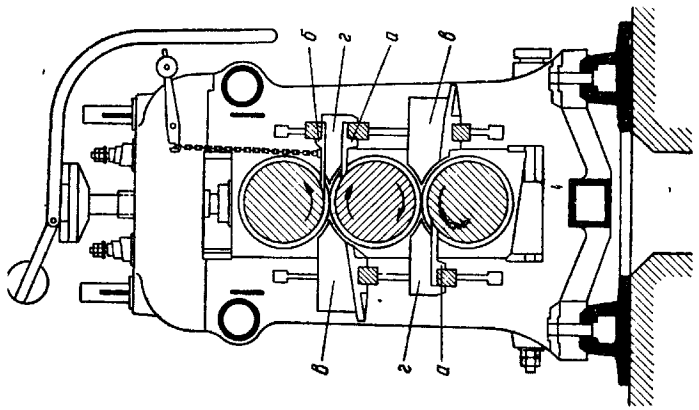


Рис. 18. Установка нижней (*а*) и верхней (*б*) линеек проводок. Вводные (*в*) и выводные (*г*) проводки на клети трио

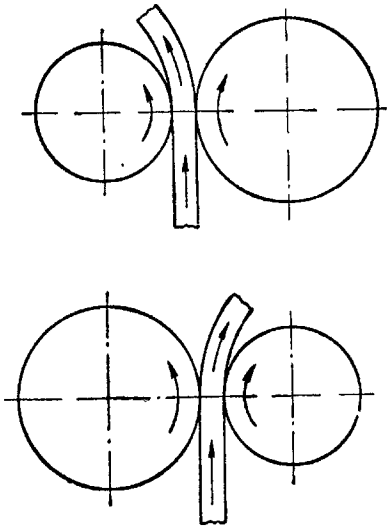


Рис. 17. Влияние диаметра валков на прокатываемый металл. При большем диаметре верхнего валка получается верхнее давление и изгиб заготовки вниз. При большем диаметре нижнего валка возникает нижнее давление и изгиб заготовки вверх

воспрепятствовать окову валка металлом, приводящему к поломке валков или других деталей клети. Если рабочий диаметр нижнего валка больше, чем верхнего, то имеет место *нижнее* давление, способствующее изгибу прокатываемого металла вверх. В связи с этим на верхнем валке необходимо предусматривать выводные проводки. Если валки имеют одинаковые рабочие диаметры, то направление прокатанного металла при выходе из клети трудно предсказать и следует предположить, что металл отклонится в сторону валка с бо́льшим трением.

В большинстве случаев выбирают для всех калибров данного валка одинаковое верхнее или нижнее давление. Величина верхнего давления выбирается различной в зависимости от величины диаметра валков и сечения прокатываемой заготовки. Например, при прокатке больших балок оно равно 20—30 *мм*, при прокатке мелкой сортовой стали — 5 *мм*. На блумингах дуо для разгрузки рольгангов часто работают с нижним давлением, равным 10—20 *мм*. Для крупных валков блуминга нет надобности в установке выводных проводок, так как блумы, имеющие большое сечение, не могут оковать валок.

В соответствующих разделах будут указаны данные о величине верхнего давления при прокатке различных профилей. Следует указать, что в настоящее время разница в диаметрах совместно работающих валков значительно меньше, чем принималось раньше. В настоящее время по возможности отказываются от верхнего и нижнего давления и дают требуемое направление заготовке при выходе из валков при помощи выводных проводок. Причины, по которым так поступают, будут подробно изложены ниже. Удачное решение задачи оптимального направления выходящей из валков заготовки заключается в индивидуальном приводе каждого валка от электродвигателей постоянного тока.

Расположение калибров по отношению к линии прокатки в стане дуо

Расположение калибров по отношению к линии прокатки (линии соприкосновения диаметров необточенных валков) имеет большое значение для прокатки. Неправильно выбранное положение ее может отрицательно повлиять на работу стана и отразиться на качестве проката. Особенно часто это наблюдается при прокатке швеллеров и балок. Если два сопряженных валка имеют одинаковое число оборотов, но различные диаметры, то их окружная скорость будет различной. Так, например, если диаметр нижнего валка больше, чем верхнего, то металл у поверхности нижнего валка стремится получить большую скорость и увлечет за собой верхний валок, насколько позволяют зазоры в муфтах и шпинделях, причем в ряде случаев возможна разница на полоборота и даже больше. Как только полоса выходит из валков, верхний валок на мгновенье останавливается, и после того как шпиндель повернется на угол, соответствующий зазору в муфтах, верхний валок снова включается во вращение. В такие моменты возникают удары, которые могут привести к поломке муфт и шеек (подобные явления происходят также при холостом ходе, когда реборды валка соприкасаются). Во время прокатки верхний валок действует как тормоз. Это торможение не только увеличивает расход энергии, но и может привести к образованию трещин по краям прокатываемой заготовки из-за повышенных напряжений в металле. При прокатке малопластичного материала это может привести к отрыву полок у балок и тому подобных профилей.

При правильном расположении калибров по отношению к линии прокатки при том же числе оборотов валков возникает меньшая нагрузка на детали рабочей линии стана, расход энергии падает, износ валков уменьшается и устраняются чрезмерные напряжения в прокатываемом металле. Калибры правильно расположены в том случае, когда средняя скорость выхода частиц прокатываемой штуки под действием верхнего валка равна средней скорости их выхода под действием нижнего валка. При одинаковом распределении обжатия в калибре окружная скорость в основании калибра верхнего валка равна окружной скорости в основании калибра нижнего валка. Таким образом, калибр состоит из двух одинаковых частей. Одна часть лежит выше определенной линии, другая часть — ниже той же линии. Эту линию называют нейтральной линией; она проходит через центр тяжести калибров[1]. Нейтральная линия должна совпадать с линией прокатки.

В калибрах простой формы легко найти нейтральную линию; для калибров сложной формы это выполнить труднее. В этих случаях следует сначала определить центр тяжести сечения калибра. Линию центра тяжести сечения калибра можно определить с достаточной точностью, установив шаблон калибра, сделанный из листового железа, на острое ребро в положении равновесия. Другой способ определения центра тяжести основан на применении планиметра. При этом поступают следующим образом [11]: вычерчивают калибр между двумя параллельными линиями $x - x$ и $y - y$ (рис. 19 и 20); затем наносят на чертеж площади F_1 и F_2. С помощью планиметра определяют величину площади F_1.

$$F_1 = BH_m,$$

где

$$H_m = \frac{F_1}{B},$$

[1] Более точно нейтральной линией следует называть линию, относительно которой моменты сил, приложенные к прокату со стороны верхнего и нижнего валков, равны (*Прим. ред.*).

а затем величину площади F_2.

$$F_2 = B H'_m,$$

где

$$H'_m = \frac{F_2}{B}.$$

Высоты H_m и H'_m должны иметь одинаковую величину. Предположим $H_m - H_m' = u$, тогда на площади F_2 можно расположить прямоугольник шириной B и высотой u. Тогда средние высоты

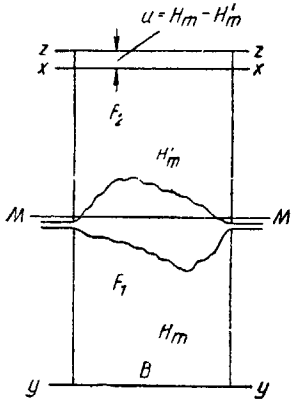


Рис. 19. Определение нейтральной линии калибра

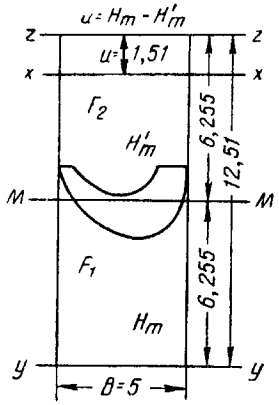


Рис. 20. Нейтральная линия калибра, предназначенного для прокатки турбинной лопатки

площади F_1 и увеличенной площади F_2 будут одинаковы. Проведя на середине расстояния между линиями $y - y$ и $z - z$ линии $M - M$, делят калибр на две одинаковые по площади части. Тогда линия $M - M$ будет нейтральной линией изображенных на этих фигурах калибров. На рис. 20 показано применение этого способа в случае калибра турбинной лопатки. Этот способ пригоден для всех профилей какой угодно неправильной формы. С помощью этого способа можно по имеющемуся чертежу калибра правильно расположить его по отношению к линии прокатки, а также определить правильность выбора верхнего давления.

Условием применимости описанного способа является равномерное распределение обжатия по калибру. Это не всегда возможно при прокатке различных участков профиля. Все фасонные профили обычно прокатывают из заготовок прямоугольного сечения, причем в этих случаях обязательно возникает неравномерное распределение металла по калибру, о чем ниже будет сказано подробнее. Нейтральная линия представляет собой условную прямую линию, которая при одинаковом размере обоих валков, числе

оборотов валков и средней скорости прокатки (по отношению к верхнему и нижнему валкам) совпадает с линией прокатки. Однако при неравномерном распределении обжатия нельзя определить нейтральную линию без учета формы профиля, входящего в рассматриваемый калибр. Так, например, если коэффициенты обжатия распределены так, как показано на рис. 21, т. е. обжатию подвержены лишь полки, линия прокатки должна быть по середине исходного сечения полок. Если условия обжатия соответствуют показанным на рис. 22, т. е. обжимается лишь шейка, то калибр располагается так, чтобы линия прокатки была на середине исходного сечения шейки.

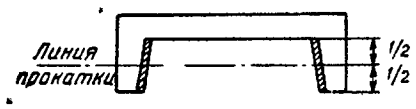


Рис. 21. Положение калибра швеллера относительно линии прокатки при обжатии полок

Рис. 22. Положение калибра швеллера относительно линии прокатки при обжатии шейки

Отсюда следует, что чем больше должно быть обжатие полок по сравнению с обжатием шейки, тем выше должна лежать шейка над линией прокатки. С другой стороны, чем больше должно быть обжатие шейки по сравнению с обжатием полок, тем ближе середина шейки калибра должна располагаться к линии прокатки. Следует также различать положение нейтральной линии закрытого или открытого калибров. Поскольку в закрытом калибре шейка получает большее обжатие, чем полки, нейтральная линия должна лежать ближе к шейке, чем в открытом калибре, в котором полки обжимаются больше, и, следовательно, нейтральная линия более отодвигается от шейки. Если нельзя точно провести нейтральную линию в закрытом калибре для швеллера, то не будет ошибкой, если ее расположить вблизи шейки или по ее середине, поскольку в этом случае можно не опасаться ударов при захвате. В случае, когда нейтральная линия расположена значительно ниже шейки, то могут возникнуть удары. В калибре для швеллера с закрытой частью внизу слишком высокое расположение нейтральной линии связано с затруднениями, так как верхний валок большего диаметра не может увлечь за собой нижний валок меньшего диаметра. Объясняется это тем, что в нижнем валке прокатываемая заготовка быстро охлаждается в узких и глубоких вырезах калибра и поэтому застревает в нем. Так, на одном прокатном стане был такой случай, когда верхняя граница закрытой полки была расположена на 5 *мм* ниже линии прокатки (рис. 23). Однако в процессе прокатки не наблюдалось ни ударов, ни других неполадок. Отсюда видно, что следует стремиться к тому, чтобы при послед-

них проходах во время прокатки швеллера тот валок, в котором выточены калибры для полок, не увлекали за собой спаренный валок, а несколько притормаживали его. В результате более низкого расположения закрытого калибра для швеллера по отношению к линии прокатки уменьшается опасность возникновения ударов. Недостатком такого расположения калибра является то, что валок, в котором расположены врезы для полок, слишком ослабляется. В таком случае уход за выводными проводками соответствующих калибров должен быть более тщательным. В калибре для швеллера с открытыми фланцами нейтральная линия располагается при обычных величинах обжатий на 5 *мм* выше нейтральной линии, найденной с помощью планиметра, что основано на практических данных.

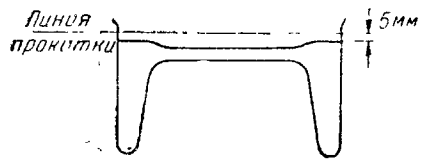


Рис. 23. Положение калибра швеллера относительно линии прокатки

Верхнее и нижнее давление, расположение калибров и нейтральной линии в стане трио

Различают два рода калибров в валках станов трио:

а) валки, в которых один под другим расположены одинаковые калибры (сопряженные калибры);

б) валки, в которых один под другим расположены различные калибры.

Конструкция валков стана трио с сопряженными калибрами. В этом случае над или под каждым используемым калибром вытачивают такой же холостой калибр. Для лучшего использования валков стремятся, чтобы верхний и нижний валки были совершенно одинаковы. Тогда их можно менять местами, причем рабочий калибр становится холостым, а холостой калибр — рабочим. Если в данном комплекте валков все валки имеют одинаковый диаметр, то перемена валков не вызывает затруднений.

На валках станов трио стремятся в обеих плоскостях прокатки придать прокатываемой заготовке определенное направление, т. е. работать с верхним или нижним давлением. Поскольку верхний и нижний валок должны быть взаимозаменяемыми, т. е. при перемене их мест не должны изменяться ни верхнее, ни нижнее давление, то положение в клети трио сложнее, чем в клети дуо.

Для решения этой задачи применяют следующие способы. По первому способу в обеих плоскостях прокатки предусматривают верхнее давление, т. е. верхний валок всегда имеет больший диаметр. Для этого наносят две линии прокатки, как показано на рис. 24 пунктирными или штрихпунктирными линиями. Штрихпунктирной линии прокатки соответствует нейтральная линия тех калибров, которые работают в верхнем ряду. Нейтральная линия нижнего ряда калибров соответствует пунктирной линии. Верхний валок имеет больший диаметр, чем средний, когда его устанавливают вверху. Средний валок имеет больший диаметр, чем нижний, когда его устанавливают внизу. Вследствие этого во всех калибрах возникает верхнее давление. Указанные соотношения остаются неизменными, когда верхний и нижний валки меняются местами.

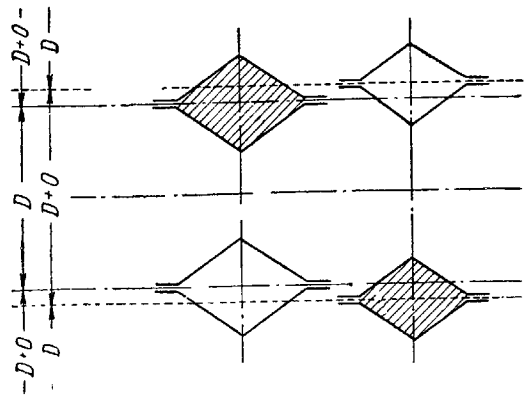


Рис. 24. Валки стана трио с сопряженными калибрами. Случай 1: диаметр верхнего валка является большим. Калибры размещены на двух линиях прокатки

Второй случай характеризуется тем, что диаметр среднего валка больше или меньше диаметров верхнего и нижнего валков.

Если диаметр среднего валка больше, то в верхнем ряду калибров возникает нижнее давление, а в нижнем ряду верхнее. Если диаметр среднего валка меньше, то, наоборот, в верхнем ряду возникает верхнее давление, а в нижнем — нижнее.

Нейтральная линия всех калибров совпадает с верхней или нижней линией прокатки. Верхний или нижний валки имеют одинаковые диаметры, так что их можно менять местами без изменения указанных соотношений (рис. 25).

Средний валок целесообразно выполнить большего диаметра, когда он является матричным, и, наоборот, — с меньшим диаметром, когда он является патричным [12].

Какой способ из этих двух выгоднее, можно решить лишь в каждом индивидуальном случае. Оба имеют преимущества и недостатки. Следует учесть, что в валке с закрытыми частями калибра прокатываемая штука заклинивается, поэтому их положе-

ние в значительной мере определяет направление выхода заготовки.

Влияние проводок усиливается или уменьшается в зависимости от того, какое давление имеется — верхнее или нижнее.

Третий случай относится к применению четырех валков. При применении способов, описанных в случаях 1 и 2, верхние и нижние валки изнашиваются вдвое медленнее, чем средний валок, в котором калибры работают все время. Чтобы сделать условия работы валков одинаковыми, изготовляют второй средний валок, который вводят в действие при смене мест нижнего и верхнего

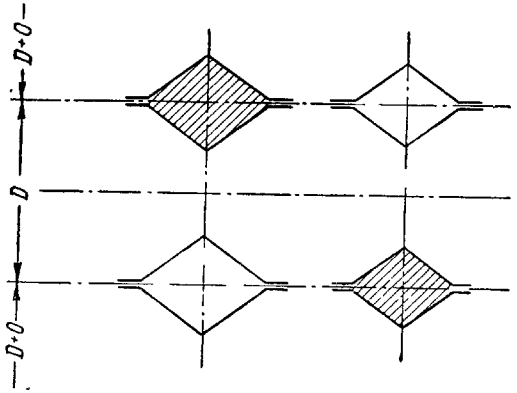


Рис. 25. Валки стана трио с сопряженными калибрами. Случай 2: нейтральная линия всех калибров совпадает с верхней или нижней линиями прокатки. Средний валок имеет меньший диаметр по сравнению с верхним или нижним

валков. В такой комплект входят четыре валка. При этом способе время переточки валков и их износ сокращаются на 33% по сравнению с работой с тремя валками; однако следует отметить, что требуется тщательная пригонка валков. Пример использования этого способа дан Крамером [12].

При этой системе надо следить за тем, чтобы валки не могли сдвигаться относительно друг друга в боковом направлении, так как при этом изнашиваются реборды валков, в которых расположены холостые калибры. В таком случае после смены валков площадь калибра оказалась бы увеличенной, что могло бы привести к образованию заусенцев или изменению бокового обжатия. Это взаимное смещение валков возникает прежде всего от продольного давления вследствие различного бокового обжатия в открытых частях калибров при несимметричных профилях. Для

того чтобы боковое смещение валков было как можно меньше, необходимо сильнее затянуть боковые болты на подушках и выполнить по возможности двойные реборды. Следует также хорошо

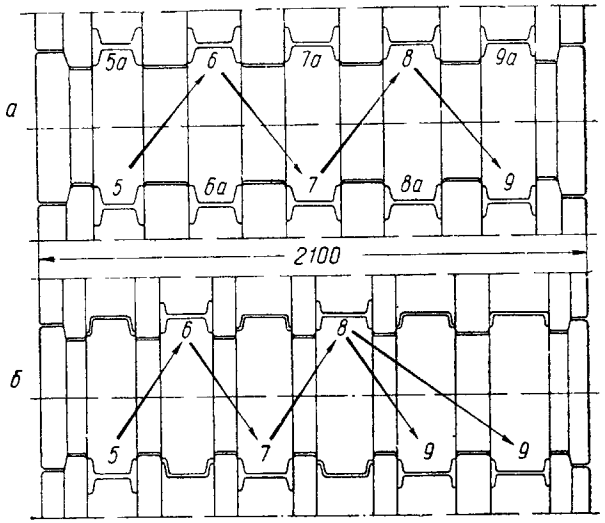


Рис. 26. Расположение калибров в валках стана трио:

а — верхний и нижний валки одинаковы и взаимозаменяемы; *б* — верхний и нижний валки различные

смазывать реборды. На рис. 26, показано расположение калибров в валках стана трио, предназначенных для прокатки фасонного профиля.

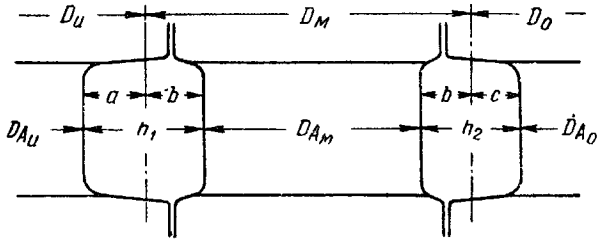


Рис. 27. Калибры в валках стана трио

Конструкция валков стана трио с несопряженными калибрами. Сумма верхних давлений согласно рис. 27 может быть вычислена следующим образом.

Сумма верхних давлений

$$(D_{A_O} - D_{A_M}) + (D_{A_M} - D_{A_U}) = D_{A_O} - D_{A_U} =$$
$$= (D_O - 2c) - (D_U - 2a),$$

где O — верхний валок;
M — средний валок;
U — нижний валок.

Если исходить из того, что диаметры условных некалиброванных валков одинаковы, т. е.

$$D_O = D_M = D_U,$$

то сумма верхних давлений равна $2a - 2c$. Из рис. 27 можно вывести, что

$$2(h_1 - b) - 2(h_2 - b) = 2h_1 - 2b - 2h_2 + 2b = 2h_1 - 2h_2 = 2\Delta h.$$

Следовательно, сумма верхних давлений в обоих рядах калибров равна удвоенной величине обжатия по высоте в верхнем ряду. Таким образом, величина обжатия по высоте в нижнем ряду не влияет на величину верхнего давления. Верхнее давление равномернее всего распределяется в обоих рядах калибров, когда

$$D_{A_O} - D_{A_M} = D_{A_M} - D_{A_U} = \Delta h,$$

и, следовательно,

$$2b - 2c = 2a - 2b = \Delta h.$$

Из рис. 27 видно, что $a - c = \Delta h$. Отсюда следует, что

$$2b - 2c = a - c \text{ и } 2b = a + c.$$

Поскольку $\Delta h = a - c$, то в результате сложения двух последних уравнений получается

$$2b + \Delta h = 2a = 2(h_1 - b) = 2h_1 - 2b;$$
$$4b = 2h_1 - \Delta h = 2h_1 - h_1 + h_2 = h_1 + h_2.$$
$$b = \frac{h_1 + h_2}{4}.$$

Если в стане трио установлены одинаковые валки, у которых до проточки сохраняется условие $D_O = D_M = D_U$, то

$$b = \frac{h_1 + h_2}{4}.$$

Тогда верхнее давление распределяется равномерно в обоих рядах калибров и соответствует в них обжатию по высоте в верхнем ряду. Если калибровка выполнена таким образом, что в каждой паре калибров обжатие по высоте в верхнем ряду калибров одинаково, то в каждой паре калибров возникает одинаковое верхнее давление.

Если диаметр верхнего валка больше на эту величину, а диаметр нижнего валка настолько же меньше, то во всех парах калибров не будет ни верхнего, ни нижнего давления. При калибровке блуминга трио верхнее давление выбирают в пределах от 5 до 15 *мм* с тем расчетом, чтобы прокатываемая заготовка получила желаемое направление при выходе и не поднималась вверх.

Из условия $b = \frac{h_1 + h_2}{4}$ следует:

$$1.\ a - b = (h_1 - b) - b = h_1 - 2b = \frac{h_1 - h_2}{2};$$

$$b - c = b - (h_2 - b) = 2b - h_2 = \frac{h_1 - h_2}{2}.$$

Разность высот прямоугольников в обоих калибрах равна половине обжатия по высоте в верхней плоскости прокатки.

$$2.\ a = h_1 - b = h_1 - \frac{h_1 + h_2}{4} = \frac{1}{4}(3h_1 - h_2).$$

Центр тяжести нижнего калибра лежит на уровне $\frac{h_1}{2}$.

Расстояние между линией прокатки и линией центров тяжести равно

$$a - \frac{h_1}{2} = \frac{1}{4}(3h_1 - h_2) - \frac{h_1}{2} = \frac{1}{4}(h_1 - h_2).$$

Соответственно

$$b = \frac{h_2}{2} = \frac{1}{4}(h_1 - h_2).$$

Следовательно, линия прокатки перерезает калибр не по середине, а на одной четверти обжатия по высоте в верхнем ряду калибров. У лежащих друг над другом в вертикальном направлении калибров различной высоты нейтральная линия не может совпадать с линий прокатки.

Конструкция валков стана трио с неодинаковыми калибрами в обоих рядах имеет следующие преимущества.

1. Вследствие снижения верхнего давления уменьшается разность между рабочими диаметрами, и, следовательно, между окружными скоростями. Благодаря этому устраняется опасность повреждения поверхности прокатываемого металла.

2. Уменьшаются износ валков и расход энергии.

3. Происходит более равномерная нагрузка всех передающих усилие деталей, шестеренных валков и шпинделей.

4. Рабочий диаметр нижнего валка может быть увеличен, что желательно, так как чаще всего ломается именно этот валок.

Проходы в вертикальных, лежащих друг над другом калибрах имеют место не только при прокатке блумов и заготовки, но также и при прокатке сортовой стали. Это делается для того, чтобы обходиться меньшей длиной бочки валков или меньшим количеством клетей. При прокатке сортовой стали, однако, последние проходы производят в не зависящих друг от друга калибрах, так как от этого деформация оказывается более равномерной и калибр заполняется более надежно. По этой причине прокатку быстро охлаждающихся профилей ведут не в лежащих друг над другом вертикально калибрах, а в расположенных крест-накрест. При прокатке таких профилей места на бочках большей частью достаточно, так как ширина калибров небольшая. На рис. 28 показано расположение калибров для прокатки двутавровых балок на стане трио. В них делают несколько проходов в калибрах, расположенных вертикально друг над другом. Для равномерного распределения давления в верхнем и нижнем рядах рабочий диаметр среднего валка в середине ряда калибров равен

$$D_{A_M} = D_M - \frac{s_{n-1} + s_n}{2},$$

где D_M — начальный диаметр среднего валка до нарезания калибров;

s — высота калибра по шейке профиля;

n — число проходов в верхнем ряду калибра;

$n-1$ — число предыдущих проходов в нижнем ряду в лежащих друг над другом неодинаковых калибрах.

Тогда

$$D_{A_O} = D_{A_M} + (s_{n-1} - s_n);$$

$$D_{A_U} = D_{A_M} - (s_{n-1} - s_n).$$

При одинаковых начальных диаметрах трех расположенных друг над другом валков верхнее давление в середине калибра в каждом ряду калибров будет равно

$$s_{n-1} = s_n.$$

В чистовых валках, у которых нет расположенных друг над другом калибров разной высоты, в середине калибра имеем

$$D_{A_M} = D_M - s_n.$$

Здесь нейтральная линия калибров лежит на линии прокатки и верхнее давление в середине калибра равно разности начальных диаметров валков.

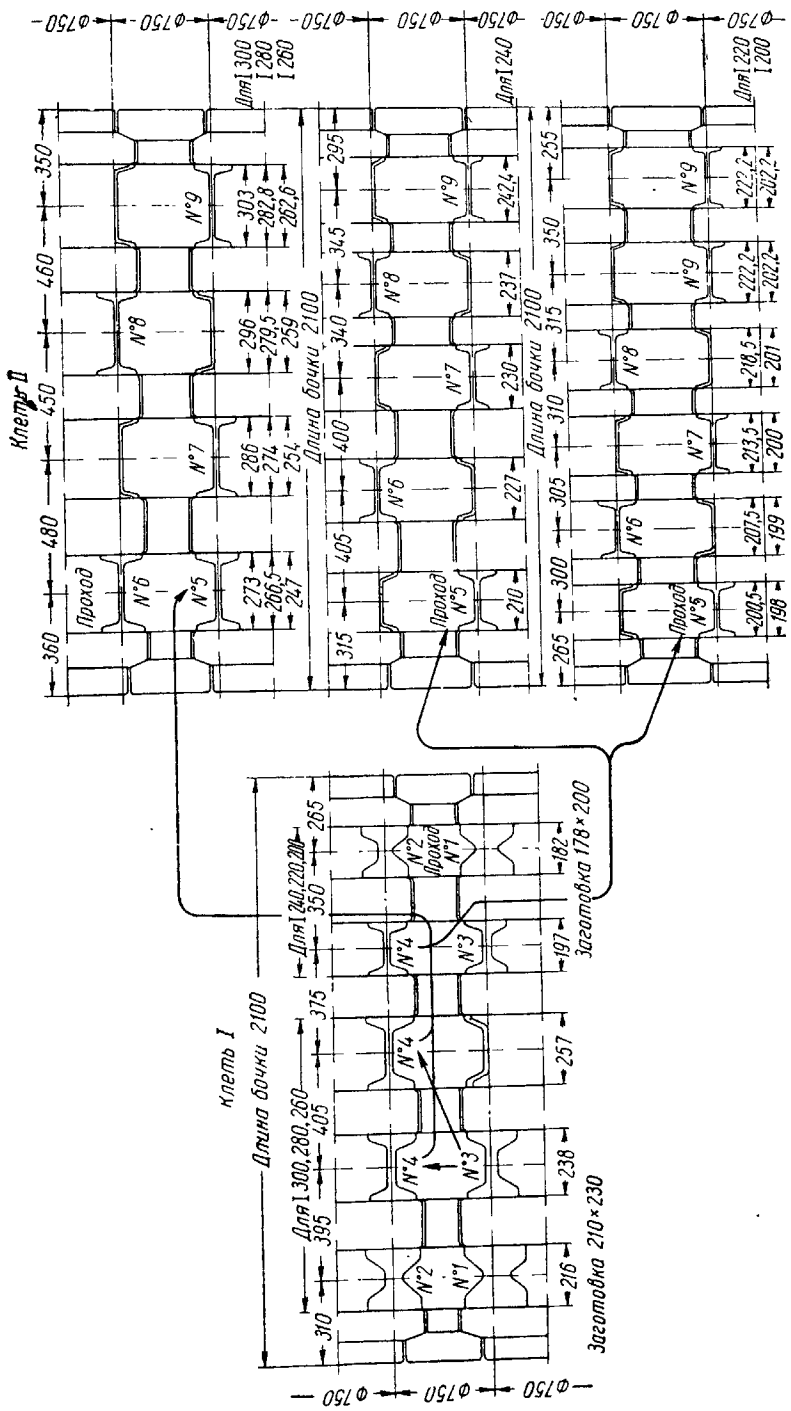


Рис 28. Валки для прокатки двутавровых балок № 30—20 на стане трио

В валках, показанных на рис. 28, начальные диаметры трех валков сделаны одинаковыми; при этом в середине ширины чистового калибра верхнее давление равно нулю. Для создания требуемого направления металла при выходе здесь не требуется верхнее давление, поскольку вследствие трения в закрытых частях калибров имеется гарантия, что прокатываемая полоса прочно ляжет на выводную проводку и будет направлена должным образом.

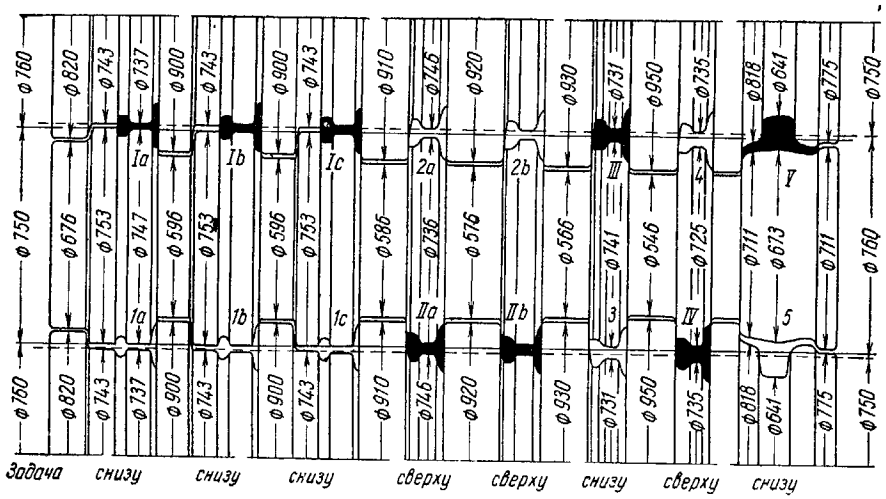


Рис. 29. Валки чистового стана трио для прокатки рельсов

В вертикально расположенных друг над другом калибрах разной высоты в валках трио нейтральная линия каждого из калибров не совпадает с линией прокатки. В связи с этим для равномерного распределения верхнего давления в обоих рядах калибров, т. е. для равномерного распределения разницы в рабочих диаметрах валков или окружных скоростях валков, величина b должна быть равна

$$b = \frac{h_1 + h_2}{4}.$$

На рис. 29 показаны чистовые валки стана трио 760/750 для прокатки рельсов с использованием холостых калибров.

2. ОСНОВЫ РАСЧЕТА

После первых пропусков, при которых устраняется литая структура слитка, можно считать, что прокатываемый металл практически однороден и объем заготовки при деформации является неизменным. Между характеризующими процесс прокатки

основными параметрами существуют следующие соотношения:

а) обозначения:

h_0, b_0, l_0 — соответственно высота, ширина, длина перед проходами, *мм*;

h_1, b_1, l_1 — высота, ширина, длина после прохода, *мм*;

Q_0, Q_1 — площадь поперечного сечения заготовки до и после прохода, *мм*^{2};

$Q_0 - Q_1$ — абсолютное обжатие по площади, *мм*^{2};

$\frac{Q_1}{Q_0} = a$ — вытяжка;

$\frac{Q_0 - Q_1}{Q_0} 100 = A$ — относительное обжатие, %;

$h_0 - h_1 = \Delta h$ — абсолютное обжатие по высоте, *мм*;

$\frac{h_0 - h_1}{h_0} 100 = A_H$ — относительное обжатие по высоте, %;

$b_1 - b_0 = \Delta b$ — уширение, *мм*;

$\frac{h_1}{h_0} = \gamma$ — коэффициент обжатия (меньше 1);

$\frac{b_1}{b_0} = \beta$ — коэффициент уширения (больше 1);

$\frac{l_1}{l_0} = \lambda$ — коэффициент вытяжки (больше 1);

$\frac{h_0}{h_1} = Z_H$ — отношение высот (больше 1);

б) зависимости:

$$\frac{h_0 - h_1}{h_0} 100 = \left(1 - \frac{1}{Z_H}\right) 100 = A_H, \%;$$

$$Z_H = -\frac{100}{100 - A_H};$$

$$\frac{h_1 b_1 l_1}{h_0 b_0 l_0} = \frac{h_1}{h_0} \frac{b_1}{b_0} \frac{l_1}{l_0} = \gamma \beta \lambda = 1.$$

При калибровках таких профилей, которые прокатываются в калибрах, не ограниченных по ширине, со свободным уширением, исходной величиной служит относительное обжатие по высоте.

В тех случаях, когда калибры препятствуют уширению или ограничивают его, так что ширина проката после прохода имеет определенную величину, то исходной величиной при калибровке часто считают коэффициент вытяжки λ. Площадь поперечного сечения калибров от начального прохода до чистового прохода обозначают как Q_0, Q_1,... Q_n, где *1*, *2*,... *n* — номера проходов. Величину площади поперечного сечения проката, считая от чистового прохода до исходного, можно обозначить через F_1, F_2... F_{x+1}, где *1*, *2*,... *x* — номера проходов.

При простых сечениях калибров, применяемых для прокатки слитков, заготовки, слябов и т. п., калибровку ведут, начиная с первого прохода до конечного сечения, в то время как при более сложных фасонных профилях калибровку ведут от конечного профиля к исходному сечению.

Рассмотрим соотношения между параметрами прокатки для последовательного ряда калибров. Исходим из конечного сечения F_1. Тогда

$$F_2 = F_1\lambda_1;\quad F_3 = F_2\lambda_2 = F_1 \cdot \lambda_1 \cdot \lambda_2;$$

$$F_4 = F_3\lambda_3 = F_1 \cdot \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3;$$

$$F_x = F_{x-1}\lambda_{x-1} = F_1\lambda_1\lambda_2\lambda_3 \ldots \lambda_{x-1}.$$

Для первого прохода имеем:

$$F_{x+1} = F_x\lambda_x = F_1 \cdot \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 \ldots \lambda_{x-1}\lambda_x;$$

$$\lambda_1 = F_2 : F_1;\quad \lambda_2 = F_3 : F_2;\quad \lambda_x = F_{x+1} : F_x$$

Если вытяжка для всех калибров постоянна, т. е.

$$\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_4 = \ldots = \lambda_{x-1} = \lambda_x = \text{const},$$

то в этом случае имеем

$$F_2 = F_1 \cdot \lambda;\quad F_3 = F_2 \cdot \lambda = F_1\lambda^2;\quad F_4 = F_3 \cdot \lambda = F_1 \cdot \lambda^3;$$

$$F_5 = F_4 \cdot \lambda = F_1 \cdot \lambda^4;$$

$$F_x = F_{x-1} \cdot \lambda = F_1 \cdot \lambda^{x-1};\quad F_{x+1} = F_x\lambda = F_1 \cdot \lambda^x.$$

В первом проходе

$$F_1\lambda^x = F_{x+1};$$

$$\lambda = \sqrt[x]{F_{x+1} : F_1};$$

$$x = \frac{\log F_{x+1} - \log F_1}{\log \lambda}.$$

Если среднюю вытяжку за проход обозначить через λ_m, то вытяжка после двух проходов равна λ_m^2, после трех проходов — λ_m^3, а после n проходов — λ_m^n. В табл. 1 приведены значения вытяжек в зависимости от числа проходов для различных относительных обжатий [17]. Применение этой таблицы могут иллюстрировать два примера.

Таблица 1

Величина коэффициента вытяжки при различных числах проходов и различных относительных обжатиях

Число проходов	Относительное обжатие, %							
	5	10	15	20	25	30	35	40
1	1,053	1,111	1,177	1,250	1,333	1,429	1,538	1,667
2	1,108	1,235	1,384	1,563	1,777	2,041	2,367	2,779
3	1,167	1,372	1,628	1,953	2,369	2,916	3,642	4,63
4	1,228	1,524	1,915	2,441	3,160	4,165	5,610	7,72
5	1,293	1,694	2,254	3,052	4,215	5,95	8.625	12,87
6	1,361	1,882	2,65	3,815	5,620	8,50	13,27	21,4
7	1,432	2,090	3,12	4,77	7,49	12,15	20,40	35,7
8	1,508	2,323	3,67	5,96	9,98	17,35	31,0	59,5
9	1,587	2,581	4,32	7,45	13,32	24,8	48,3	99,2
10	1,670	2,868	5,08	9,31	17,75	35,4	74,2	166
11	1,758	3,188	5,98	11,64	23,65	50,5	114	276
12	1,851	3,540	7,03	14,55	31,5	72,2	176	460
13	1,948	3,93	8,27	18,20	42,0	103	271	765
14	2,051	4,37	9,72	22,75	56,1	147	407	1280
15	2,159	4,86	11.43	28,40	74,8	211	640	2120
16	2,273	5,40	13,47	35,50	99,6	301	985	3530
17	2,392	6,00	15,82	44,40	133	430	1515	5900
18	2,518	6.66	18,62	55,50	177	615	2320	9800
19	2,651	7,40	21,9	69,30	236	880	3580	—
20	2,791	8,23	25,8	86,70	315	1260	5500	—
21	2,938	9,14	30,4	108,0	420	1790	8500	—
22	3,092	10,15	35,7	135,5	560	2560	—	—
23	3,255	11,29	42,0	169,0	745	3650	—	—
24	3,427	12,53	49,4	211,0	990	5210	—	—
25	3,607	13,92	58,1	264,0	1325	7420	—	—

Пример I. Блум 200 × 200 *мм* должен быть прокатан на заготовку 50 × 50 *мм*. Общая вытяжка составляет 200 × 200 : 50 × 50 = 16. Из табл. 1 следует, что при обжатии, равном за проход 25%, через 9 проходов общая вытяжка составит 13,32, а после 10 проходов — 17,75 Следовательно, прокатка должна быть проведена в 10 проходов. Среднее обжатие при этом будет несколько менее 25%.

Пример 2. Относительное обжатие в чистовом калибре должно составлять 5%, в предчистовом калибре 10%, а в других калибрах около 30%. Общая вытяжка составляет и в этом случае 16. Вытяжка в предчистовом и чистовом калибрах составляет 1,053 × 1,111 = 1,168. Для других калибров вытяжка будет равна 16 : 1,168 = 13,7. При среднем обжатии за проход 30% через 7 проходов общее обжатие составит 12,15 и через 8 проходов — 17,35. Если бы в данном примере потребная вытяжка 13,7 достигалась за 8 проходов, то средняя вытяжка за проход была бы меньше 30%. В этом случае в общей сложности необходимо иметь 10 калибров — восемь черновых, один предчистовой и один чистовой.

Следует сказать, что на практике редко поступают так, как показано выше. В приведенных выше формулах не учтено, что с изменением поперечного сечения меняется также и температура

прокатываемой заготовки. По возможности, однако, надо так проектировать калибровку, чтобы в первых проходах достигались очень большие вытяжки, поскольку прокатываемый металл вначале имеет высокую температуру и значительную пластичность. К концу прокатки температура и пластичность металла снижаются, и вытяжка должна постепенно уменьшаться, что способствует уменьшению износа валков.

Прокатка должна проводиться таким образом, чтобы все калибры изнашивались равномерно, что позволяет производить их переточку одновременно и в одинаковой степени.

Если вытяжка должна после первого прохода равномерно увеличиваться, то между величиной вытяжки в отдельных проходах должны соблюдаться следующие соотношения. Если поперечное сечение проката в чистовом калибре составляет F_1, а вытяжка в этом же калибре λ_1, то вытяжка в остальных калибрах равна

$$\lambda_2 = \lambda_1 + z; \quad \lambda_3 = \lambda_2 + z = \lambda_1 + 2z; \quad \lambda_4 = \lambda_3 + z = \lambda_1 + 3z;$$
$$\lambda_x = \lambda_{x-1} + z = \lambda_1 + (x-1)z,$$

где

$$z = \frac{\lambda_x - \lambda_1}{x-1}.$$

Соответственно имеем:

$$F_2 = F_1 \lambda_1;$$
$$F_3 = F_2 \lambda_2 = F_1; \ \lambda_1 \lambda_2 = F_1 \lambda_1 (\lambda_1 + z);$$
$$F_4 = F_3 \lambda_3 = F_1 \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 = F_1 \lambda_1 (\lambda_1 + z) \cdot (\lambda_1 + 2z);$$
$$F_x = F_{x-1} \lambda_{x-1} = F_1 \lambda_1 \lambda_2 \ldots \lambda_{x-1} = F_1 \lambda_1 (\lambda_1 + z)(\lambda_1 + 2z) \ldots [\lambda_1 + (x-2)z];$$
$$F_{x+1} = F_x \lambda_x = F_1 \lambda_1 \lambda_2 \ldots \lambda_{x-1} \lambda_x = F_1 \lambda_1 (\lambda_1 + z)(\lambda_1 + 2z) \ldots [\lambda_1 + (x-2)z][\lambda_1 + (x-1)z],$$

где F_{x+1} – исходное сечение заготовки.

Числовой пример. Имеем $\lambda_1 = 1{,}1$; $z = 0{,}05$. Тогда:

$$\lambda_2 = \lambda_1 + 0{,}05 = 1{,}15;$$
$$\lambda_3 = \lambda_2 + 0{,}05 = \lambda_1 + 2 \cdot 0{,}05 = 1{,}20;$$
$$\lambda_4 = \lambda_3 + 0{,}05 = \lambda_1 + 3 \cdot 0{,}05 = 1{,}25;$$
$$\lambda_x = \lambda_{x-1} + 0{,}05 = \lambda_1 + (x-1)0{,}05 = 1{,}1 + (x-1)0{,}05;$$
$$F_2 = F_1 \lambda_1 = F_1 \cdot 1{,}1;$$

$$F_3 = F_2 \lambda_2 = F_1 \cdot 1{,}1 \cdot 1{,}15;$$
$$F_4 = F_3 \lambda_3 = F_1 \cdot 1{,}1 \cdot 1{,}15 \cdot 1{,}2;$$
$$F_{x+1} = F_x \lambda_x = F_1 \cdot \lambda_1 \cdot \lambda_2 \ldots \lambda_x = F_1 \cdot 1{,}1 \cdot 1{,}15 \ldots [1{,}1 + (x-1)0{,}05].$$

В табл. 2 сопоставлен процесс прокатки круга диаметром 16 *мм* в 10 проходов при постоянной вытяжке с процессом прокатки, когда вытяжка возрастает с каждым проходом. В обоих случаях применена калибровка квадрат-овал. Общая вытяжка составляет в первом случае 3460 : 200 = 17,3, во втором случае 5520 : 200 = = 27,6. Такая большая вытяжка может быть достигнута без вреда для качества металла.

Таблица 2

Калибровка квадрат — овал

С постоянной вытяжкой, исходное сечение—квадрат 60 *мм*; конечное сечение — круг диаметром 16 *мм*, общая вытяжка 3460 : 200 = 17,3				С возрастающей вытяжкой, исходное сечение—квадрат 75 *мм*; конечное сечение—круг диаметром 16 *мм*; общая вытяжка 5520 : 200 = 27,6			
№ калибра	форма калибра	сечение *мм*²	λ	№ калибра	форма калибра	сечение *мм*²	λ
11	Квадрат	3460	—	11	Квадрат	5520	—
10	Овал	2420	1,43	10	Овал	3450	1,60
9	Квадрат	1860	1,30	9	Квадрат	2380	1,45
8	Овал	1300	1,43	8	Овал	1530	1,55
7	Квадрат	1000	1,30	7	Квадрат	1095	1,40
6	Овал	700	1,43	6	Овал	730	1,50
5	Квадрат	540	1,30	5	Квадрат	540	1,35
4	Овал	370	1,43	4	Овал	375	1,45
3	Квадрат	288	1,30	3	Квадрат	288	1,30
2	Овал	230	1,25	2	Овал	230	1,25
1	Круг	200	1,15	1	Круг	200	1,15

3. ПРОЦЕСС ПРОКАТКИ

Изменение поперечного сечения при прокатке может происходить:

а) без существенного изменения формы, т. е. с сохранением формы прокатываемой заготовки;

б) с существенным изменением формы сечения заготовки.

Первый случай имеет место при прокатке слитков, блумов, слябов, плоской полосы, ленты и т. п. Второй случай имеет место при прокатке уголков, тавровых и двутавровых балок и т. п. В процессах прокатки различных профилей имеются существен-

ные различия. При деформации в гладких валках работа прокатки заключается в основном в уменьшении высоты заготовки. Поскольку эта работа распределяется равномерно на все сечение, то его отдельные участки получают одинаковую естественную вытяжку, а смещение частиц металла происходит преимущественно в продольном направлении. В этом случае не только вытяжка, но и уширение всех частей сечения одинаковы. Размеры прокатываемой заготовки после каждого прохода можно легко рассчитать математически и определить опытным путем. При прокатке фасонных профилей, помимо уменьшения поперечного сечения, происходит изменение первоначальной прямоугольной формы сечения

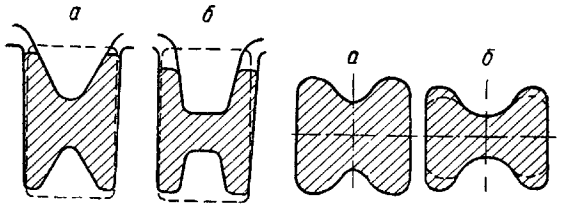


Рис. 30. Правильная (*а*) и неправильная (*б*) конструкция разрезных калибров

в более или менее сложный профиль. Таким образом, при калибровке валков для прокатки фасонных профилей в тех проходах, в которых изменяется форма сечения, равномерное обжатие для всех частей попеременного сечения не имеет места.

Если рассматривать отдельно каждый участок сечения, то вследствие неодинакового вертикального обжатия на этих участках возникает различная вытяжка. Опыт, однако, показывает, что все части профиля имеют примерно одинаковое удлинение. Это происходит вследствие того, что соседние участки действуют друг на друга. Более сильно обжатые и потому более перемещающиеся в продольном направлении участки увлекают менее деформированные участки за собой, в результате чего первые участки не получают максимально возможной вытяжки.

Различные вертикальные обжатия компенсируются различными боковыми смещениями материала (различное по величине уширение). Эти процессы пластической деформации возможны благодаря силам сцепления. Кирхбергу [4] удалось установить, что более обжатые участки сечения увлекают за собой менее деформируемые участки при том условии, что первые являются значительной частью всей площади поперечного сечения. Кирхберг установил также, что при этом происходит образование складок аналогично тому, как это имеет место при удлинении резиновой ленты. Однако в том случае, когда менее деформируемые участки составляют большую часть сечения, они препятствуют удлинению более обжатых частей, и соответственно этому определенная часть металла подвергается уширению. На рис. 30 наглядно представлено на практическом примере построение разрезного калибра для прокатки профильной стали, причем показано правильное и неправильное решение. В случае неправильного построения калибра прокатка более высокого слитка не может поправить положения, так как этим не устраняется слишком большая разница в величине вертикальных обжатий. Неправильный калибр должен быть коренным образом исправлен, и, в частности, необходимо уменьшить уширение средней части блума. Наиболее успешно это достигается посредством применения гребней клиновидного сечения. Кирхберг [4] рекомендует угол этого гребня делать равным 45° и указывает, что при таком сечении обеспечивается оптимальная работа калибра.

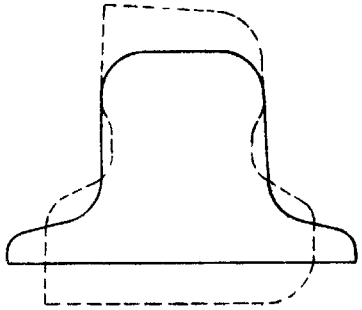


Рис. 31. Ребровой проход при прокатке рельсов

Особенно показательна в этом смысле пластическая деформация в ребровом проходе при прокатке рельса (рис. 31). Из-за малой устойчивости заготовки уменьшение высоты профиля незначительно (около 10%). Однако, поскольку для краев подошвы рельса имеет место значительно большее обжатие (примерно 30%), то металл этих участков сечения вынужден перемещаться в ширину, так как, несмотря на испытываемое ими большое обжатие, эти участки не могут вытянуть в продольном направлении участки сечения большего размера, испытывающие меньшее обжатие. Заслуживает внимания тот факт, что после такого реброваго пропуска достигается достаточно полное формирование подошвы рельса. Это особенно выгодно для станов с малым диаметром валков, поскольку достаточная длина фланцев может быть получена в результате реброваго пропуска без применения исходной заготовки большой высоты.

Вследствие неравномерного уменьшения высоты более обжатые части поперечного сечения находятся под воздействием значительных сжимающих напряжений в продольном направлении, а менее обжатые — под воздействием растягивающих напряжений, что следует учесть при калибровке. При неправильной калибровке эти напряжения остаются в металле после прокатки. Сложные соотношения деформации и напряженного состояния еще более осложняются при различной величине рабочего («катающего») диаметра валков.

Следует, однако, указать, что при прокатке таких простых сечений, как полоса, лента или лист, возникают собственные напряжения на кромках, так как сопротивление деформации в поперечном направлении меньше, чем в направлении прокатки [18].

Если профиль при прокатке уже в значительной степени образован и температура металла понизилась, то при неодинаковом вертикальном обжатии более обжатые участки профиля не могут увлечь за собой менее деформированные, в результате чего последние задерживаются и на прокате возникает волнистость. Так обстоит дело при прокатке двутавровых балок и тому подобных профилей, когда в последних калибрах шейка получает по сравнению с полками повышенное обжатие. Поэтому целесообразно для профилей с очень тонкой шейкой в двух последних калибрах или по крайней мере в самом последнем калибре обеспечивать минимальные обжатия шейки. Тем самым предотвращается возникновение слишком больших напряжений в шейке после охлаждения металла. В ряде случаев в прокатываемом металле возникает большая разность напряжений, что следует отнести в значительной мере за счет неправильной калибровки.

Основное правило калибровки гласит, что чем проще метод деформирования сечения, тем меньшее усилие требуется для деформации.

Из приведенных выше пояснений следует, что существуют калибровки двух различных видов: при калибровке первого вида все сечения прокатываемой заготовки испытывают одинаковое вертикальное обжатие; при калибровке второго вида — отдельные части сечения получают различные обжатия по высоте. Калибровку первого вида называют равномерной, второго вида — неравномерной.

Для правильного выполнения неравномерной калибровки необходимо знать, как влияют друг на друга соседние, различно обжимаемые частицы прокатываемого металла. Некоторые прокатчики считают, что калибровка — это искусство без вредных последствий применять неодинаковое обжатие для различных частей сечения.

При неравномерной калибровке неизбежные неодинаковые обжатия осуществляются в первых проходах, причем стараются сделать так, что после одного или самое большее двух проходов частицы металла распределяются по сечению примерно соответственно профилю. При последующих проходах стремятся получить окончательный профиль постепенным деформированием с одинаковым обжатием всех частей сечения. Такая схема деформации основана на следующем.

1. Напряжения в металле, вызванные неравномерным обжатием, легче выравниваются при высоких температурах и компактной форме сечения. Это выравнивание напряжений и истечение частиц в плоскости прокатки происходит лучше всего в первых проходах.

2. В последних проходах части профиля должны испытывать по возможности одинаковое обжатие, чтобы не было описанных выше перемещений частиц металла при обеспечении, однако, сплошного заполнения чистовых калибров.

Величина смещения материала в поперечном направлении, т. е. степень уширения при калибровке валков, имеет большое значение. Поэтому явление уширения явилось предметом многочисленных исследований [10]. Здесь приводятся лишь наиболее новые результаты этих исследований. Сообразно с этими исследованиями величина уширения Δb зависит от абсолютного обжатия Δh, радиуса валка r, относительного обжатия $\frac{\Delta h}{h_0}$, отношения $\frac{h_1}{2r}$, начальной ширины проката b_0, отношения $\frac{b_0}{h_0}$, отношения ширины к длине дуги захвата l_d (где $l_d = \sqrt{l \Delta h}$).

Кроме того, на величину уширения влияет температура прокатываемой заготовки и валков, химический состав металла валков и заготовки, состояние поверхности прокатываемой заготовки и валков, скорость вращения валков (скорость деформации) и коэффициент внешнего трения μ.

При горячей прокатке для вычисления уширения пригодны формулы Тафеля и Седлачека [20], а также Зибеля [19].

Формула Тафеля и Седлачека имеет вид:

$$\Delta b = \frac{b_0 \sqrt{b_0 r}\, \Delta h}{3 (b_0^2 + h_0 h_1)}.$$

Формула Зибеля

$$\Delta b = C l_d \frac{\Delta h}{h_0} = C \sqrt{r \Delta h}\, \frac{\Delta h}{h_0}.$$

Для облегчения пользования этими формулами разработаны номограммы [22].

С. Экелунд [23] предложил формулу для определения уширения, которая учитывает коэффициент трения μ и температуру металла t. Эта формула имеет такой вид:

$$\frac{1}{2} (b_1^2 - b_0^2) = 4m \sqrt{r \Delta h} - 2m (h_0 - h_1) \sqrt{r \Delta h},$$

где

$$m = \frac{1{,}6 \mu \cdot \sqrt{r \cdot \Delta h} - 1{,}2 \cdot \Delta h}{h_0 + h_1},$$

$\mu = 1{,}05 - 0{,}0005\ t$ (для стальных валков);
$\mu = 0{,}8(1{,}05 - 0{,}0005\ t)$ (для валков из отбеленного чугуна).

А. Могилянский [23] разработал счетную линейку, с помощью которой легко определяется ширина металла после прохода по формуле Экелунда, благодаря чему эта формула становится доступной для практического применения. А. Лендл [24] провел эксперименты, согласно которым формула Экелунда для расчета уширения дает наилучшие результаты. Однако влияние скорости деформации на уширение формулой Экелунда не учтено.

Знание величины уширения важно не только в случае свободного, но также и при затрудненном уширении. Величина последнего определяет в значительной степени износ калибров по ширине и, тем самым, срок службы валков. Затрудненное уширение дает возможность достигнуть точных размеров по ширине; кроме того, оно нужно для увеличения вытяжки и, наконец, для улучшения качества металла вследствие его всестороннего обжатия. Это особенно важно при таком состоянии металла, когда он особенно чувствителен к растягивающим напряжениям, как, например, при прокатке слитков с первоначальной литой структурой. По этой причине при калибровке обжимных валков относительное вертикальное обжатие должно быть сначала сравнительно небольшим. Затем обжатие должно увеличиваться, чтобы на гранях слитка не возникали трещины, для чего применяют ограниченное уширение и частые кантовки. Благодаря этому металл равномерно обжимается по всем направлениям и уплотняется. С уширением связана неблагоприятная деформация металла; она нарушает непрерывное течение материала в продольном направлении, вследствие чего на гранях прокатываемой заготовки возникают растягивающие напряжения. По мере увеличения вертикального обжатия и сопротивления трению эти напряжения могут настолько возрасти, что появятся трещины. Примером этому может служить тот факт, что при холодной прокатке ленточной стали, когда применяют слишком сильное обжатие без промежуточного отжига, всегда возникают трещины. То же происходит при прокатке листов и фольги. Такие же трещины появляются при прокатке полосовой стали, когда имеет место свободное уширение. В закрытом калибре с ограниченным уширением или без уширения деформация металла и смещение его частиц, т. е. течение материала является более равномерным. В работе Г. Крамер [25] «Поверхностные дефекты проката» и в статье этого же автора «О влиянии типа калибровки на возникновение трещин на прокате» [26], а также в статье А. Помпа и В. Люэга [27]. «Об образовании трещин при прокатке стали со свободным уширением» единогласно утверждается, что причиной возникновения трещин в участках свободного уширения являются напряжения, вызванные течением материала в поперечном направлении.

При деформации квадратной заготовки в валках с овальными калибрами отмечается неблагоприятное влияние свободного уширения на возникновение напряжений на кромках проката.

Возможность уменьшения опасности образования трещин на гранях заготовки с помощью частого и значительного по величине обжатия кромок имеет весьма большое практическое значение. Это может быть достигнуто путем обжатия по высоте после кантования или уменьшением допустимого уширения против величины свободного уширения. В случае, когда кантовка почему-либо

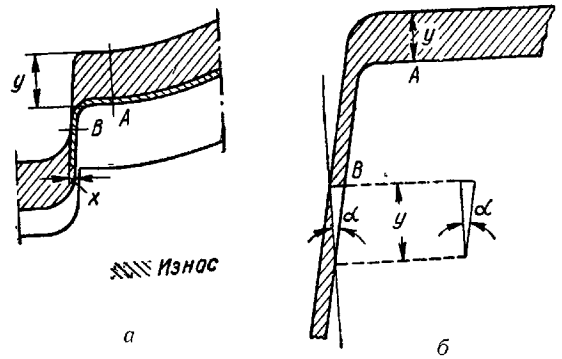


Рис. 32. Износ калибров и угол уклона:
а — неправильно, *б* — правильно

невозможна, следует применять калибры с боковыми гранями, ограничивающими уширение.

Ортель и Рихтер [28] доказали, что у слитков с ясно выраженной зоной транскристаллизации в участках свободного уширения легко образуется нарушение сплошности металла. Стали с плохой деформируемостью следует, если возможно, в литом состоянии (т. е. при первых проходах) прокатывать в закрытых калибрах при полном заполнении их металлом. При прокатке штрипсов также требуется значительное ограничение уширения, так как иначе получается прокат с трещинами на краях полосы. Разумеется, следует принимать во внимание вызванный этим значительный износ валков. При переходе на другие марки сталей необходимо пересмотреть калибровки, так как в противном случае увеличивается износ валков. Высокая экономичность работы современного прокатного цеха требует не только большой производительности, но и максимальной эффективности использования валков. Условием для этого является правильный выбор величины ограниченного уширения, которое должно быть настолько малым, чтобы не увеличить износ калибров.

Значение этого положения видно из рис. 32. Когда калибр изношен, то для получения первоначальной ширины калибра в

месте B, следует снять на вальцетокарном стане большую площадь в месте A, что ухудшает использование валков. Для устранения такого положения необходимо, чтобы величина износа в месте B относилась к величине износа в месте A, как $\frac{x}{y} = \sin\alpha$, где α — угол выпуска калибра (рис. 32, *б*). Для уменьшения износа калибров по ширине и достижения правильного соотношения с износом калибра по ширине и высоте ограниченное уширение в месте B должно составлять:

$$x \leq y_0 \sin\alpha.$$

Здесь принято, что износ валков соизмерим с обжатием, что в первом приближении соответствует действительности.

Если, например, угол выпуска составляет 5°, то ограниченное уширение должно быть не более 0,1 y.

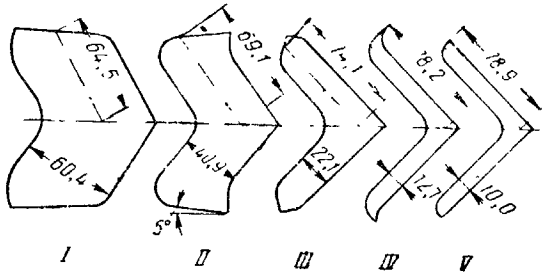


Рис. 33. Контрольное испытание калибровки для прокатки угловой стали по формуле уширения Экелунда

Таблица к рис. 33

Номер прохода	Высота перед проходом h_0 *мм*	Высота после прохода h_1, *мм*	Обжатие Δh *мм*	Обжатие Δh %	Ширина перед проходом b_0 *мм*	Ширина после прохода b_1, *мм*	Уширение $b_1 - b_0$, *мм*	Длина полки l_1 *мм*	Ограниченное уширение $b_1 - l_1$, *мм*
2	60,4	40,9	19,5	32	64,5	69,1	4,6	67,5	1,6
3	40,9	22,1	18,8	46	69,1	74,1	5,0	74,9	—0,8
4	22,1	12,7	9,4	40	74,1	78,2	4,1	74,9	3,3
5	12,7	10,0	2,7	21	78,2	78,9	0,9	79,5	—0,6

В этой связи можно сослаться на работы А. Лендла [24], который исследовал калибровку уголка 80 × 80 × 10 *мм*, созданную И. Дейцем. По данным Дейца, эта калибровка, показанная на

рис. 33, обеспечивает минимальный износ валков. Результаты контрольных исследований формулы Экелунда для расчета уширения, проведенных Лендлем с помощью линейки Могилянского, приведены на рис. 33 и в относящейся к нему таблице. В последней графе этой таблицы даны величины ограниченного уширения $b_1 - l_1$. Согласно этой таблице, в третьем и пятом калибрах ограниченное уширение отрицательно, т. е. в этих калибрах возникает свободное уширение. Во втором калибре ограниченное уширение составляет 1,6 *мм*, а его допустимая величина равна

$$\sin 5° \cdot 19{,}50 = 0{,}09 \cdot 19{,}50 = 1{,}76 \text{ мм}.$$

В четвертом калибре боковые грани имеют угол выпуска α, равный 45°, обжатие составляет 9,4 *мм*, $\sin 45° = 0{,}7$, и таким образом допустимое ограниченное уширение равно $0{,}7 \times 9{,}4 = 6{,}6$ *мм*. Получающееся в действительности ограниченное уширение составляет 3,3 *мм*, т. е. половину допустимой величины. Предложенная Дейцем калибровка дает относительно небольшой износ валков по ширине калибров.

В другом исследовании Лендл сравнивает значения уширения, полученные по формуле Экелунда, с теми, которые возникают при малоприменяемой калибровке углового железа. Результаты вычислений позволили установить, что причиной большого износа валков является весьма высокое ограниченное уширение и появление заусенца.

Подобные же исследования проводились Лендлем на калибровках для двутавровых балок и швеллеров [24]. В этом же направлении проводит исследования З. Вузатовский [29].

Износ валков и вызванное этим износом заполнение калибров целесообразно изучать при различных калибровках. Особенно необходимо такое изучение для таких профилей, которые не могут быть охвачены прямоугольными калибрами, т. е. когда уширение нельзя определить расчетным путем. В таких случаях для выяснения причины дефектов проката может быть полезно исследование износа калибров у бывших в эксплуатации валков. В наиболее сильно изношенных калибрах следует уменьшить нагрузку путем более оптимального распределения обжатий.

Глава II

ПРОКАТКА ПЛОСКИХ И КВАДРАТНЫХ СЛИТКОВ И КАЛИБРОВКА ОБЖИМНЫХ ВАЛКОВ

Общие понятия

Слитки получаются при отливке металла в изложницы. Они имеют квадратное, прямоугольное, круглое или овальное поперечное сечение; значительно реже применяют изложницы с другими формами поперечного сечения. Если при прямоугольном сечении изложницы одна сторона вдвое или более длиннее другой, то такие слитки называют плоскими слитками, или брамами.

Блумами называют прокатные, обычно квадратные, профили, подлежащие дальнейшей обработке на станах для получения готовых изделий. Они имеют большей частью прямоугольные сечения и закругленные углы сечением не менее 130 × 130 *мм*. Слябы отличаются от блумов тем, что их ширина по крайней мере в $1^1/_2$ раза больше толщины, величина которой обычно составляет не менее 75 *мм*.

Основы прокатки слитков

Прокатка слитков требует определенных правил по деформации металла. При первых проходах сначала устраняется конусность слитка, затем происходит уплотнение металла при обжатии за счет сварки газовых пузырей и уничтожения усадочной раковины. Одновременно разрушается литая структура, которая обусловливает низкие механические качества металла, определяемые наличием крупных и различно направленных кристаллов в поверхностных зонах. При первых проходах относительное обжатие должно быть малым и составлять не более 10—13%, затем оно должно возрастать, а в последних двух проходах снова уменьшаться. Вместо разрушенной литой структуры слитка в блумах образуется мелкозернистая гомогенная структура, что обеспечивает повышение механических свойств.

Измельчение зерна не вызывает большого увеличения предела прочности, но предел текучести и, главным образом, пластичность металла, значительно улучшаются. В середине периода прокатки

обжатие может быть настолько значительным, насколько это допускается углом захвата и энергосиловыми возможностями стана. Однако следует избегать слишком большого бокового обжатия вследствие ограничения уширения. В двух последних проходах обжатие должно быть снова уменьшено для получения правильного прямоугольного сечения в пределах установленных допусков. Если слитки, имеющие всегда газовые пузыри и усадочные раковины, подвергают вначале слишком сильной деформации, то в этих местах образуются трещины и возникают разные поверхностные дефекты, что в дальнейшем влечет за собой большие затраты на зачистку. Прокатка слитков, несмотря на кажущуюся простоту этого процесса, требует большого внимания, так как от нее в значительной мере зависит конечный результат работы всего прокатного цеха.

Чтобы избежать образования боковых и угловых трещин, слитки должны быть подвергнуты равномерному нагреву и прокатке при максимально возможной температуре. Особо бережного обращения требуют стали, которые по своей природе подвержены возникновению трещин, как, например, стали с низким содержанием марганца, с резко выраженной транскристаллизацией и с литейными дефектами. Для предупреждения трещин необходимо, кроме равномерного нагрева и возможно более высокой температуры прокатки, часто подвергать деформации боковые поверхности, т. е. проводить частую кантовку слитков. В этом отношении на некоторых заводах работают неправильно, выполняя много проходов между кантовками.

На немецких заводах выгодным считается такой способ работы: два прохода с обжатием по высоте, кантовка и ребровой проход, затем снова два прохода с обжатием по высоте, кантовка, ребровой проход и т. д. Иногда после первых двух проходов кантовка производится через каждые четыре прохода, после которых получается квадратное сечение. По достижении сечения 300 × × 300 *мм* кантовку следует производить после каждого второго прохода. Благодаря частой кантовке устраняется чрезмерное напряжение материала при свободном уширении и уменьшается опасность возникновения боковых трещин. В этом отношении некоторая гарантия достигается прокаткой в калибрах. Лучше всего это осуществляется естественно при прокатке металла с всесторонним обжатием в закрытых калибрах.

Типы обжимных станов

Слитки прокатывают на обжимных станах трио и дуо. Прокатные станы трио могут иметь неподвижные или регулируемые по высоте рабочие валки. В станах трио с неподвижными валками в каждом калибре производится только один проход при заполне-

нии калибра. На прокатных станах дуо в одном калибре обычно делается несколько проходов. Поэтому они имеют регулируемые по высоте валки подобно листопрокатным станам.

Раньше слитки прокатывали только на станах с неподвижными валками с одним проходом в каждом калибре. Валки калибровали таким образом, что прокатываемый металл заполнял калибр полностью. Для сварочного (пудлингового) железа это было необходимо для того, чтобы металл при каждом проходе подвергался всестороннему сжатию для удаления избыточных шлаков. При прокатке литых слитков калибры должны предотвратить или по крайней мере ограничить уширение для повышения вытяжек. Кроме того, при всесторонней деформации снимаются растягивающие напряжения и предупреждается образование дефектов, которые образуются при свободном уширении прокатываемого металла.

Следует также добавить, что закрытые и заполненные калибры обеспечивают прокат размерами повышенной точности.

Для качественной прокатки слитков на станах трио необходимо обеспечить не только правильную величину и равномерное распределение давления, но и правильный выбор диаметра валков и верхнего и нижнего давления. Чем больше разность между рабочими диаметрами валков и вследствие этого больше величина верхнего и нижнего давления, тем больше изгиб полосы при выходе из валков. При слишком большом изгибе не только ухудшается качество проката, но и увеличивается износ валков, чему иногда не уделяют должного внимания. Однако это обстоятельство имеет большое значение, особенно при прокатке легированной стали на станах трио.

Величина изгиба, совершаемого в течение одной секунды, равна:

$$\frac{\pi D_1 n}{60} - \frac{\pi D_2 \cdot n}{60} = \frac{\pi \cdot n}{60}(D_1 - D_2),$$

где D_1 и D_2 — диаметры сопряженных валков.

Таким образом, разница этих диаметров соответствует верхнему или нижнему давлению. При скорости вращения валков $n = 90$ об/мин изгиб в течение одной секунды равен

$$\frac{\pi 90}{60} \cdot (D_1 - D_2) = 4{,}71\,(D_1 - D_2).$$

В предыдущем разделе было указано, как надо поступать при прокатке на стане трио с разными калибрами в обеих плоскостях прокатки для равномерного распределения верхнего давления на верхней и нижней плоскости (см. рис. 27).

По этому методу (рис. 34) на стане трио с диаметром валков 750 *мм* установлены валки с калибрами сечением 150 × 180 и 130 × 180 *мм*. Рабочий диаметр среднего валка равен

$$D_{A_M} = 750 - \frac{h_1 + h_2}{2} = 750 - \frac{150 + 130}{2} = 750 - 140 = 610\ мм.$$

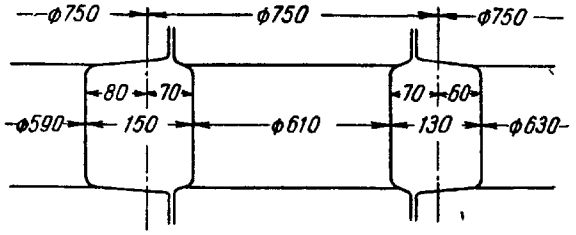


Рис. 34. Расположение калибров в блуминге трио

Таким образом, калибры врезаны в средний валок на глубину

$$b = \frac{h_1 + h_2}{4} = \frac{280}{4} = 70\ мм.$$

Тогда величина

$$a = h_1 - b = 150 - 70 = 80\ мм \text{ и } c = h_2 - b = 130 - 70 = 60\ мм.$$

Рабочий диаметр верхнего валка равен 750—2c = 750—120 = = 630 *мм*, рабочий диаметр нижнего валка равен 750—2*a* = = 750—160 = 590 *мм*. Верхнее давление верхнего валка на нижний валок равно верхнему давлению среднего валка на нижний валок (20 *мм*) и соответствует абсолютному обжатию 150—130 = = 20 *мм*.

Линия валков проходит через калибры не по середине, а на одну четверть абсолютного обжатия выше центра тяжести

$$\left(a - \frac{h_1}{2} = 80 - 75 = 5 = \frac{20}{4}\right).$$

Разность высот прямоугольников в обоих калибрах равна половине верхнего давления $\left(80-70 = 10 = \frac{20}{2};\ 70-60 = 10 = \frac{20}{2}\right)$

Другой пример рациональной калибровки слитков на стане трио изображен на рис. 35. В табл. 3 приведена схема обжатий для прокатки на стане трио слитков 305 × 305 *мм* из легированной стали на блум 145 × 145 *мм*.

Таблица 3

Схема прокатки слитков сечением 305×305 *мм* из легированной стали в 12 проходов в блум 145×145 *мм*. Блуминг трио 650 *мм*
(см. также рис. 35)

Номер прохода	Калибр	h *мм*	b *мм*	Δh *мм*	Δb *мм*	$\frac{h_0}{h_1}$	$\frac{\Delta h}{h_0}$ %	Условия уширения
0	—	305	305	—	—	—	—	—
1	I нижн.	274	310	31	5	1,11	10,15	Ограниченное
2	I верхн.	242 К	310	32	0	1,13	11,68	Вынужденное
3	I нижн.	274	252	36	10	1,13	11,60	Свободное
4	I верхн.	242 К	262	32	10	1,13	11,68	»
5	II нижн.	221	247	41	5	1,14	12,30	Ограниченное
6	II верхн.	194 К	247	27	0	1,11	12,20	Вынужденное
7	III нижн.	216	199	31	5	1,14	12,55	Ограниченное
8	III верхн.	189	199	27	0	1,14	12,50	Вынужденное
9	IV нижн.	163	204	26	5	1,16	13,75	Ограниченное
10	IV верхн.	140 К	204	23	0	1,16	14,10	Вынужденное
11	V нижн.	172	145	32	5	1,18	15,70	Ограниченное
12	V верхн.	145	145	27	0	1,17	15,70	Вынужденное

Примечание К – кантовка.

Следует отметить, что первые четыре прохода производятся в первом калибре, что позволяет на бочках валков сэкономить один калибр и за счет этого выполнить более широкие бурты.

Несмотря на преимущества, которые имеет прокатка слитков в закрытых калибрах, от этого способа постепенно отказались и тем самым отказались от прокатки слитков на станах трио. Причины этого были разные.

Благодаря общему росту производства стали в слитках вес слитков значительно увеличился. В случае дальнейшего применения обжимных станов с закрытыми калибрами, в которых каждый проход требует своего калибра, количество последних стало бы настолько большим, что для их размещения необходима была бы установка нескольких клетей. Необходимо учесть также непрерывное расширение сортамента готовых профилей, что влечет за собой соответствующее расширение сортамента блумов. Решающее значение имеет, наконец, следующий недостаток нерегулируемых по высоте валков, который заключается в том, что они не могут приспособляться к изменившимся свойствам материалов. Так, например, на таких валках нет возможности прокатывать с уменьшенным обжатием плохо прогретые слитки.

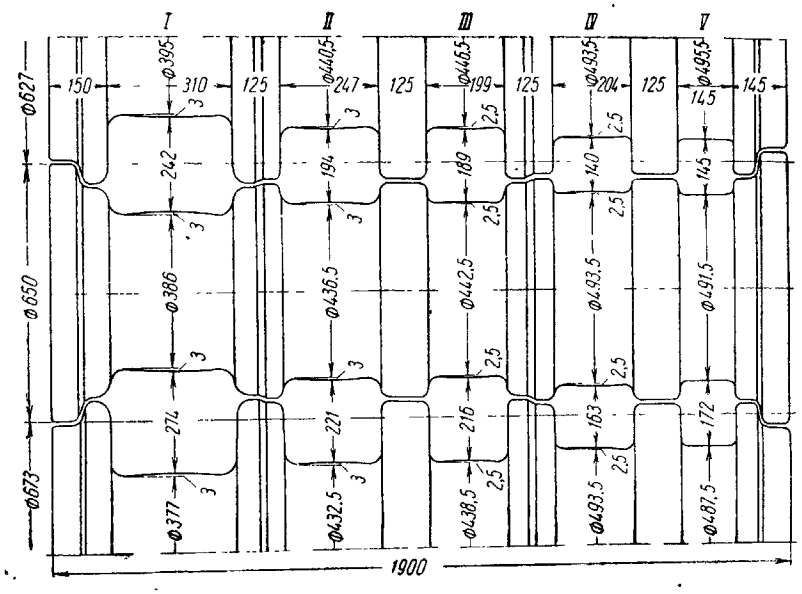


Рис. 35. Калибровка блуминга трио с диаметром валков 650 *мм*

Например, если на стане с постоянным расположением определенных по размеру калибров приходится прокатывать сталь разного состава и с разной способностью к деформации, то это должно проходить по одной и той же неизменной схеме обжатий. При постоянной калибровке ограничивается не только обжатие, но и уширение. И если ширина калибра была установлена с учетом стали, характеризующейся малым уширением, то при прокатке другого сильно уширяющегося металла неизбежным следствием будет большое трение в калибрах и усиленный износ калибров, а также повышенный расход энергии. Таким образом, следует признать, что прокатные станы с нерегулируемыми по высоте валками не обладают способностью приспособляться к изменяющимся условиям работы.

Это и явилось причиной того, что современные обжимные станы оборудованы механизмами для установки верхнего валка перед проходом, что дает возможность производить любое по величине обжатие в каждом проходе. Применение кантовки раската

позволяет иметь эффективное всестороннее обжатие металла. Благодаря этому можно прокатывать слитки разных размеров с разным числом проходов и выпускать прокат разных сечений. Таким образом, можно в большой мере приспособляться к изменениям способности металла деформироваться и уширяться. Стан с подъемом верхнего валка отличается большой гибкостью и дает возможность обрабатывать металл в соответствии с его свойствами и назначением.

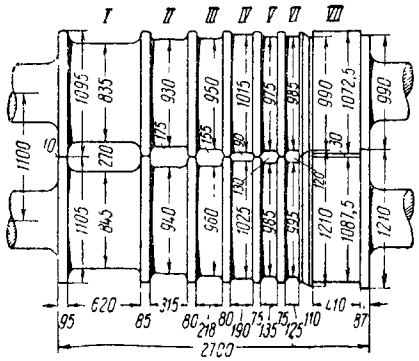


Рис. 36. Валки блуминга 1100 *мм* (европейская калибровка)

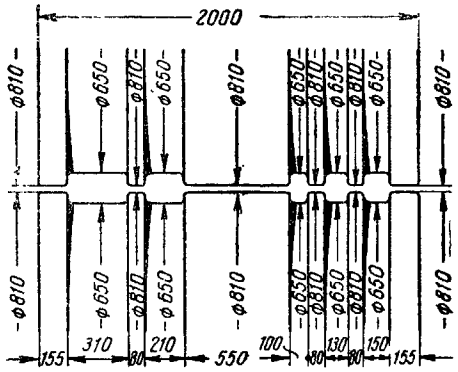


Рис. 37. Валки блуминга дуо 810 *мм* (американская калибровка)

Для прокатки слитков на обжимных станах дуо применяют валки двух типов. На рис. 36 изображена калибровка, получившая название европейской, на рис. 37 — калибровка, называемая американской. И те и другие изготовляют разных размеров. На рис. 38, 39 и 40 показана европейская калибровка обжимных валков. При европейской калибровке все проходы проводятся в открытых ящичных калибрах, при американской — основная часть обжатия слитка происходит на гладкой бочке, хотя имеется и несколько калибров для последних проходов. И те и другие прокатные станы являются реверсивными.

Схема прокатки при европейской калибровке показана в табл. 4, а при американской — в табл. 5.

При американском способе прокатка в закрытых калибрах производится только в последних проходах, при европейском — обычно уже с десятого прохода. На блумингах и других обжимных станах, как правило, полная всесторонняя деформация не имеет места, так как вследствие передвижения верхнего валка расстояние между буртами верхнего и нижнего валков большей частью остается довольно большим (рис. 41).

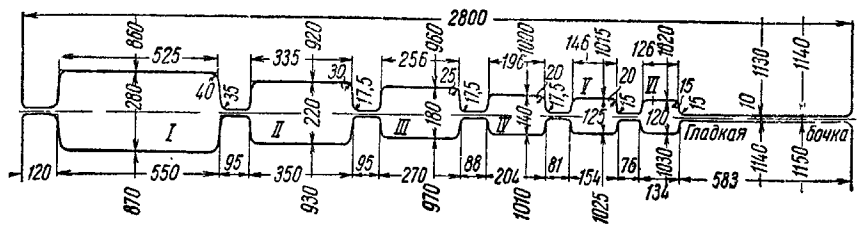


Рис 38. Калибровка валков блуминга дуо 1150 *мм*

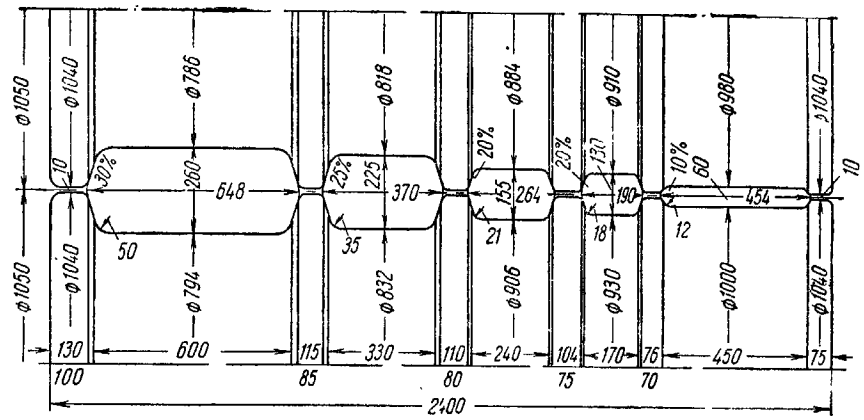


Рис. 39. Калибровка валков блуминга дуо с диаметром валков 1050 *мм* и длиной бочки 2400 *мм*

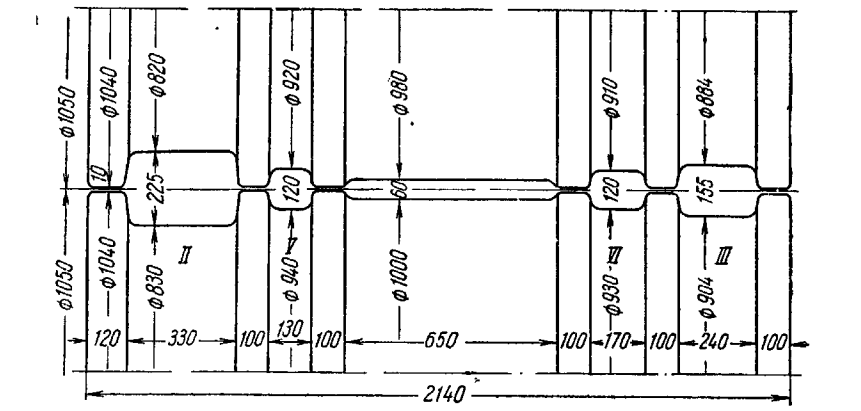


Рис. 40. Калибровка современного блуминга — слябинга

Таблица 4

Схема прокатки блумов 125×125 *мм* из слитков сечением 600×600 *мм* по европейской калибровке
(рис. 36)

№ прохода	№ калибра	h *мм*	b *мм*	Δh *мм*	Δb *мм*	$\frac{\Delta h}{h_0}$ %	$\frac{h_0}{h_1}$	$\frac{b}{h}$	Уширение
0	—	600	600	—	—	—	—	1,0	
1	I	540	620	60	20	10,0	1,11	1,13	Ограниченное
2	I	480 К	620	60	0	11,10	1,12	1,28	Вынужденное
3	I	560	502	60	22	9,67	1,12	0,90	Свободное
4	I	500	524	60	22	10,70	1,12	1,05	»
5	I	440	546	60	22	12,00	1,14	1,24	»
6	I	380 К	564	60	22	13,83	1,16	1,49	»
7	I	494	407	70	27	12,41	1,16	0,82	Свободное
8	I	424	434	70	27	14,17	1,18	1,02	»
9	I	354	461	70	27	16,50	1,20	1,30	»
10	I	284 К	488	70	27	19,77	1,24	1,72	»
11	II	418	311	70	27	14,35	1,17	0,80	Свободное
12	II	348	315	70	4	16,74	1,20	0,90	Ограниченное
13	II	278	315	70	0	20,10	1,25	1,13	Вынужденное
14	II	208 К	315	70	0	25,20	1,33	1,50	»
15	III	245	218	70	10	22,22	1,28	0,89	Ограниченное
16	III	175 К	218	70	0	28,60	1,40	1,25	Вынужденное
17	IV	158	190	60	15	27,50	1,40	1,20	Ограниченное
18	IV	122 К	190	40	0	25,30	1,30	1,56	Вынужденное
19	VI	125	125	65	3	34,21	1,43	1,0	Ограниченное

Примечание. К – кантовка

При прокатке слитков на гладкой бочке надо следить за тем, чтобы металл не шел косо и не получались диагонали разной величины (рис. 42). В этом случае выпрямление возможно только в калибрах с ограниченным уширением.

Таблица 5

Схема прокатки блумов 150×150 *мм* из слитков 600×600 *мм* по американской калибровке

№ прохода	№ калибра	h *мм*	b *мм*	Δh *мм*	Δb *мм*	$\frac{\Delta h}{h_0}$ %	$\frac{h_0}{h_1}$	$\frac{b}{h}$	Уширение
0	—	600	600	—	—	—	—	1,0	
1	Бочка	530	626	70	26	11,6	1,11	1,17	Свободное
2	»	460 К	652	70	26	13,2	1,15	1,41	»
3	»	582	486	70	26	10,7	1,16	0,83	»
4	»	512	512	70	26	12,0	1,13	1,00	»
5	»	442	538	70	26	13,6	1,15	1,20	»
6	»	372 К	564	70	26	15,8	1,18	1,52	»
7	»	494	398	70	26	12,4	1,14	0,80	»
8	»	424	424	70	26	14,0	1,16	1,00	»
9	»	354	450	70	26	16,0	1,20	1,28	»
10	»	284	476	70	26	15,0	1,27	1,76	»
11	I	406	310	70	26	14,7	1,15	0,76	»
12	I	336	310	70	0	17,2	1,20	0,90	Вынужденное
13	I	266	310	70	0	20,8	1,26	1,16	»
14	I	196 К	310	70	0	26,3	1,35	1,66	»
15	II	230	210	80	14	22,2	1,34	0,90	Ограниченное
16	II	150 К	210	80	0	34,7	1,53	1,40	Вынужденное
17	III	150	150	60	0	29,0	1,40	1,00	»

Примечание. К – кантовка

Преимуществом американского способа калибровки является то, что в середине бочки валка нет калибров и что количество калибров вообще невелико. Благодаря этому при одинаковой производительности стана длина бочки валка может быть меньше и, таким образом, может быть меньше и диаметр валка. Это также можно считать преимуществом американского способа калибровки, поскольку валки большего диаметра способствуют получению большего уширения и меньшей вытяжки. Следует указать при этом, что при сравнении необходимо принимать во внимание толь-

ко рабочий диаметр. Прокатка на середине бочки валка имеет и то преимущество, что при прокатке давление металла на валки распределяется на обе шейки валков более равномерно и износ валков также становится более равномерным. Можно считать, что при американской калибровке при относительно меньшем диаметре валка можно получить большое обжатие металла. Это уменьшает расход энергии, так как удельный расход энергии при определенной вытяжке будет тем ниже, чем меньше количество проходов, на что указал еще К. Кисельбах [32]. В табл. 6 приведена схема прокатки сляба 75× 600 *мм* из слитка 600 × 600 *мм*.

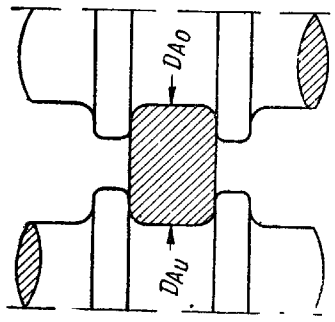


Рис. 41. Положение проката в ящичном калибре блуминга дуо

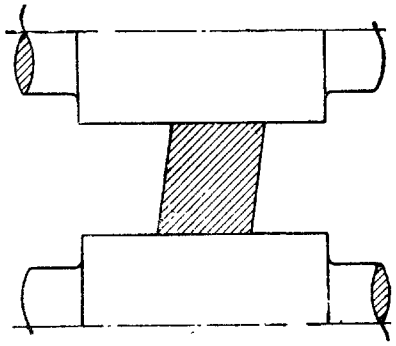


Рис. 42. Перекос проката в гладких валках

Для разработки калибровки и схем прокатки для прокатки блумов, слябов и полосовой стали можно с успехом пользоваться диаграммами Эмике и Альгаузена [33], основанными на формуле уширения Тафеля и Седлачека. При этом диаметр валков, трение, скорость и температура принимаются постоянными. Хотя в производственных условиях эти предпосылки не осуществляются, однако ошибки, вносимые этими допущениями, не слишком велики.

При разработке калибровок для прокатки блумов и при составлении схем для прокатки блумов и слябов относительное обжатие должно быть в первых четырех проходах сравнительно низким и составлять примерно 10, самое большее 13%. Последующие проходы характеризуются быстрым возрастанием обжатия. Начиная с первых двух проходов, следует иметь кантовку по крайней мере через каждые четыре прохода. А по достижении сечения примерно 300 × 300 *мм* следует давать кантовку через каждые два прохода. Ширину калибров следует подбирать с учетом необходимого ограничения уширения. Настоятельно рекомендуется относительное обжатие равномерно увеличивать по ходу прокатки, как это показано на рис. 43. Средняя кривая дает показатели для хо-

Таблица 6

Схема прокатки слябов 75×660 *мм* из слитков 600×600 *мм* на блуминге или слябинге

№ прохода	№ калибра	h *мм*	b *мм*	Δh *мм*	Δb *мм*	$\frac{\Delta h}{h_0}$ %	$\frac{h_0}{h_1}$
0	—	600	600	—	—	—	—
1	I	550	615	50	15	8,3	1,09
2	I	500	630	50	15	9,0	1,10
3	I	450	645	50	15	10,0	1,11
4	I	400	660	50	15	11,1	1,12
5	I	360	670	40	10	10,0	1,11
6	I	320 К	680	40	10	11,1	1,12
7	II	650	325	30	5	4,4	1,04
8	II	625 К	329	25	4	3,8	1,04
9	I	289	635	40	10	13,8	1,03
10	I	249	645	40	10	16,0	1,12
11	I	214	655	35	10	16,3	1,16
12	I	180	665	34	10	18,8	1,18
13	I	160	672	20	7	12,5	1,12
14	I	140	679	20	7	13,5	1,14
15	I	120 К	686	20	7	14,4	1,16
16	VI	666	127	20	7	3,0	1,03
17	VI	646 К	134	20	7	3,0	1,03
18	I	114	653	20	7	17,5	1,16
19	I	99	656	15	3	13,0	1,14
20	I	84	659	15	3	15,0	1,09
21	I	75	660	9	1	10,7	1,12

Примечание. К – кантовка.

рошей прокатки блумов. При помощи таких кривых можно определять нормальное проведение прокатки блумов. При отсутствии такого контроля может легко случиться, что отдельные проходы будут отличаться слишком большим или, наоборот, слишком малым обжатием. Это означает нерациональное использование стана и создает опасность перегрузки стана, а также возникновения дефектов прокатываемого металла. Ценные данные представлены в графиках нагрузки прокатного стана в отдельных проходах, по которым можно определить, в каких случаях следует провести

выравнивание обжатий. Это можно показать на следующем примере. На рис. 44 показаны кривые, выведенные по данным И. Пуппе [30].

Из этого графика видно, что обжатие изменяется очень неравномерно. Такую неравномерность показывают кривые, представ-

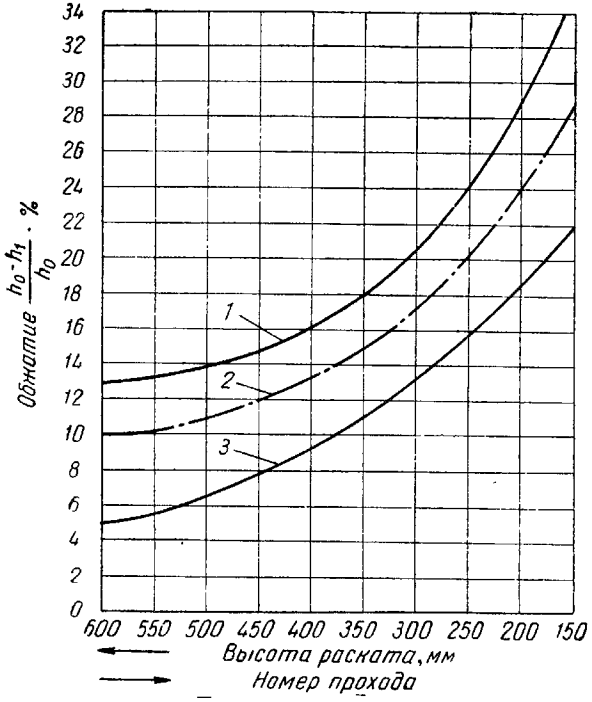


Рис. 43. Зависимость относительного обжатия (по высоте) при прокатке слитков малоуглеродистой стали сечением 600×600 *мм* от количества проходов (опытные данные)

1 — максимальные значения, *2* — средние значения, *3* — минимальные значения

ляющие чистую мощность прокатки и энергию, расходуемую приводом. При равномерном изменении обжатия от прохода к проходу соответственно имело бы место правильное изменение мощности прокатки, более равномерная нагрузка приводного двигателя и лучшее использование всего прокатного стана.

Из сказанного выше следует, что слитки можно прокатывать не только в калибрах, но и на гладкой бочке со свободным уширением. Казалось бы, что можно построить обжимной стан, в котором все проходы производились бы на гладкой бочке. Однако это нецелесообразно, так как, если бы раскат ни при одном про-

ходе не доходил по ширине до буртов калибра, то он сворачивался бы и получалось бы в этом случае не прямоугольное, а косоугольное поперечное сечение (см. рис. 42). Такой раскат невозможно выпрямить без прохода его через калибры с буртами. Прокатка в калибрах с буртами становится безусловно необходимой, когда после большого обжатия на средней части раската образуется бочкообразная выпуклость. Бурты калибра служат не толь-

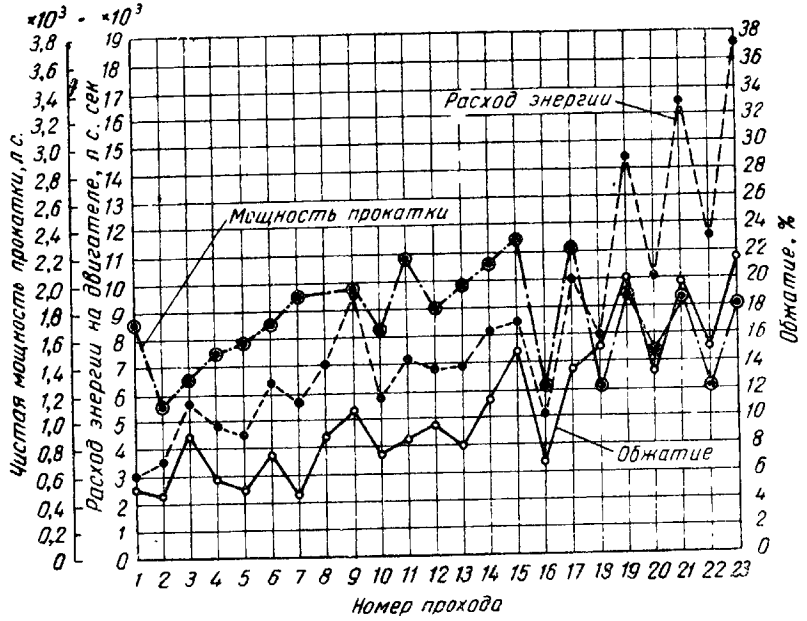


Рис. 44. Зависимость относительного обжатия, мощности прокатки и расхода энергии привода от числа проходов, полученная при исследовании И. Пуппе:

ко для направления заготовки; препятствуя свободному уширению, они способствуют снятию напряжений на гранях, вызывающих трещины и другие поверхностные дефекты.

Сравнение американской и европейской калибровок показывает, что может существовать несколько вариантов прокатки слитков. Так, например, при прокатке слитков 600 × 600 *мм* по схеме, приведенной в табл. 7 и на рис. 45, применяются три схемы обжатий. По первой схеме предусматривается калибровка, имеющая, кроме гладкой бочки, два калибра шириной 300 и 200 *мм*. Проходы № 1—10 проводятся на гладкой бочке, т. е. со свободным уширением, проходы № 11—16 — в калибрах. По второй схеме, кроме гладкой бочки, предусматриваются три калибра шириной 400,

275 и 180 *мм*. По третьей схеме на гладкой бочке проводятся только первые четыре прохода, остальные — в четырех калибрах шириной 500, 375, 250 и 150 *мм*.

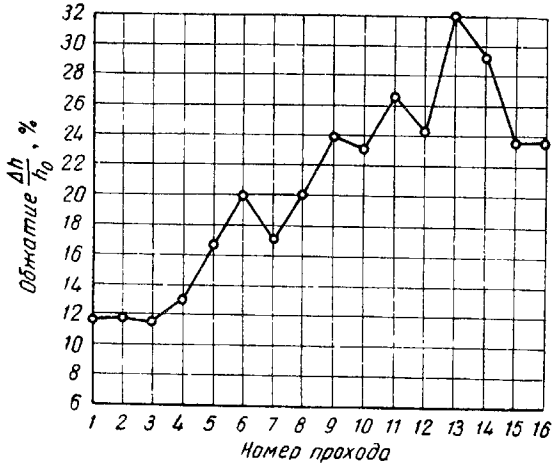


Рис. 45. Изменение величины относительного обжатия в зависимости от числа проходов (см. также табл. 7)

Валки обжимных станов

Обжимные станы дуо можно разбить на три группы:

1) тяжелые обжимные станы с валками диаметром 900 *мм* и больше;

2) средние обжимные станы с валками диаметром от 750 до 900 *мм*;

3) малые обжимные станы, валки которых имеют диаметр меньше 750 *мм*.

В Западной Европе наиболее распространены калибровки, у которых гладкая бочка расположена с краев рабочей части валка (европейская калибровка).

Тяжелые обжимные станы европейского типа имеют большей частью калибровку, показанную на рис. 38. Диаметр валков этих станов примерно 1050 *мм* и длина бочки 2800 *мм*. В последнее время замечается стремление к уменьшению этих размеров. Уже сооружено много станов с калибровкой, представленной на рис. 39. Они имеют диаметр 1050 *м* и длину бочки 2400 *мм*. Применяемые при этом калибры показаны на рис. 46 и в табл. 8. В первых калибрах, в особенности при первых проходах, бурты калибра охватывают только небольшую часть раската. Прокатка происходит при этом нормально, так как вначале уширение про-

Таблица 7

Схема прокатки блумов 130×130 *мм* из слитка 600×600 *мм* на блуминге, калибровка которого показана на рис. 40

№ прохода	№ калибра	h *мм*	b *мм*	Δh *мм*	Δb *мм*	$\frac{\Delta h}{h_0}$ %	$\frac{h_0}{h_1}$	$\frac{b}{h}$	Уширение
0	—	600	600	—	—	—	—	1,0	
1	Гладкая бочка	530	626	70	26	11,1	1,13	1,18	Свободное
2	То же	460 К	652	70	26	11,6	1,15	1,40	»
3	» »	582	486	70	26	10,7	1,12	0,83	»
4	» »	512	512	70	26	12,3	1,13	1,0	»
5	» »	432	541	80	29	15,6	1,18	1,25	»
6	» »	352 К	570	80	29	22,7	1,23	1,60	»
7	» »	490	381	80	29	14,4	1,16	0,77	»
8	» »	410 К	410	80	29	16,3	1,19	1,0	»
9	» »	325	440	85	30	20,7	1,23	1,35	»
10	II	355	330	85	5	19,3	1,24	0,93	Ограниченное
11	II	270	330	85	0	23,9	1,31	1,22	Вынужденное
12	II	185 К	330	85	0	31,5	1,45	1,78	»
13	III	245	215	85	30	25,7	1,34	0,88	Свободное
14	III	165 К	240	80	25	32,6	1,48	1,45	Ограниченное
15	IV	160	170	80	5	33,3	1,50	1,06	»
16	IV	120 К	170	40	0	24,3	1,33	1,42	Вынужденное
17	V	130	130	40	10	23,5	1,30	1,0	Ограниченное

Примечание: К — кантовка.

исходит преимущественно в непосредственной близости к рабочей поверхности валков и меньше в середине раската. В дальнейшем деформация распространяется в глубину и доходит до середины прокатываемого металла. Тогда уширение происходит главным образом в средней части, что сказывается в образовании бочкооб-

Таблица 8

Размеры калибров для валков тяжелых блумингов
(см. также рис. 46)

№ калибра	Ширина B *мм*	Высота H *мм*	Радиус R *мм*	Радиус r *мм*	Выпуск калибра %
I	500—600	250	50	35	30—50
II	330—350	250	30	20	25
III	230—250	150	20	15	20
IV	170—180	130	18	12	20
V	150	130	15	10	20
Гладкая бочка	До 600	—	12	8	10

разного профиля в поперечном сечении раската. Эффективное ограничение уширения имеет место только в том случае, если калибры будут охватывать грани слитка по возможности полностью, что достигается обычно только в последних проходах. Бурты калибров служат также как направляющие для заготовки и предупреждают их свертывание в калибрах.

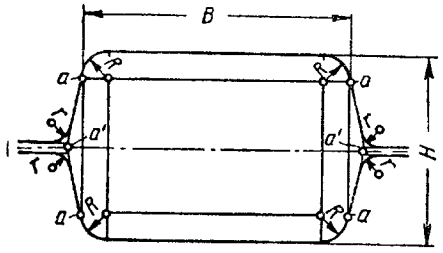


Рис. 46. Ящичный калибр блуминга дуо

Калибровки с небольшой высотой буртов имеют то преимущество, что рабочий диаметр валка в разных калибрах является примерно одинаковым. Вследствие этого уровень раската при входе в разные калибры и при выходе из них практически одинаков; поэтому рольганги могут быть оборудованы цилиндрическими роликами и нет надобности в профилированных роликах. На валках необходимо иметь определенное количество калибров разной ширины для обеспечения всесторонней деформации раската. Чтобы обеспечить раскату определенное направление при выходе, на обжимных станах обычно применяют нижнее давление величиной от 5 до 15 *мм*, что значительно уменьшает нагрузку на ролики рабочих рольгангов. В тяжелых обжимных станах на валках, кроме первого калибра шириной 500—600 *мм*, имеется еще гладкая бочка такой же или большей ширины, что позволяет прокатывать слябы небольшой толщины. Гладкая бочка обычно не имеет буртов и насечки в отличие от первого калибра, который насекают для увеличения угла захвата. Подобное мероприятие необходимо вследствие того, что при прокатке блумов в первом

калибре рабочий диаметр валка меньше, а высота раската больше, чем при прокатке слябов.

На рис. 40 изображена калибровка современного обжимного стана, в котором функции первого калибра выполняются гладкой бочкой для прокатки слябов, размещенной на середине валка. Как и в американских обжимных станах, максимальные значения рабочих диаметров имеют место в середине валка, так что нагрузка на подшипники и станины распределяется равномерно.

Поскольку первые проходы в таком случае выполняются на гладкой бочке, то она должна иметь насечку, вследствие чего раскат имеет рифленую поверхность. Однако подобная поверхность блумов или слябов в дальнейшей прокатке не имеет большого значения.

При прокатке на блумингах раскат достигает большой длины, причем последние проходы характеризуются большой продолжительностью, что значительно уменьшает производительность стана. В этом случае на современных высокопроизводительных станах прокатка малых слитков на обычных валках становится нерентабельной. Для увеличения производительности обжимных станов в настоящее время применяется прокатка слитков большого сечения в блумы, также повышенного сечения. Для этого применяют валки с небольшим количеством калибров, как изображено на рис. 47. Если необходимо иметь высокую производительность, при прокатке крупных слябов применяют калибровку (рис. 48), в которой валки, кроме гладкой бочки, имеют один или два ребровых калибра. Если проследить развитие блумингов и слябингов в США, то можно видеть повсеместное применение гладкой бочки в обжимных валках. Росс Бейнон в своей работе [40] рекомендует выполнять валки блумингов с пятью ящичными калибрами, которые соответствуют европейской калибровке за исключением того, что в них отсутствует калибр для слябов.

Калибровка валков обжимных станов

При построении калибров валков блуминга поступают в соответствии с рис. 46 с использованием относящейся к ней табл. 8.

Построение калибров проводят следующим образом.

1. Наносят среднюю линию и вычерчивают прямоугольник шириной B и высотой H.

2. Вычерчивают закругления радиусом R. Точка a прямоугольника, в которой начинается закругление, является исходной для измерения ширины калибров.

3. Вычерчивают выпуск калибра, увеличивая по средней линии в обе стороны ширину B на такой отрезок, который даст требуемый угол. Таким образом получают точки a' (рис. 46).

4. Точки a и a' соединяют прямыми линиями, ограничивающими боковые стенки калибра.

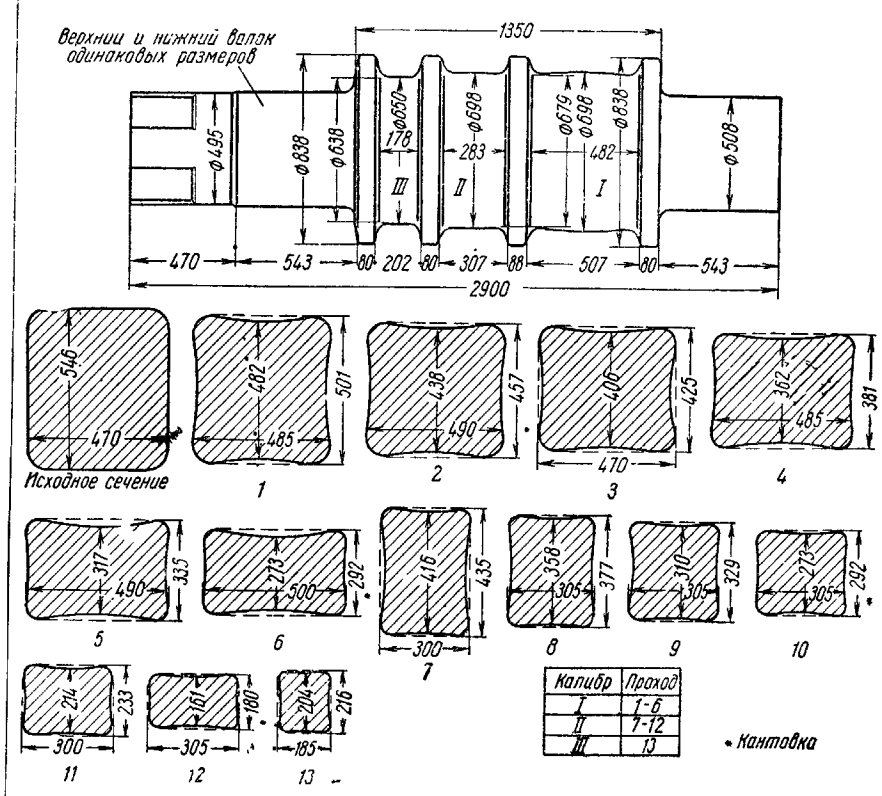


Рис. 47. Валки блуминга с тремя ящичными калибрами американского типа, а также изменение поперечного сечения при прокатке слитка. Цифры *1—13* означают номер прохода

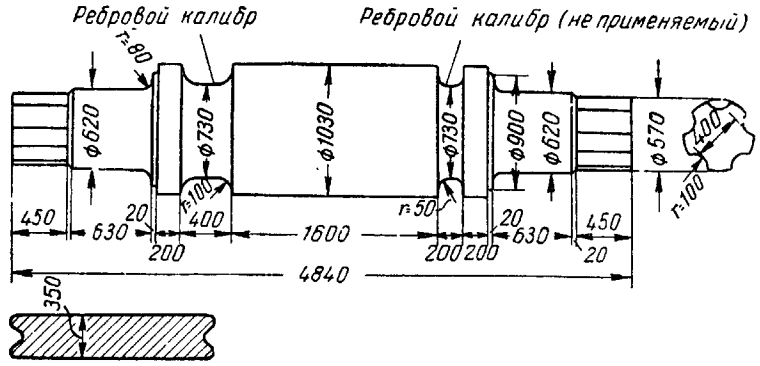


Рис. 48. Валок слябинга дуо

5. Вычерчивают зазор между валками, который обычно составляет 10% от диаметра валков.

6. Наносят закругления зазора радиусом *r*.

7. Вычерчивают грани калибра прямыми линиями, параллельными средней линии. Вогнутые участки (пережим), подобные показанным на рис. 49, следует по возможности не допускать.

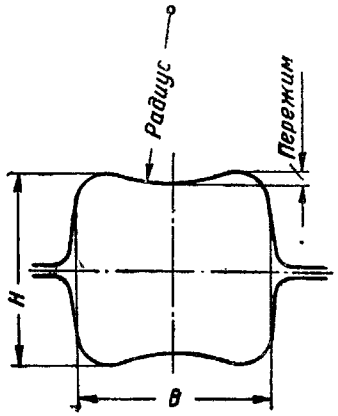


Рис. 49. Ящичный калибр с пережимом

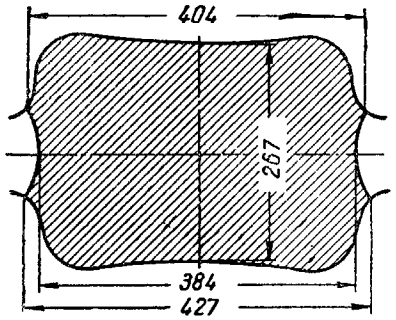


Рис. 50. Заполнение и образование шва в верхней половине калибра после 10-го прохода в калибре II (Магнитогорский комбинат)

Способы увеличения захватывающей способности валков блумингов

Выпуклость основания у ящичных калибров (пережим) уменьшает удар при захвате прокатываемой заготовки и способствует таким образом улучшению захвата. Выпуклость сообщает прокатываемой заготовке стабильное положение на рольганге и позволяет избегнуть неудобств, связанных с появлением утолщения на уширяющихся боковых гранях раската. Поскольку эти бочкообразные утолщения впервые образуются при достаточной глубине проникновения деформации, нецелесообразно иметь выпуклость в первых калибрах. Установлено, что выпуклость вызывает образование складок и трещин. Этот вопрос подробно разбирается в статье Сидельковского, Узиенко и Бахтинова [34]. На Магнитогорском металлургическом комбинате при прокатке заготовки и конечных профилей, особенно в трубной заготовке, встречались закаты, которые образовались уже при прокатке на блуминге. Для устранения этих дефектов на блуминге были сделаны различные изменения, например прокатку стали вести с меньшим обжатием, вес слитков уменьшили, калибровку значительно изменили, однако все эти мероприятия не дали положительного результата. На рис. 50 показано заполнение калибров на Магнитогорском блу-

минге после 10-го прохода и образование заусенца на нижней и верхней половинах раската. На рис. 51 представлены закаты и уширение раската для 10-го и 12-го проходов в III калибре. Рис. 52 показывает, как происходит закат образованных в 12-м проходе складок при чистовом проходе в IV калибре. В конце концов на указанном заводе стали вытачивать более глубокие калибры и уменьшили выпуклость (пережим). Вследствие этих мероприятий прекратилось образование заусенца. Было установлено, что при плоском дне калибров уширение участков, показанных на

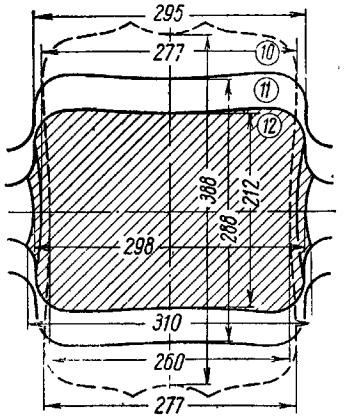


Рис. 51. Закаты и соотношения уширения для 11-го и 12-го проходов в калибре III (Магнитогорский комбинат)

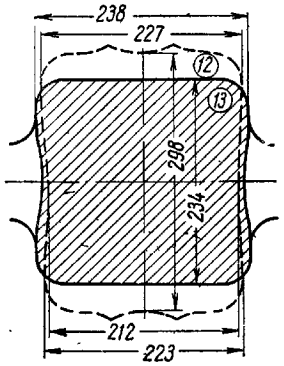


Рис. 52. Закаты, образовавшиеся в IV чистовом калибре при прокатке в 12-м проходе (Магнитогорский комбинат)

рис. 52, уменьшается и тем самым уширение происходит равномерно по высоте раската. На этом основании пришли к выводу, что дно калибров должно быть совершенно плоским.

К такому же выводу пришли на одном заводе в Германии, о чем сообщает Хольцвейлер [35]. В этом случае на прутках из специальной стали часто обнаруживали многочисленные поверхностные трещины. Тщательные исследования показали, что образование этих трещин происходило не в овальных и квадратных калибрах стана окончательной прокатки. После этого были проверены калибровка и схемы прокатки блуминга. В результате этого исследования была изменена калибровка блуминга и полностью устранены пережимы на калибрах. Этот опыт показывает, что в калибрах валков блуминга следует избегать выпуклости.

Чтобы обеспечить надежный захват заготовки в ящичных калибрах валков блуминга, на дне калибров делают насечку. Это производится наваркой, фрезеровкой или насечкой. Наварка экономичнее, чем фрезеровка или насечка, которую раньше выполняли ручным способом. В настоящее время для этого применяют фрезерные или специальные станки. Валки с насечкой, выполненной новым способом на металлургическом заводе Хёрдер, показаны на рис. 53.

О. Радемахер в своей работе [36] описывает современный тип насечки (рис. 54 и 55) и указывает на преимущества выполнения насечки валков с помощью специального приспособления. При этом способе насечку делают простыми токарными резцами, если расстояния между выступами меньше, чем 4—5 b, где b — ширина верхней части выступов, равная примерно 40—50 *мм*. Если расстояние между выступами должно быть меньше, то эта работа выполняется фрезой. Целесообразно, чтобы выступы были расположены под углом около 20° с тем, чтобы не было отбрасывания раската в обратную сторону при захвате. Выступы вызывают образование на поверхности блумов углублений, что более предпочтительно, чем образование выпуклостей при прокатке в валках с углублениями, что может привести к появлению закатов.

Рис. 56. Коррозия валка блуминга вследствие неправильного расположения канавок (канавки должны были быть доведены до обозначенных чертой мест)

Для повышения коэффициента трения, т. е. для еще большего увеличения захвата, валки блуминга охлаждают. Во многих случаях охлаждение водой осуществляется разбрызгиванием. Иногда на станах с малой производительностью для охлаждения валков применяют сжатый воздух, поскольку в результате действия воды могут образовываться коррозионные трещины на поверхности валков. Эти трещины образуются в зоне деформации, где находящаяся под большим давлением между валками и металлом вода испаряется, и ее пары оказывают взрывное действие. На рис. 56 показан валок блуминга, у которого насечка расположена слишком близко к краям калибра. И именно эти места оказались поврежденными. Насечка не должна подходить близко к буртам валков. Валки, охлаждаемые водой, имеют более высокий износ калибров, чем у охлаждаемых сжатым воздухом. На поверхности неохлаждаемых валков при высоких температурах налипает шлак, что затрудняет захват и как следствие уменьшает обжатие. Воду для охлаждения следует подводить со стороны выхода заготовки из валков, тогда вода стекает вниз и не попадает в зазор

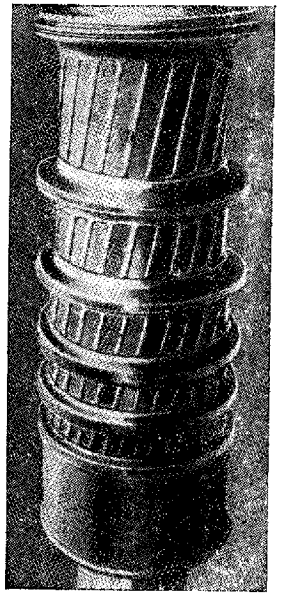


Рис. 53. Насечка валка блуминга по М. Холцвейлеру

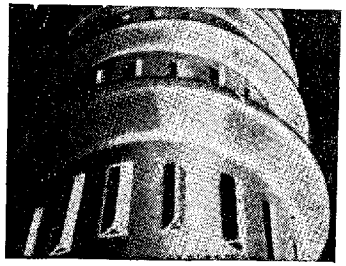


Рис. 54. Насечка повышенной выпуклости на валке блуминга по О. Радемахеру

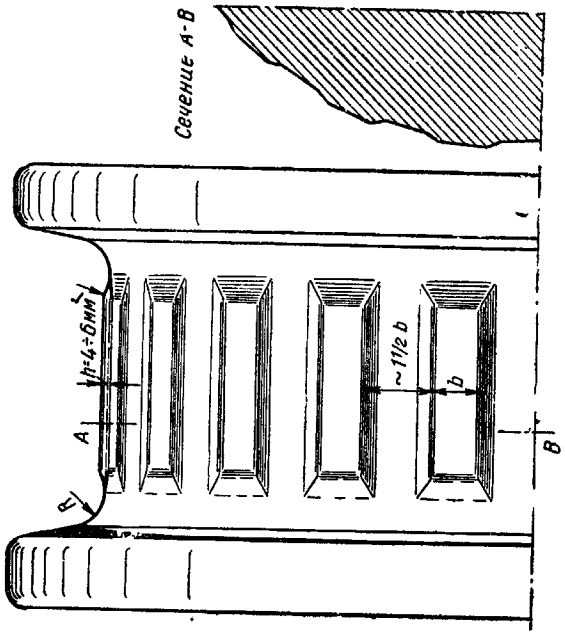


Рис. 55. Особый способ насечки валков с выступами по О. Радемахеру

между валками. При изменении направления вращения валков охлаждающую воду следует переключать, что может происходить автоматически, если механизм переключения воды соединен с управлением реверсирования двигателя. Количество воды следует регулировать таким образом, чтобы обеспечивался требуемый расход и равномерное распределение воды. Слишком сильное охлаждение снижает температуру металла, что приводит к появлению в нем трещин.

Блуминги для прокатки специальной стали

На заводах, выпускающих специальную сталь, как правило, применяют блуминги средних размеров с диаметром валков 750—900 *мм*. За последние годы в Европе запроектировано и со-

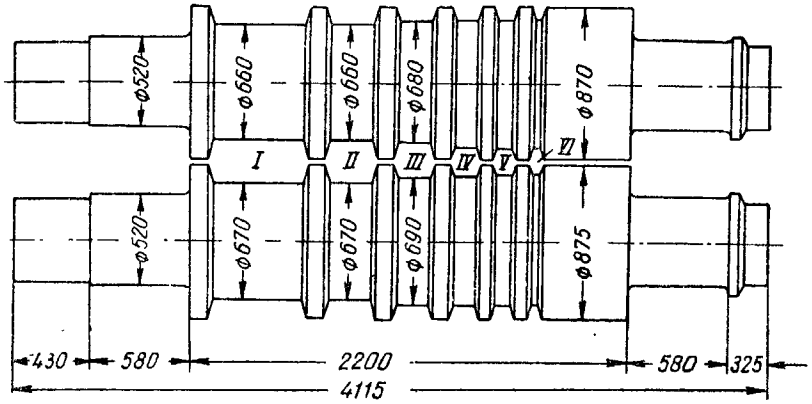


Рис. 57. Валки дуо реверсивного блуминга для прокатки специальных сталей

Размеры калибров к рис. 57.

Калибр	I	II	III	IV	V	VI	Бочка
Ширина, *мм*	424	295	216	165	144	70	500
Высота, *мм*	180	180	140	120	130	130	10

оружено много станов с диаметром валков 800—850 *мм*. Валки блуминга немецкого типа для прокатки специальных сталей показаны на рис. 57, а американского типа — на рис. 58.

При деформации специальных сталей не следует на первой стадии прокатки допускать уширение. Поэтому следует обеспечивать в первых калибрах всестороннее обжатие, чтобы предотвратить уширение. При этом рекомендуется как можно чаще кантовать заготовку. Обжатие составляет при первых проходах при-

мерно 10% и в последних достигает не более 20%. Трудно деформируемые стали следует прокатывать с достаточно большими обжатиями за проход, но с уменьшенной скоростью прокатки. Если такие стали прокатывают со слишком малым обжатием, то вследствие недостаточной деформации по высоте раската могут появиться внутренние разрывы. Если специальные стали прокатывают со свободным уширением, то возникают трещины по краям заготовки. Указанные дефекты появляются вследствие растягивающих напряжений. Внутренние трещины при дальнейшей прокатке, когда сечение заготовки станет малым, завариваются. Трещины на краях раската, наоборот, расширяются при последующих

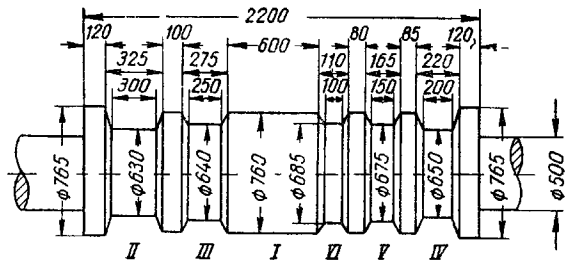


Рис. 58. Валки дуо — реверсивного блуминга для прокатки специальных сталей (американская калибровка)

проходах. Внутренние разрывы поэтому большей частью остаются незамеченными, даже когда в первых проходах прокатывают сталь в валках малого диаметра с небольшим обжатием. Валки блумингов с обыкновенной калибровкой, предназначенной для прокатки углеродистой стали обычного качества, большей частью, не пригодны для прокатки легированной стали. Сталь с нормальной транскристаллизацией целесообразно разливать в слитки с прямоугольным сечением. Стали с грубой транскристаллизацией лучше разливать в круглые слитки. Благодаря такой форме слитков, краевые трещины не устраняются, но предотвращаются дефекты, возникающие по диагонали слитков с прямоугольным сечением, которые образуются на стыках крупных дендритов. При последующей прокатке в прутки эти трещины свариваются, а при изготовлении листов из слябов они появляются в передней части листов.

Раньше труднодеформируемые стали сначала проковывали, а потом прокатывали, что определялось отсутствием подходящих блумингов. Даже в настоящее время на некоторых заводах слитки из легированных сталей предварительно проковывают, если имеющиеся там прокатные станы не могут обеспечить такого же

осторожного обжатия, как при ковке. Однако опыт работы на современных дуо-реверсивных станах показал, что те стали, которые поддаются ковке, можно также и прокатывать. Блуминг, предназначенный для прокатки специальных сталей, должен иметь надлежащую калибровку валков и должен быть оборудован регулируемым приводом. Кроме того, такие стали следует прокатывать с правильным обжатием и с несколькими промежуточными нагревами для предотвращения нарушения правильного расположения волокон в металле. В связи с этим должны быть установлены надлежащие нагревательные печи, что обстоятельно освещено в работе Спенле [38]. Он пришел к выводу, что дуо-реверсивный стан с валками, калибровка которых показана на рис. 57, может быть эффективно использован для обжатия слитков легированной стали. Хэммонд и Кемерон [39] описали новый прокатный стан для прокатки легированной стали, установленный на заводе Атлас Стил в Канаде. Старый стан-трио был заменен новым станом дуо с диаметром валков 660 *мм* и длиной бочки 1676 *мм*. На стане прокатывают различные легированные стали, включая инструментальную и нержавеющую. На этом стане прокатывают квадратные блумы размером 150 × 150 *мм* для сортовых станов и размером 200 × 200 *мм* для ковки. Слитки имеют круглое сечение диаметром 480 *мм* (вес 1800 *кг*) и 400 *мм* (вес 1400 *кг*).

Блуминги с фасонными калибрами

В отдельных случаях на блумингах прокатывают фасонные блумы для их дальнейшей прокатки в широкополочные балки и шпунты. На рис. 59 изображены калиброванные валки блуминга для прокатки фасонных заготовок для широкополочных балок 300 × 300 *мм* установленного на заводе Лакаванна Стил (США). На этом заводе в 1904 г. был установлен стан для прокатки широкополочных балок с высотой полки свыше 230 *мм*, причем предварительный черновой профиль, из которого производилась прокатка на балочном стане, получали с блуминга. Новым является прокатка на блуминге профилированных заготовок (beam blanks) для двутавровых и швеллерных балок, внедренная в США, что описано в работе Росс Бейнона [40]. Эти заготовки дают более равномерное распределение обжатия, чем при прокатке из прямоугольной заготовки. Такая фасонная заготовка обеспечивает лучшее заполнение фланцев чистовых калибров и уменьшает количество отходов. Слиток обжимается в *I* калибре валков блуминга (рис. 60) до высоты, меньше ширины *II* реброваго калибра. После двух проходов заготовка попадает из реброваго калибра в *III* профилирующий калибр. Затем, после нескольких проходов в этом калибре образуется профилированный раскат, который в зависимости от его размеров снова обжимается в *I* или *II* калибрах. По-

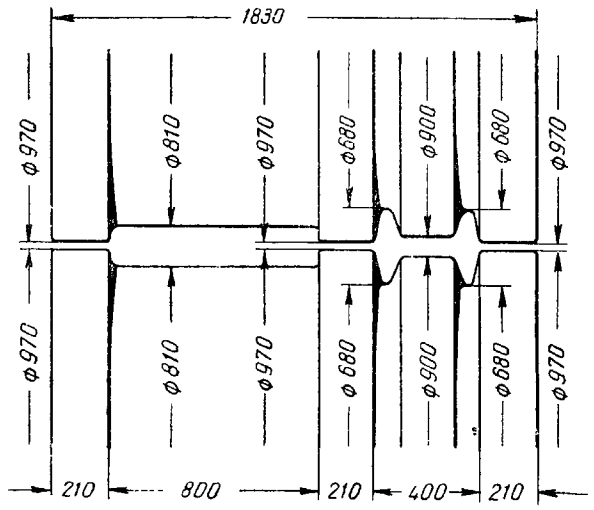


Рис. 59. Валки блуминга для черновой прокатки заготовок при прокатке широкополочных балок

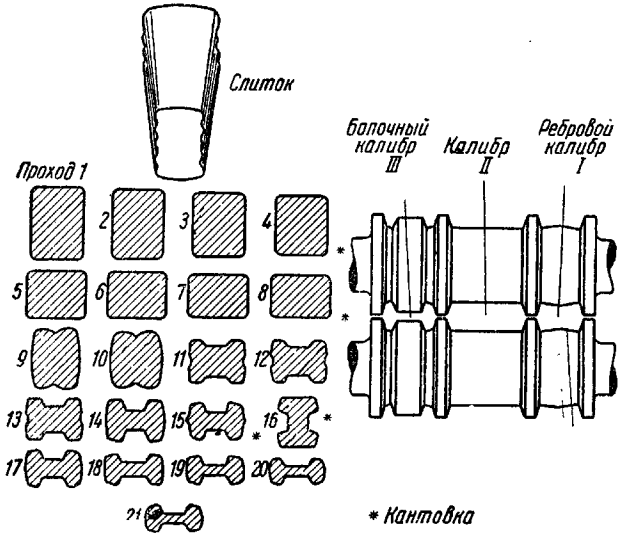


Рис. 60. Валки блуминга, предназначенного для прокатки заготовки для балки со схемой прокатки из слитка

следние проходы выполняются в *III* калибре (фасонном), после чего заготовка передается на балочный стан.

Непрерывные блуминги

Прокатка слитков в заполненных калибрах, несмотря на свои признанные достоинства, теперь не находит применения, так как блуминги трио заменены блумингами дуо с перемещающимся верхним валком. Положительные стороны прокатки слитков в заполненных калибрах достигнуты в полном объеме в непрерывных

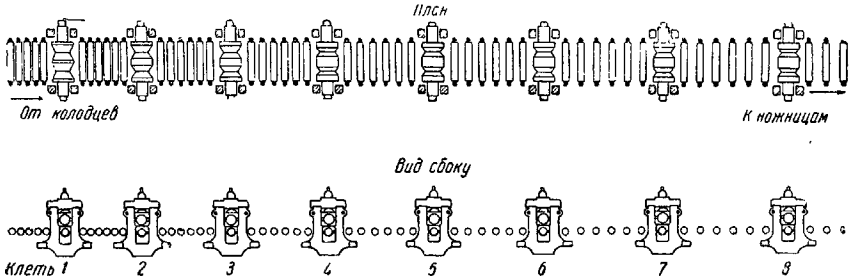


Рис. 61. Непрерывный блуминг из 8 клетей

блумингах, в которых валки между проходами не устанавливаются по высоте (если не считать настройки) и в каждом калибре производится лишь один проход. Такие прокатные станы в США работают уже в течение нескольких десятков лет. Они состоят из нескольких (до 8) последовательно, одна за другой, расположенных клетей (рис. 61). Так, например, на заводе в Гэри (штат Индиана, США) вместо реверсивного блуминга дуо перед заготовочным станом установлены две группы, состоящие в общей сложности из 9 клетей. Слитки имеют сечение 603 × 603 *мм*. После первого прохода слиток имеет сечение 562 × 562 *мм*. Слиток кантуется после каждого прохода. После четвертого прохода заготовка имеет сечение 380 × 320 *мм*. Минимальное обжатие составляет 17,6%, максимальное 26%. Стрельчатые калибры дают возможность получать значительное обжатие уже после устранения литой структуры без ухудшения свойств металла. Этот стан заслуживает внимания также и потому, что кроме этого случая стрельчатые калибры применяются только при прокатке квадратной заготовки небольшого сечения (со стороной менее 120 *мм*). Скорости вращения валков в этом стане очень низкие: в первых двух клетях 6,3 об/мин, в третьей и четвертой 10,5 об/мин. Таким же способом в Гэри подвергаются предварительной прокатке слитки для рельсового стана. Калибровка валков этого стана показана на рис. 62.

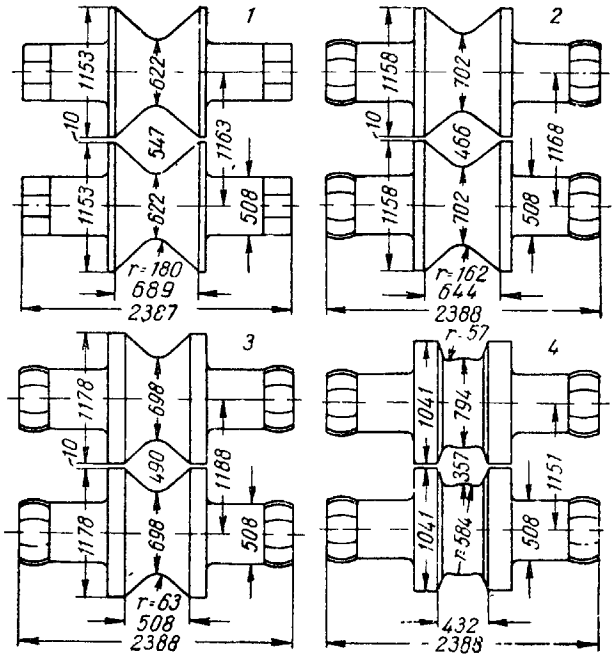


Рис. 62. Калибровка валков непрерывного блуминга, установленного в Гэри (Индиана, США) для прокатки заготовок для рельсопрокатного стана. Цифры 1—4 обозначают номер клети

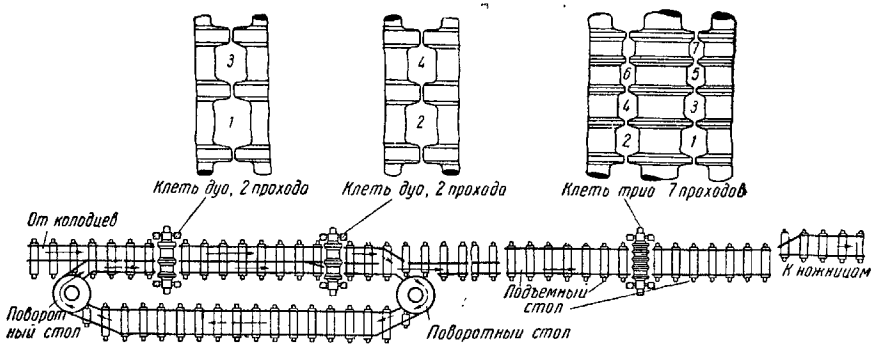


Рис. 63. Блуминг специального назначения для рельсового стана

На заводе Форд в Фордзоне (США) эксплуатируется также подобный непрерывный блуминг, в котором в четырех последовательных клетях прокатывают слитки овального сечения с волнистой поверхностью на квадрат со стороной 165 *мм*. Расположение оборудования американского специализированного блуминга рельсового стана показано на рис. 63. Этот стан состоит из двух последовательно расположенных клетей дуо, в которых с применением поворотного стола делают по 2 прохода, и расположенной за ними клети трио, в которой металл совершает 7 проходов.

Глава III

ПРОКАТКА ЗАГОТОВКИ, СУТУНКИ И ПОЛОСЫ

Общие положения

Заготовка и сутунка относятся к группе полупродукта и предназначены для дальнейшей переработки на прокатных станах и в кузнечных цехах. Заготовка бывает квадратная и прямоугольная.

Квадратная заготовка имеет закругленные углы и является продуктом предварительной прокатки. Минимальное сечение заготовки равно 50 × 50 *мм*, максимальное до 130 × 130 *мм*, длина колеблется в широких пределах. Прямоугольная заготовка имеет минимальную толщину 50 *мм* и ширину до 115 *мм*.

Сутунка представляет собой полосу с закругленными боковыми гранями. Ширина ее — от 45 до 150 *мм*. Толщина для ширин от 45 до 120 *мм* находится в пределах 15—30 *мм*, для ширин от 120 до 150 *мм* — в пределах 15—75 *мм*. В некоторых случаях толщина сутунки может достигать 5 *мм*.

Кроме приведенной выше классификации, применяется также классификация фирмы Монтан-Унион.

Обжимные (черновые) клети заготовочных станов

В черновых клетях обжимают исходный слиток или блум до сечения, поступающего в чистовую линию, т. е. производят предварительное обжатие. При этом начальное и конечное сечение обычно имеет одинаковую форму. На черновых клетях заготовочных станов при прокатке заготовки и сутунки применяют вытяжные калибры, описанные в главе I. Фасонные калибры нарезают в валках черновых клетей только в исключительных случаях, например при прокатке широкополочных балок, шпунтов и прочих тяжелых профилей. Черновые валки, применяемые в этих случаях, отличаются от черновых валков сортовых станов тем, что на них получается не только квадрат, но и начинается формирование профиля. Ниже будут разобраны калибровки только таких валков, которые производят предварительное обжатие, не изменяя практически формы профиля, т. е. имеют своей задачей чистую работу вытяжки.

Основы расчета

В предыдущей главе описаны методы рационального размещения калибров в валках клети трио, позволяющие достигнуть оптимальных условий обжатия и вытяжки, повысить качество прокатываемого металла и одновременно снизить расход энергии на прокатку.

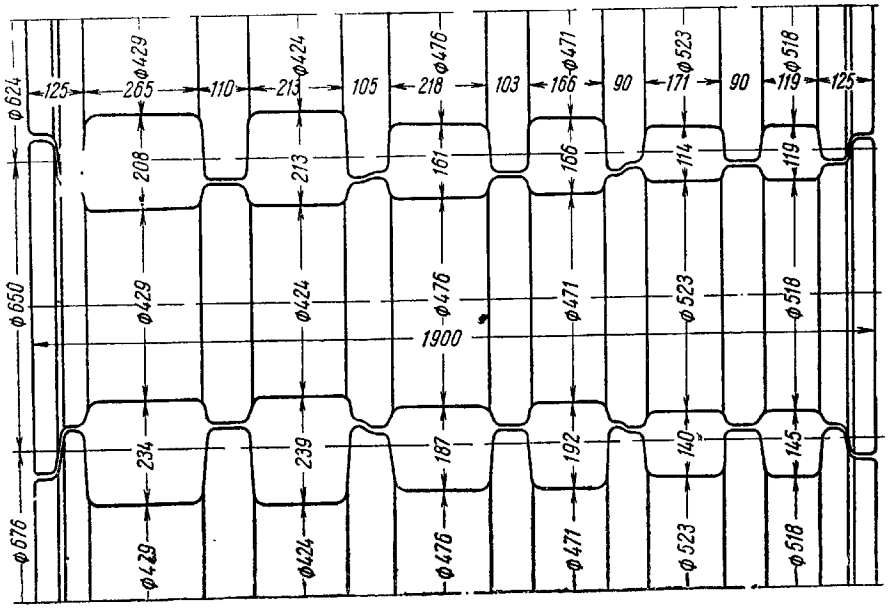


Рис. 64. Калибровка валков стана трио 650 для прокатки исходных блумов 260 × 260 *мм*. Каждый четвертый проход — квадратный (см. табл. 9)

Построение калибровки черновых валков заготовочных станов может быть проведено двумя способами. В одном случае обжатие совершается с целью получения квадрата только одного конечного размера. В другом случае калибровка, кроме получения квадрата одного конечного размера, предусматривает возможность прокатки ряда промежуточных квадратов, которые могут быть использованы для прокатки в чистовой группе. Пример калибровки по первому методу изображен на рис. 35 и табл. 3. Пример калибровки по второму методу изображен на рисунках 64 и 65 и относящихся к ним таблицах 9 и 10.

При калибровке по рис. 64 квадратом является каждый четвертый, а при калибровке по рис. 65 — каждый второй проход. Обе калибровки имеют ту особенность, что во всех проходах про-

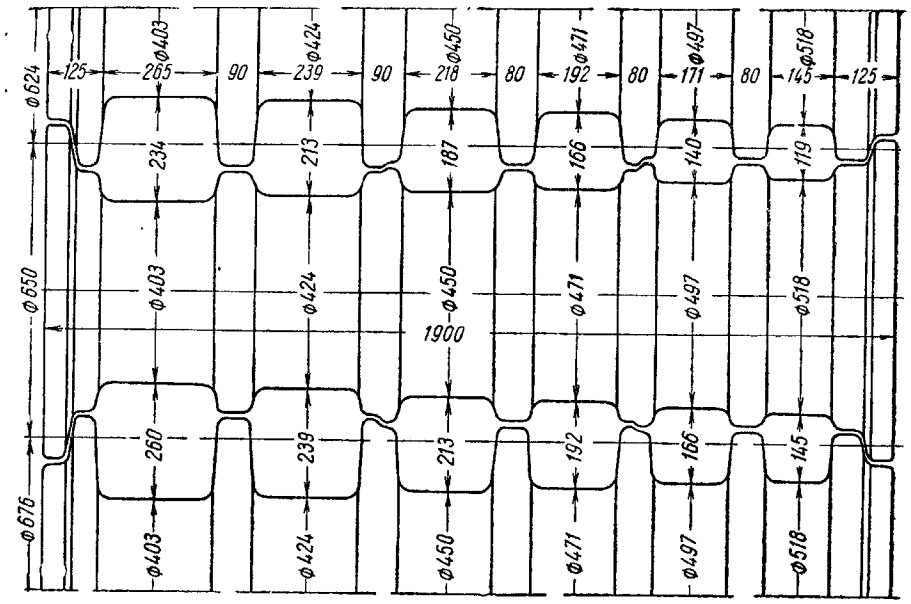


Рис. 65. Калибровка валков стана трио 650 для прокатки блумов 260×260 *мм* Каждый второй проход — квадратный (см. табл. 10)

Таблица 9

Схема прокатки заготовки из блумов 260×260 *мм* на стане трио (см. рис. 64). Каждый четвертый проход дает квадрат

№ прохода	№ калибра	h *мм*	b *мм*	Δh *мм*	Δb *мм*	$\frac{\Delta h}{h_0}$ %
0	—	260	260	—	—	—
1	I верхн.	234	265	26	5	10,5
2	I нижн.	208 К	265	26	0	11,0
3	II верхн.	239	213	26	5	9,8
4	II нижн.	213	213	26	0	10,89
5	III верхн.	187	218	26	5	12,20
6	III нижн.	161 К	218	26	0	13,90
7	IV верхн.	192	166	26	5	11,92
8	IV нижн.	166	166	26	0	13,55
9	V верхн.	140	171	26	5	15,65
10	V нижн.	114 К	171	26	0	18,57
11	VI верхн.	145	119	26	5	15,20
12	VI нижн.	119	119	26	0	17,92

Примечание. К — кантовка.

Таблица 10

Схема прокатки заготовки из блума 260×260 *мм* на стане трио (см. рис. 65). Каждый второй проход дает квадрат

№ прохода	№ калибра	h *мм*	b *мм*	Δh *мм*	Δb *мм*	$\frac{\Delta h}{h_0}$ %
0	—	260	260	—	—	—
1	I верхн.	234 К	265	26	5	10,0
2	II нижн.	239	239	26	5	9,8
3	II верхн.	213 К	239	26	0	10,89
4	III нижн.	313	218	26	5	10,89
5	III верхн.	187 К	218	26	0	12,2
6	IV нижн.	192	192	26	5	11,91
7	IV верхн.	166 К	192	26	0	13,52
8	V нижн.	166	171	26	5	13,52
9	V верхн.	140 К	171	26	0	15,68
10	VI нижн.	145	145	26	5	15,20
11	VI верхн.	119 К	145	26	0	17,92
12	VI нижн.	119	124	26	5	17,92

Примечание К — кантовка.

изводится одинаковое абсолютное обжатие, в то время как относительное обжатие в первых проходах является небольшим, а в дальнейших проходах постепенно возрастает. В этом случае верхнее давление равно абсолютному обжатию по высоте в данной паре калибров, если все три валка имеют одинаковый начальный диаметр (см. рис. 34). Если нужно, чтобы верхнее давление во всех парах калибров было одинаковым, то в них нужно предусмотреть одинаковое обжатие по высоте, как показано на калибровках рис. 64 и 65. Как видно из табл. 11, верхнее давление и абсолютное обжатие по высоте во всех парах калибров приняты равными 26 *мм*.

Таблица 11

Вытяжка и верхнее давление (в *мм*) при калибровке по табл. 9. Начальный диаметр всех валков 650 *мм*

Калибр		I	II	III	IV	V	VI
Обжатие по высоте в валке:		26	26	26	26	26	26
верхнем	верхнее давление	26	26	26	26	26	26
среднем	секундная вытяжка	122,5	122,5	122,5	122,5	122,5	122,5
среднем	верхнее давление	26	26	26	26	26	26
нижнем	секундная вытяжка	122,5	122,5	122,5	122,5	122,5	122,5
Катающий диаметр валка:							
среднего		429	424	476	471	523	518
верхнего		455	450	502	507	549	544
нижнего		403	398	450	445	497	492

В случае, если верхнее давление будет меньше абсолютного обжатия на величину x, то диаметр верхнего валка должен быть уменьшен, а диаметр нижнего увеличен на ту же величину x, что вызовет нарушение правила, согласно которому все валки должны иметь одинаковый начальный средний диаметр. Если увеличить диаметр нижнего валка на величину абсолютного обжатия по высоте, выбранного для всех пар калибров, и уменьшить диаметр верхнего валка на ту же величину, то верхнее давление, а отсюда и секундная вытяжка во всех парах калибров будут равны нулю. Этот случай изображен на рис. 64, а в табл. 12 приведены данные этой калибровки. Это также относится к калибровке, изображенной на рис. 65 (см. также табл. 13). Надлежащая величина верхнего и нижнего давления не может быть найдена вычислением, поэтому этот вопрос может быть решен только на основе практического опыта. Однако при описанных системах калибровки надлежащая величина верхнего и нижнего давления может быть легко достигнута путем изменения диаметра верхнего и нижнего валков.

Величина вытяжки изменяется от первого к последнему проходу подобно изменению относительного обжатия. Поскольку на черновых валках желательно прокатывать большое количество различных квадратов, то обычно применяются небольшие обжатия. Широко применяются ящичные и ромбические калибры, которые по сравнению с системой квадрат — овал дают меньшие

Таблица 12

Вытяжка и верхнее давление (в *мм*) при калибровке по табл. 9, начальный диаметр среднего валка 650 *мм*, начальный диаметр верхнего валка 650 — 26 = 624 *мм*, начальный диаметр нижнего валка 650 + 26 = 676 *мм*

(рис. 64)

Калибр		I	II	III	IV	V	VI
Обжатие по высоте в валке:		26	26	26	26	26	26
верхнем	верхнее давление . . .	0	0	0	0	0	0
среднем	секундная вытяжка . .	0	0	0	0	0	0
среднем	верхнее давление . . .	0	0	0	0	0	0
нижнем	секундная вытяжка . .	0	0	0	0	0	0
Катающий диаметр валка:							
среднего		429	424	476	471	523	518
верхнего		429	424	476	471	523	518
нижнего		429	424	476	471	523	518

Таблица 13

Вытяжка и верхнее давление (в *мм*) при калибровке по табл. 10. Начальный диаметр среднего валка—650 *мм*; начальный диаметр верхнего валка 650—26—624 *мм*; начальный диаметр нижнего валка 650+26=676 *мм*

(рис. 65)

Калибр		I	II	III	IV	V	VI
Обжатие по высоте в валке:		26	26	26	26	26	26
Верхнем	верхнее давление . .	0	0	0	0	0	0
Среднем	секундная вытяжка .	0	0	0	0	0	0
Среднем	верхнее давление .	0	0	0	0	0	0
Нижнем	секундная вытяжка .	0	0	0	0	0	0
Катающий диаметр валка:							
среднего		403	424	450	471	497	518
верхнего		403	424	450	471	497	518
нижнего		403	424	450	471	497	518

вытяжки. Этим же преимуществом в качестве подготовительных обладают также стрельчатые калибры, имеющие, однако, тот недостаток, что в них металл менее устойчив, что и определяет более редкое применение этих калибров.

Ниже приведены принципы построения калибровки черновых линий заготовочных станов с применением ящичных и ромбических калибров. Основой для правильного построения калибровки является выбор постоянной вытяжки и постоянного коэффициента уширения.

Обозначим:

λ — вытяжка;

Δb — уширение. При этом $\Delta b = C \cdot \Delta h$, где C — постоянный коэффициент;

Q_1, Q_3, Q_5 — сечения квадратных калибров;

Q_2, Q_4, Q_6 — сечения прямоугольных калибров.

Прямоугольники Q_2, Q_4, Q_6 кантуют и прокатывают в квадраты Q_3, Q_5, Q_7.

Имеем:

$$\frac{Q_1}{Q_3} = \frac{Q_3}{Q_5} = \lambda^2;$$

$$\frac{h_1}{h_3} = \frac{h_3}{h_5} = \lambda;$$

$$\frac{b_1}{b_3} = \frac{b_3}{b_5} = \lambda.$$

Таким образом определяют размеры квадратных калибров Q_1, Q_3, Q_5 и т. д.

Размеры промежуточных между квадратными прямоугольных калибров определяют следующим образом:

Q_2 имеет размеры $h_2 \cdot b_2$;

$$b_2 = b_1 + \Delta b = h_1 + \Delta b;$$

$$\Delta b = C \Delta h; \quad b_2 = h_1 + C(h_1 - h_2).$$

Неизвестная величина h_2 определяется в зависимости от h_1 следующим образом:

$$Q_2 = h_2 b_2 = h_2 h_1 + C h_2 h_1 - C h_2^2.$$

Так как

$$Q_2 = \frac{Q_1}{\lambda} = \frac{h_1^2}{\lambda},$$

то

$$h_2^2 - h_2 h_1 \left(\frac{1}{C} + 1\right) = -\frac{h_1^2}{C\lambda}.$$

Отсюда имеем следующие значения для h_2

$$h_2 = h_1 \left[\pm \sqrt{\left(\frac{1+C}{2C}\right)^2 - \frac{1}{C\lambda}} + \frac{1+C}{2C}\right].$$

Численные выражения при величине h_1 всегда являются меньше I, поскольку высота металла вследствие обжатия уменьшается. Обозначим эту величину через K. Тогда

$$h_2 = K h_1.$$

Получив таким образом h_2, можно вычислить ширину b_2, равную $\frac{Q_2}{h_2}$.

Таким образом, имеем

$$\frac{h_1}{h_3} = \frac{h_3}{h_5} = \lambda; \quad \frac{b_1}{b_3} = \frac{b_3}{b_5} = \lambda; \quad \frac{b_2}{b_4} = \frac{b_4}{b_6} = \lambda;$$

$$\frac{h_2}{h_4} = \frac{h_4}{h_6} = \lambda.$$

Относительное обжатие при непосредственном уменьшении высоты квадрата, а также при обжатии прямоугольника в квадрат равно $(1-K)$ 100%. Этот способ может показаться сложным, однако для подсчета величин K и $(1-K)$ 100% вычислены таблицы для различных значений C и λ, которые дают возможность легко находить соответствующую величину K и относительное обжатие. Например, при $C = 0{,}20$ (уширение 20%) и $\lambda = 1{,}2$, $K = 0{,}8$, а соответствующее относительное обжатие 20%.

На основе изложенных выше правил могут быть вычислены размеры калибров для отдельных проходов. Разумеется, после того, как рассчитана и начерчена одна подобная калибровка, отпадает необходимость в подробном расчете калибровки для других исходных размеров металла, так как все необходимые величины могут быть без затруднений получены из чертежа. Примем расположение калибров, как показано на рис. 66 (см. также табл. 14 и 15). Верхнее давление и обжатие во всех парах калибров одинаково.

Таблица 14

Калибровка заготовочного стана трио (рис. 66)

Вытяжка $\lambda = 1{,}2$. Коэффициент уширения $C = 0{,}20$, коэффициент $K = 0{,}80$. Относительное обжатие $\frac{\Delta h}{h_0} = 20\%$. Каждый второй проход дает квадрат

№ прохода	Площадь сечения *мм*²	*h* *мм*	*b* *мм*	Сторона квадрата *мм*
0	22 500	150	150	150
1	18 720	120	156	—
2	15 625	125	125	125
3	13 000	100	130	—
4	10 816	104	104	104
6	9 060	83,5	108,5	—
6	7 569	87	87	87
7	6 290	69,5	90,5	—

Таблица 15

Калибровка заготовочного стана трио (рис. 66)

Начальный диаметр среднего валка — 600 *мм*, начальный диаметр верхнего валка 600 — 17,5 = 582,5 *мм*, начальный диаметр нижнего валка 600 + 17,5 = 617,5 *мм*

Показатель	№ калибра			
	I	II	III	IV
Абсолютное обжатие Δh, *мм*	30	25	20,5	17,5
Верхнее давление, *мм*:				
верхний валок	12,5	7,5	3,0	0
средний валок				
Верхнее давление, *мм*:				
средний валок	12,5	7,5	3,0	0
нижний валок				
Катающий диаметр, *мм*:				
среднего валка	465	487,5	506,25	521,75
верхнего валка	477,5	495	509,25	521,75
нижнего валка	452,5	480	503,25	521,75

В верхнем ряду калибров расположены прямоугольные, в нижнем — квадратные калибры. Кантовка полосы происходит при ее переходе с верхнего в нижний ряд калибров, вследствие чего кантовка может осуществляться автоматически при помощи кантователя.

Черновые калибровки с ромбическими калибрами также проектируются на основе сравнительно простых соотношений. При прокатке в ромбических калибрах после каждого прохода производится кантовка, причем после двух проходов в одном и том же калибре с кантовкой получается приближенный квадрат. Вытяжка λ и угол 2α при вершине калибра остаются постоянными (рис. 67). Площадь ромба равна $J\frac{b \cdot h}{2}$, а сторона равновеликого квадрата a равна $\sqrt{J}$. Если исходное сечения известно, то площадь сечения последующих калибров может быть определена достаточно просто. Из рис. 67 следует:

$$b = h \operatorname{tg} \alpha; \quad h = \frac{2J}{b}; \quad b = \sqrt{2J \operatorname{tg} \alpha}.$$

Соответствующая высота определяется из соотношения:

$$h = b \operatorname{ctg} \alpha.$$

Для последующих ромбических калибров величины b и h получаются по условиям:

$$b_2 = b_1 : \sqrt{\lambda}; \quad h_2 = h_1 : \sqrt{\lambda}.$$

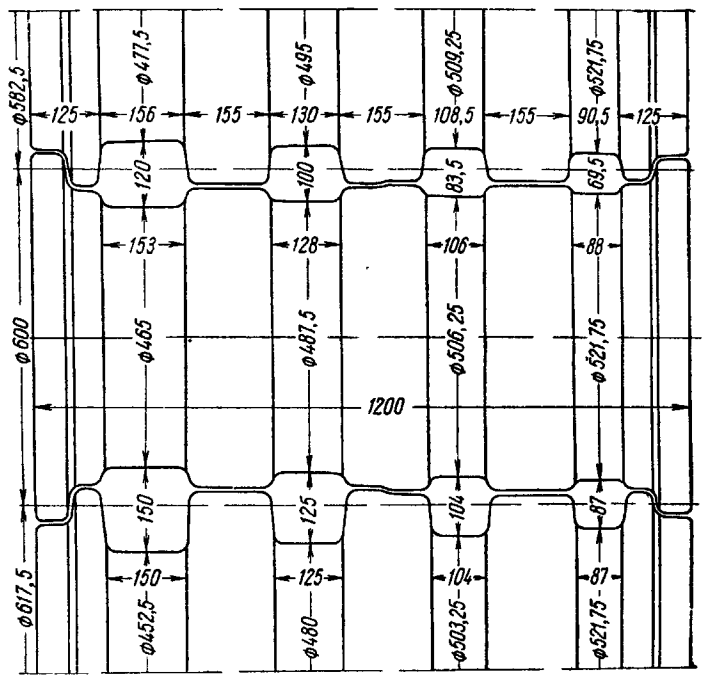


Рис. 66. Калибровка заготовочного стана трио. Каждый второй проход — квадратный

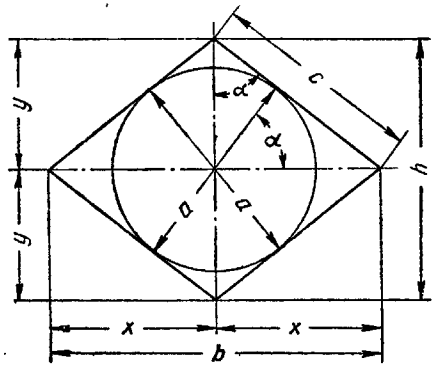


Рис. 67. Размеры ромбического калибра

Следовательно, горизонтальная и вертикальная диагонали каждого последующего ромбического калибра могут быть получены путем деления соответствующих величин предыдущего калибра на корень квадратный из коэффициента вытяжки.

Величина применяемых при этой калибровке обжатий (по высоте проката) вычисляется на основе следующих рассуждений. Ромб кантуется после каждого прохода таким образом, что величина b обжимается до величины h_2. Обжатие по высоте равно

$$\Delta h = b_1 - h_2 = b_1 \left(1 - \frac{1}{\operatorname{tg}\alpha \sqrt{\lambda}}\right).$$

Относительное обжатие равно

$$\frac{b_1 - h_2}{b_1} \cdot 100\% = \left(1 - \frac{1}{\lg\alpha \sqrt{\lambda}}\right) \cdot 100\%.$$

На основании приведенных правил могут быть определены и графически построены размеры калибров для отдельных проходов. При этом, так же, как в предыдущем примере, при проведении графического построения и расчета калибровки при постоянной величине α и λ для всех случаев размещение калибров также определяется графически.

Ромбические калибры размещаются в валках стана трио таким образом, чтобы сверху и снизу были одинаковые ромбические калибры. Не рекомендуется применять холостые калибры для передачи ромба, так как образующийся заусенец в последующем вызывает появление закатов, что нежелательно, особенно при прокатке специальных сталей.

Нецелесообразно прокатывать заготовку в четыре прохода, так как готовая заготовка должна два раза проходить чистовой калибр (в верхнем и нижнем рядах калибров). Если применяется верхнее давление, то диаметр верхнего валка выполняется больше диаметра среднего на величину верхнего давления, а диаметр нижнего валка — на ту же величину меньше диаметра среднего валка.

Соотношения, применяемые при построении чисто ромбической калибровки, приведены в табл. 16.

Угол при вершине применяется тем больший, чем меньше сечение ромба, так как тогда он получается более вытянутым и легче задается в валки. Кроме того, металл претерпевает большую деформацию и поэтому меньше остывает. Если угол при вершине ромба 2 α меньше 110°, то можно работать без проводок; при большем угле следует применять проводки. Преимущество ромбических калибров состоит в том, что прокатываемый металл со

Таблица 16

Размеры ромбических калибров в зависимости от площади сечения и угла при вершине 2 α (см. рис. 67)

2α	C_1	C_3	h	b	$b:h$	C_2	2α
90	1,000	1,000	1,414a	1,414a	1,000	1,000	90
91	0,9995	1,001	1,403a	1,428a	1,017	1,001	91
92	0,999	1,002	1,385a	1,441a	1,042	1,0015	92
94	0,998	1,003	1,366a	1,466a	1,073	1,002	94
96	0,997	1,008	1,346a	1,495a	1,111	1,003	96
98	0,995	1,010	1,326a	1,524a	1,149	1,005	98
100	0,992	1,015	1,305a	1,555a	1,192	1,008	100
102	0,989	1,028	1,287a	1,589a	1,234	1,012	102
104	0,985	1,031	1,269a	1,623a	1,279	1,016	104
106	0,980	1,040	1,252a	1,661a	1,327	1,020	106
108	0,975	1,051	1,237a	1,701a	1,376	1,027	108
110	0,968	1,068	1,221a	1,742a	1,428	1,032	110
112	0,962	1,080	1,206a	1,789a	1,483	1,039	112
114	0,955	1,095	1,192a	1,835a	1,540	1,049	114
116	0,947	1,112	1,179a	1,887a	1,600	1,055	116
118	0,939	1,135	1,167a	1,942a	1,665	1,065	118
120	0,930	1,155	1,156a	2,000a	1,732	1,075	120
122	0,920	1,182	1,144a	2,067a	1,808	1,088	122
124	0,910	1,208	1,133a	2,132a	1,879	1,099	124
126	0,899	1,240	1,123a	2,202a	1,960	1,112	126
128	0,888	1,270	1,114a	2,283a	2,049	1,125	128
130	0,875	1,308	1,104a	2,370a	2,144	1,142	130

всех сторон обрабатывается стенками заполненного калибра, и сечение всегда имеет форму, близкую к квадрату. Из этого следует, что полоса в калибре с прямолинейными стенками более устойчива и не так легко сваливается, как в стрельчатом калибре. Недостатком является то, что ромбический калибр хуже препятствует уширению, чем стрельчатый, что определяет необходимость применения небольшого уширения ($b_2 > h_1$). О применении ромбических калибров на непрерывных заготовочных станах уже говорилось (см. рис. 62). При прокатке квадратного профиля ромбические калибры служат предчистовыми (шлихтовальными).

Основные формулы для вычисления размеров ромбического калибра, изображенного на рис. 67, приведены ниже:

$$\sin\alpha = a : 2y; \quad \cos\alpha = a : 2x;$$

$$\cos\alpha = y : c; \quad y = c\cos\alpha;$$

$$h = 2y = a : \sin\alpha;$$

$$h = 2y = 2c\cos\alpha;$$

$$b = 2x = a : \cos\alpha;$$

$$b = 2x = 2c\sin\alpha;$$

$$\operatorname{tg}\alpha = b : h;$$

$$Q = \frac{b \cdot h}{2} = \frac{a^2}{\sin 2\alpha} = c^2 \sin 2\alpha;$$

$$a = \sqrt{Q} \cdot \sqrt{\sin 2\alpha};$$

$$c = \sqrt{Q} : \sqrt{\sin 2\alpha};$$

$$C_1 = \sqrt{\sin 2\alpha};$$

$$C_2 = 1 : \sqrt{\sin 2\alpha};$$

$$a = c \cdot \sin 2\alpha;$$

$$c = a : \sin 2\alpha;$$

$$C_3 = \frac{1}{2\alpha}.$$

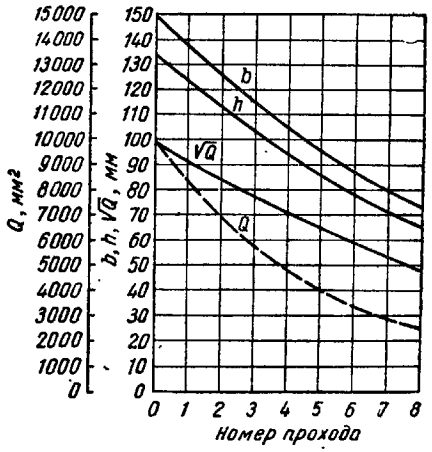


Рис. 68. Номограмма для определения размеров калибров для калибровки заготовки по табл. 17.

При этом:

$$a = \sqrt{Q}\,C_1;$$

$$c = \sqrt{Q}\,C_2;$$

$$c = aC_3.$$

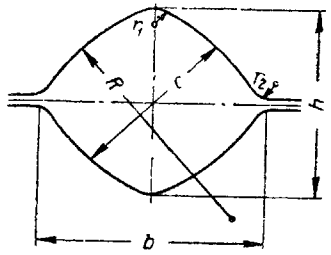


Рис. 69. Размеры стрельчатого калибра

В табл. 16 приведены размеры ромбических калибров в зависимости от площади калибра и угла при вершине 2 α. В табл. 17 приведены данные для калибровки заготовочного стана при прокатке квадрата 50 *мм* из квадрата 100 *мм*. Угол при вершине ромба принят равным 96°, вытяжка за проход —1,2.

Таблица 17

Калибровка заготовочного стана для прокатки квадрата 50 *мм* специальной стали из квадрата 100 *мм* в 8 проходов

Ромбическая калибровка: $2\alpha = 96°$; $\operatorname{tg}\frac{\alpha}{2} = 1{,}11$; $\lambda = 1{,}2$;

$$\sqrt{\lambda} = 1{,}095$$

№ прохода	Площадь сечения Q *мм*²	$\sqrt{Q}$ *мм*	Горизонтальная диагональ b *мм*	Вертикальная диагональ h *мм*
0	10 000	100	149,0	134,0
1	8 340	91,4	136,0	122,2
2	6 950	83,5	124,2	111,8
3	5 800	76,1	113,5	102,0
4	4 830	69,5	103,5	93,0
5	4 020	63,5	94,6	85,0
6	3 350	57,9	80,4	77,6
7	2 790	52,9	78,8	70,9
8	2 320	48,2	72,0	64,7

Для $2\alpha = 96°$ при $Q = 10\,000$ *мм*²;

$$a_0 = \sqrt{Q} \cdot C_1 = 100 \cdot 0{,}997 = 99{,}7 \text{ (см. табл. 16)};$$

$$h_0 = 1{,}346a = 134;$$

$$b_0 = 1{,}495a = 149.$$

Размеры h_1, h_2 и т. д., b_1, b_2 и т. д. получаются делением на $\sqrt{\lambda} = \sqrt{1{,}2} = 1{,}095$.

Размеры калибров для отдельных проходов графически представлены на рис. 68. Из этого графика можно получить размеры калибров для всех случаев при постоянной величине α и λ. Обжатия, применяемые при прокатке в ромбических калибрах, приведены в табл. 18.

Таблица 18

Сопоставление различных обжатий, применяемых при прокатке в ромбических калибрах

2α, град.	$b : h$	A, %	λ	$\sqrt{\lambda}$
96	1,11	17	1,20	1,10
98—100	1,19	20	1,25	1,12
100—110	1,43	23	1,30	1,14
110—120	1,73	26	1,35	1,16

Стрельчатая калибровка имеет большое сходство с ромбической. Применяемые в практике размеры стрельчатых калибров приведены в табл. 19 и на рис. 69.

Таблица 19

Размеры стрельчатых калибров

$$R = b;\ r_1 = 0{,}2c;\ r_2 = 0{,}4c;\ b_2 = h_1;\ \frac{b_1}{h_1} = \frac{b_2}{h_2} = \ldots \frac{b_n}{h_n} = C = y;$$

$$Q_1 \approx \frac{b_1 h_1}{2};\ Q_2 \approx \frac{b_2 h_2}{2};$$

$$\lambda = \frac{Q_1}{Q_2} = \frac{b_1 \cdot h_1}{b_2 \cdot h_2} = \frac{b_1}{h_1} \cdot \frac{h_1}{h_2} = \frac{b_1}{h_1} \cdot \frac{b_2}{h_2} = y^2;\ a = \frac{1}{y^2};\ A = \left(1 - \frac{1}{y^2}\right) 100\%.$$

$y = b : h$	$\lambda \approx y^2$	A, %	2α, град.	Для C, *мм*
9 : 8=1,12	1,26	21	96	100—200
8 : 7=1,14	1,30	23	98	40—100
7 : 6=1,16	1,35	26	99	40

Так как сводчатая форма калибра противодействует уширению, то принимается, что $h_2 = h_1$. Достоинством стрельчатого калибра является то, что всесторонняя деформация в заполненном калибре улучшает качество металла. Поэтому эта калибровка широко применяется при прокатке сварочной и специальной сталей. Стрельчатые калибры используются также в качестве черновых при прокатке круглого профиля. Недостаток их состоит в том, что полоса в стрельчатых калибрах легко сворачивается. Так же как в ромбических калибрах, угол при вершине 2α принимается тем больше, чем меньше сечение калибра, так как профиль малого размера должен быть у́же, чтобы его было легче задавать. При этом также увеличивается степень деформации, что замедляет охлаждение. В табл. 20 и на рис. 70 представлена стрельчатая калибровка при $\sqrt{Q}$ в пределах от 40 до 200 *мм*.

Калибровка по системе квадрат — ромб обеспечивает бо́льшие вытяжки, чем разобранные выше системы калибровок. Поэтому она применяется при прокатке мягких сталей, главным образом при прокатке профилей среднего сечения, примерно соответствующих квадрату от 38 до 130 *мм*. Применяемые обычно обжатия и углы при вершине 2α, даны в табл. 21. Проводки становятся нужными при углах при вершине 120° и более. Размеры калибровки заготовок от 100 × 100 до 38 × 38 *мм* представлены в табл. 22. На рис. 71 показаны размеры калибров по проходам.

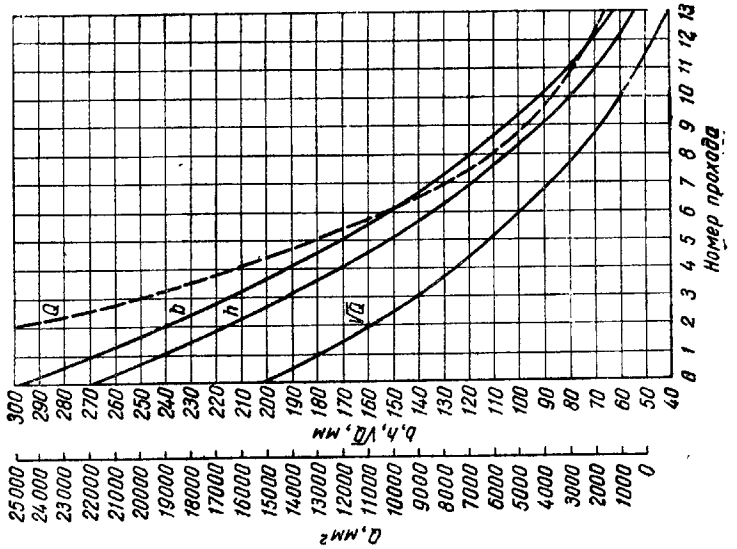


Рис. 70. Номограмма для определения размеров стрельчатых калибров

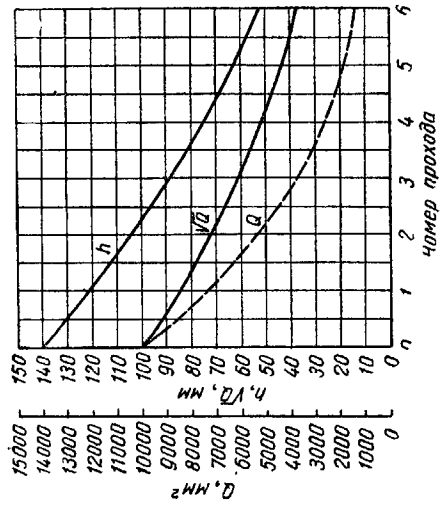


Рис. 71. Номограмма для определения размеров при калибровке квадрат — ромб для заготовочного стана по табл. 22.

Таблица 20

Размеры стрельчатых калибров. Вытяжка 1,26—1,30

№ прохода	$\sqrt{Q}$, *мм*	Q, *мм*²	h, *мм*	b, *мм*	λ	A, %
0	200	40 000	267	300		
1	177	31 100	240	267	1,26	21
2	157	24 600	214	240	1,26	21
3	140	19 600	191	214	1,26	21
4	125	15 600	170	191	1,26	21
5	112	12 800	152	170	1,26	21
6	100	10 000	135	152	1,26	21
7	88	7 700	118	135	1,30	23
8	77	5 900	104	118	1,30	23
9	67,5	4 550	91	104	1,30	23
10	59	3 500	80	91	1,30	23
11	52	2 700	70	80	1,30	23
12	45,5	2 060	61	70	1,30	23
13	40	1 600	54	61	1,30	23

Таблица 21

Калибровка квадрат — ромб. Отношение сторон двух последовательных квадратов 1,25 к 1,45, что соответствует вытяжке за проход $\lambda = 1{,}55—2{,}0$

Угол при вершине для квадрата 91°

Диагональ h для квадрата $1{,}40\sqrt{Q}$

Диагональ b » » $1{,}42\sqrt{Q}$

Угол при вершине 2α для ромба, град.	110	120	128	130
Отношение диагоналей $\frac{b}{h}$ для ромба	1,43	1,73	2,00	2,14
Вытяжка λ квадрат — ромб	1,30	1,35	1,40	1,45
» λ ромб — квадрат	1,25	1,30	1,35	1,38
» λ квадрат — квадрат	1,60	1,75	1,90	2,00
Отношение сторон квадрат — квадрат (при $2\alpha = 128°$; $b = 2h$ и $h = \sqrt{Q}$)	1,27	1,32	1,38	1,41

Приведенные выше графики для определения параметров калибровок просты и наглядны, но они имеют тот недостаток, что в основу их для каждой калибровки положена неизменная величина вытяжки и угла при вершине калибра; следовательно, для различных углов 2α и вытяжек нужно строить отдельные графики. В связи с этим значительные преимущества представляют номограммы, предложенные Эмике [42], которые позволяют выбирать площадь калибра в зависимости от величины стороны квадрата c для соответствующего сечения (без учета применяемого

на практике скругления углов). Таким образом, в основу построения номограмм кладется условие $F = C_1c^2$. В этом выражении C_1 — постоянная величина для данной калибровки. На номограммах Эмике для определения размеров калибров по оси абсцисс

Таблица 22

Калибровка квадрат — ромб для прокатки квадрата 38×38 *мм* из квадрата 100×100 *мм* в 6 проходов. Угол при вершине квадрата — 91°, ромба — 128°. Вытяжка: квадрат — ромб — 1,40, ромб — квадрат — 1,35, квадрат — квадрат — 1,90. Отношение сторон квадрат — квадрат—1,38

№ прохода	Q, *мм*²	$\sqrt{Q}$, *мм*	b, *мм*	h, *мм*
0	10 000	100	142	140
1	7 150	84,5	169	84,5
2	5 300	72,5	103	102
3	3 780	62	123	61,4
4	2 800	52,5	74,5	73,5
5	2 000	44,5	89	44,5
6	1 480	38	54	53,2

откладывается сторона квадрата, а на оси ординат — площадь сечения F, равная C_1c^2. На номограммах нанесена парабола, вершина которой проходит через начало координат (рис. 72 и табл. 23 и 24). Ниже основной параболы находятся последующие

Таблица 23

Смешанная ромбическая калибровка для непрерывного заготовочного стана
(см. рис. 72)

Показатели	№ калибра						
	0	I	II	III	IV	V	VI
Сторона квадрата и ромба *мм*	120	109	85	79	60	61	45
Угол при вершине, град. .	92	118	92	124	92	130	92
Обжатие, %	—	27	31	28	30,5	21	29

параболы, построенные для обжатия (по площади) 5, 10, 15, 20%. Ниже оси абсцисс расположен заштрихованный участок, который служит для определения угла при вершине и величины обжатия по площади, применяемых на практике. Угол при вершине принимается возрастающим с уменьшением величины сечения профиля. Использование этой номограммы позволяет приме-

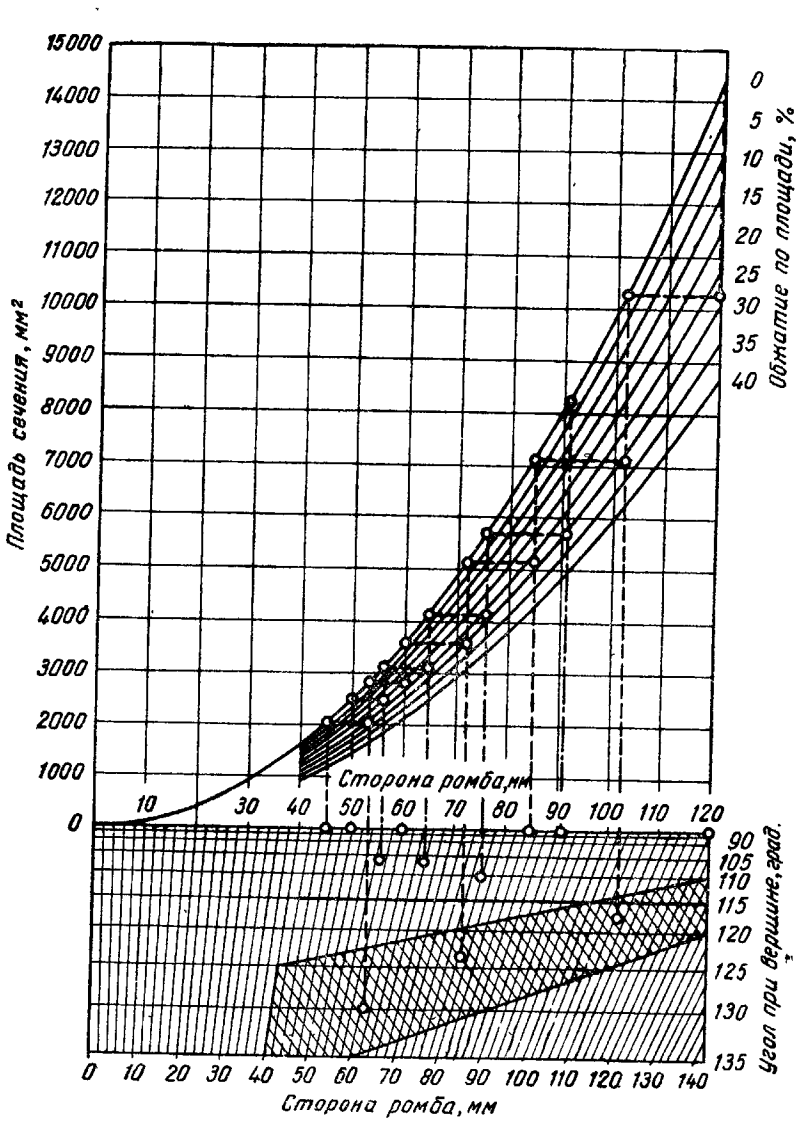


Рис. 72. Номограмма для вычисления размеров калибров при калибровках: ромбической, квадрат — ромб и ромб — квадрат для прокатки литой стали (по О. Эмике):
— — — — — — — — — калибровка по табл. 23;
— · — — — — — — калибровка по табл. 24

нять любые величины угла при вершине и вытяжки для отдельных проходов. На рис. 73 и табл. 25 представлена номограмма

Таблица 24

Полностью ромбическая калибровка для линейного заготовочного стана
(см. рис. 72)

Показатели	№ калибра				
	0	I	II	III	IV
Сторона ромба, *мм*	91	78	66	57	50
Угол при вершине, град	91	111	107	107	91
Обжатие, % . . .	—	31,5	26,5	24,5	20,5

для расчета ромбических калибров при прокатке заготовки из специальных сталей.

Таблица 25

Ромбическая калибровка для прокатки специальной стали на заготовочном стане трио 650

Показатели	№ калибра					
	I	II	III	IV	V	VI
Сторона ромба, *мм*	100	90	80	73	66	60
Обжатие, %		19	21	18,5	19,5	19,5

Прокатка заготовок из цветных металлов большей частью проводится в стрельчатых калибрах.

Особенно большие вытяжки дает система калибровки квадрат — овал. Это видно из рис. 74 и 75, на которых изображено обжатие овальной полосы в квадратном калибре и обжатие квадратной полосы в овальном калибре. Диаграммы относительного обжатия показывают деформацию металла для различных участков сечения калибра. Если пренебречь уширением, то кривая относительного обжатия дает общую величину вытяжки, если просуммировать обжатия по отдельным участкам сечения, считая их независимыми от соседних участков. На рис. 74 видно, как в квадратном калибре относительное обжатие от максимума, расположенного между краем и серединой, быстро снижается до нуля на краю. Следствием этого является то, что на крайних

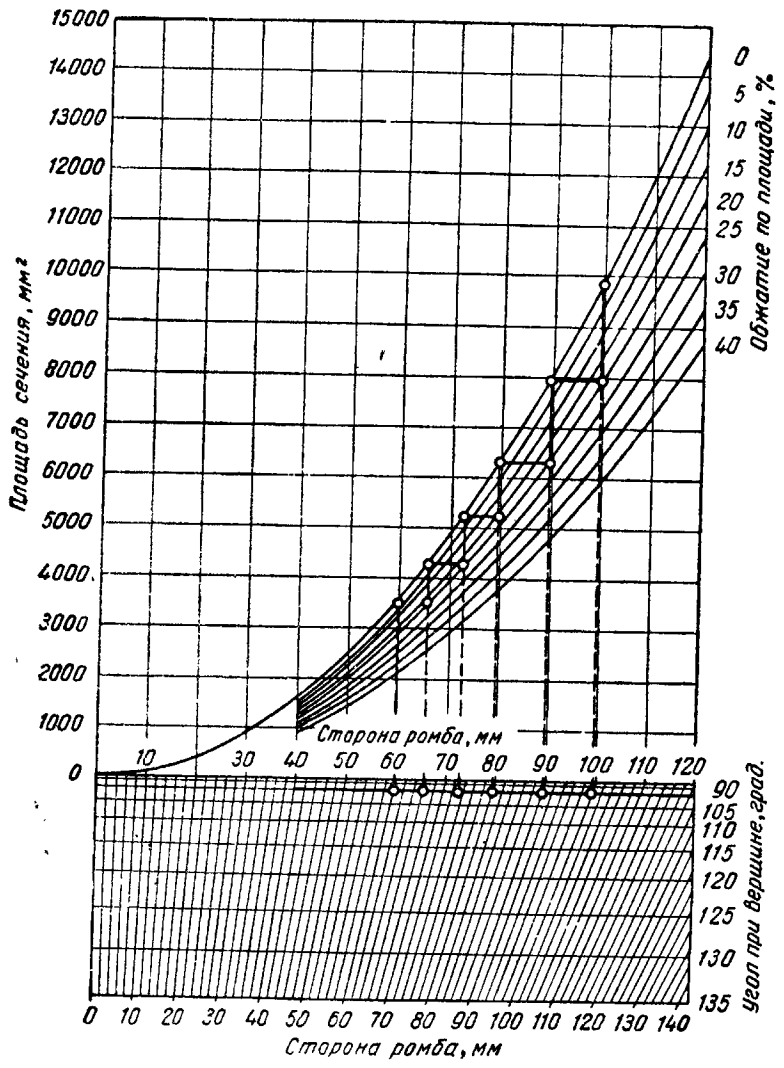


Рис. 73. Номограмма для расчета ромбической калибровки при прокатке заготовки из специальной стали (калибровка по табл. 25)

участках профиля под действием сильно растягивающихся соседних участков могут возникнуть трещины. Поэтому в квадратном калибре уширение незначительно, а вытяжка соответственно ве-

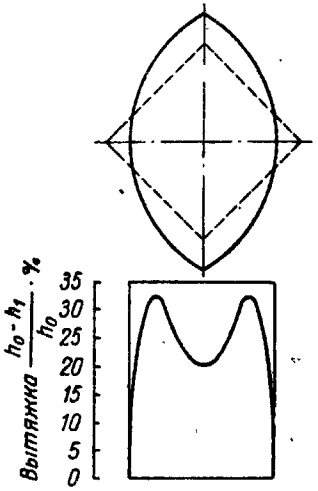


Рис. 74. Распределение относительного обжатия при прокатке полосы овального сечения в квадратном калибре

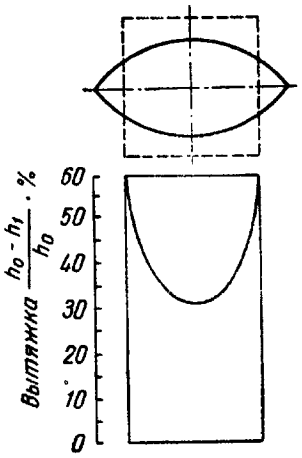


Рис. 75. Распределение относительного обжатия при прокатке полосы квадратного сечения в овальном калибре

лика. При прохождении квадрата в последующем овальном калибре условия деформации другие, как показывает диаграмма относительных обжатий на рис. 75. Здесь удлинение на краях больше чем в середине. Удлинение этих участков затруднено менее обжимаемыми участками середины сечения, вследствие чего металл течет в ширину. Этому, однако, препятствует сводчатый профиль овального калибра, а поэтому в этом калибре обжатие тоже значительно. Вообще при этой системе калибровки обжатие является большим, а уширение невелико. В овальном калибре середина подвержена растягивающим усилиям, а края — сжимающим; в квадратном калибре края и середина растянуты, а участки между ними сжаты. Так как при чередовании квадратных и овальных калибров эти участки чередуются, то при прокатке деформация совершается равномерно и про-

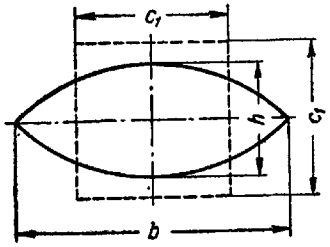


Рис. 76. Овальный калибр

филь в конце концов получается с равномерно распределенными напряжениями по всему сечению.

Для графического изображения этой системы калибровки О. Эмике применяет метод расчета Е. Меркадера [44], согласно которому имеем (см. также рис. 76):
коэффициент деформации

$$f_1 = \frac{h}{c_1} = 0{,}4 - 0{,}6;$$

$$b = c_1 + 0{,}465\,(2c_1 - h) = 1{,}93c_1 - 0{,}465h;$$

коэффициент уширения

$$f_2 = \frac{b - c_1}{2c_1 - h}.$$

В табл. 26 приведены коэффициенты f_1 и f_2 для стали и цветных металлов. Калибровка квадрат — овал, кроме характеризующих ее больших вытяжек, имеет еще то преимущество, что из одного исходного профиля можно получить различные конечные

Таблица 26

Расчетные коэффициенты для калибровки квадрат—овал при прокатке различных сортов стали и цветных металлов (медь, латунь и пр.) по Эмике

Металл	Действительно для квадрата со стороной *мм*	Коэффициент обжатия (предел) f_1	Коэффициент уширения (средний) f_2	Обжатие по площади %	
				от квадрата к овалу	от овала к квадрату
Среднеуглеродистая сталь	5—50	0,548 0,600	0,48	33—38	До 15
Специальная сталь средней твердости	5—50	0,472 0,568	0,50	35—44,5	До 20
Малоуглеродистая сталь	5—80	0,46 0,73	0,425	25—55	15—30
Цветные металлы	6—55	0,45 0,83	0,53	10—45	5—22,5

сечения путем увеличения или уменьшения зазора между валками. Это позволяет обойтись меньшим числом исходных профилей и, тем самым, уменьшить время, затрачиваемое на перевалки. Однако увеличение зазора таит в себе опасность появления большого количества поверхностных дефектов на прокатываемом профиле. В овале особенно напряженными являются боковые поверхности, которые подвергаются самому большому обжатию по высоте. Нолль [45] утверждает, что при этом возникает опасность образования складок на вертикальной грани обжимаемого квадрата, что ведет при обжатии грани, на которой образовались складки, к возникновению трещин и закатов. Крамер [46] называет этот дефект закатными трещинами. Складки могут образоваться на грани, на которой свободное уширение не ограничено стенками калибра. Образование их можно уменьшить путем применения повышенного обжатия по высоте, ограничения металла стенками калибра в вертикальном направлении и улучшения состояния поверхности прокатываемого металла. При подаче квадрата он не всегда точно задается по центру овала и может быть прокатан не только так, как показано на рис. 77, но и в косом положении (рис. 78). При этом получается различное заполнение овального калибра и, как следствие, возможно некоторое переполнение калибра. При такой калибровке опасность переполнения тем больше, чем больше подъем валков с квадратным калибром (рис. 79).

Этот дефект может быть устранен путем отказа от применения автоматических обводок, т. е. при ручной задаче квадрата в овал, оборудованный узкими проводками. Однако, если нежелательно отказываться от ряда преимуществ, связанных с применением обводок, а именно — увеличения производительности, сохранения высокой температуры металла и высокой скорости прокатки, то с этой опасностью следует примириться. Прокатку с обводками возможно улучшить путем замены квадратного калибра равновеликим по площади или несколько меньшим круглым калибром. Преимущества калибровки по системе круг — овал видны из рис. 80, на котором изображена диаграмма относительных обжатий по участкам при задаче круга в овальный калибр. Кривая обжатий не имеет резких пиков, причем металл во всех калибрах ограничен сводчатыми стенками калибров, что обеспечивает получение хорошего овала. Смещение металла в овальном калибре не дает тех дефектов, которые возникают при смещении квадрата в овальном калибре. Поэтому в современных американских калибровках калибры в последних шести проходах выполняются не по системе квадрат — овал, а по системе круг — овал. Однако эта система калибровки имеет также недостатки, которые заключаются в том, что плоскость, имеющая в предыдущем калибре свободное уширение, в последующем также свободно уширяется. При этом увеличивается шероховатость поверхности и увеличивается опасность возникновения закатов. В результате появилась система калибровки овал—овал (рис. 81). Преимуществами этой калибровки является полное устранение прямых плоскостей, всестороннее обжатие, отсутствие усилий, образующих складку на поверхностях, имеющих свободное уширение, отсутствие смещения овального профиля в овальном калибре. Недостатком этой калибровки является затрудненность применения проводок, так как овальный профиль должен быть задан

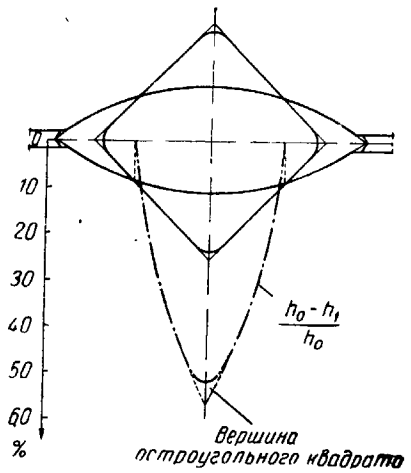


Рис. 77. Положение квадратной полосы прокатываемой в овальном калибре при калибровке квадрат — овал с кривой распределения относительного обжатия

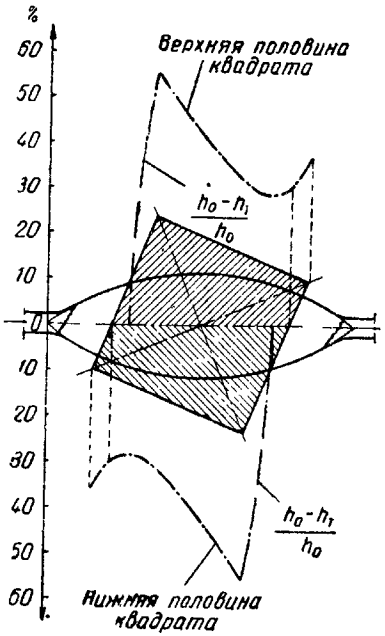


Рис. 78. Перекос квадратной полосы при прокатке в овальном калибре и соответствующие кривые относительного обжатия

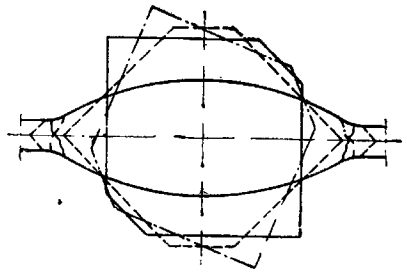


Рис. 79. Влияние формы и положения квадратной полосы при прокатке в овальном калибре

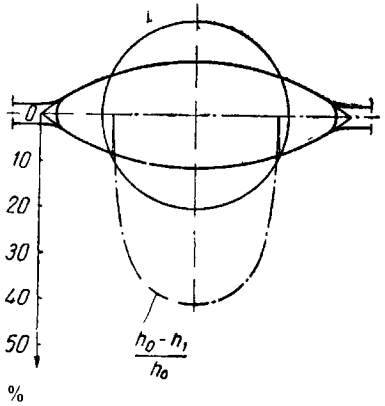


Рис. 80. Номограмма относительного обжатия при прокатке круга в овальном калибре

в последующий овальный калибр, оборудованный узкими проводками. Поэтому эта система калибровки применяется главным образом на непрерывных станах. Преимуществом данной калибровки по Крамеру [47] является то, что при увеличении зазора между валками не образуется шероховатых граней. Возникает также возможность применять для чистового калибра любой из прокатываемых овалов, что уменьшает число перевалок. Калибровка отличается тем, что при прокатке сталей, имеющих большую разницу в уширении, необходимо проводить перевалку, при

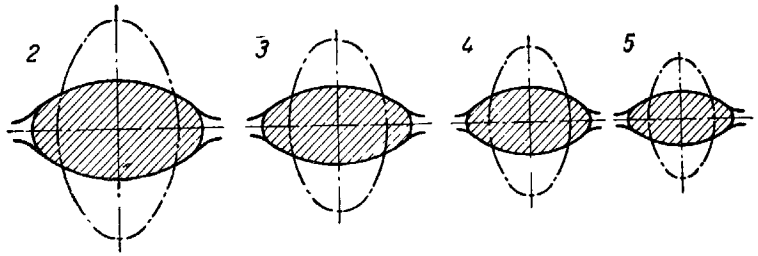


Рис. 81. Калибровка овал — овал с равномерной вытяжкой в каждом проходе (по Лобковицу). Цифры *2—5* обозначают номер прохода

которой нужно менять все овалы. При калибровке овал — овал нужно сменить только чистовой овал и валки для чистового круга.

В Рон [48] применял на непрерывном многоклетьевом[1] стане восьмиугольную калибровку для прокатки специальных металлов и сплавов. Однако в этом случае обжатия составляли от 8 до 12%, а поэтому нерационально применять такую калибровку в качестве вытяжной.

Типы заготовочных станов и калибровок

Заготовочные станы разделяют на следующие основные типы: линейные заготовочные станы с одной или несколькими клетями, станы кросс-коунтри с параллельным расположением клетей в несколько линий и непрерывные заготовочные станы.

Линейные заготовочные станы имеют клети дуо и трио. На рис. 82 изображен заготовочный стан трио, прокатывающий блум 200 × 180 *мм* на заготовку 100 × 100 *мм* в семь проходов. Блум разрезается на две или три части, если это требуют условия прокатки. При этом разница температур прокатки отдельных частей блума и зависящие от этого колебания поперечного сечения прокатываемой полосы получаются не слишком большими, так как эти части могут прокатываться почти одновременно. На

[1] Исправлено (*Перевод.*).

рис. 83 изображен прокатный стан типа Ламбертона, который представляет собой двухвалковый стан, позволяющий избежать установки достаточно дорогого реверсивного электродвигателя. В клети имеется поворотное устройство, которое поворачивает

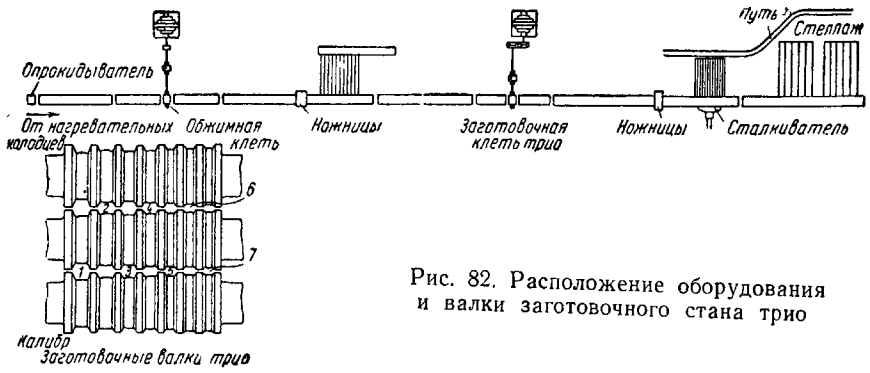


Рис. 82. Расположение оборудования и валки заготовочного стана трио

кассету с валками после каждого прохода на 180° таким образом, что нижний валок оказывается сверху, а верхний — снизу. При этом направление прокатки изменяется, а направление вращения двигателя остается неизменным.

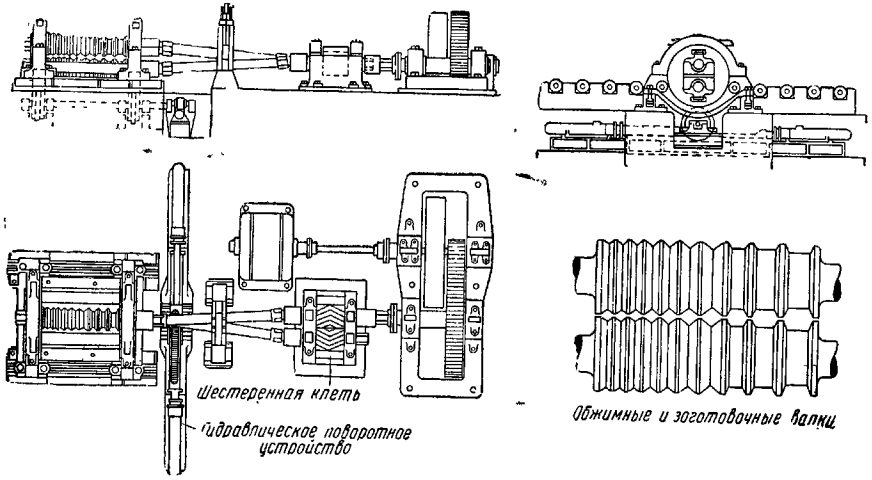


Рис. 83. Расположение оборудования и валки стана Ламбертона

Заготовочный стан кросс-коунтри изображен на рис. 84. На этом стане блум также разрезается на две или три части, чтобы длина стана не была чрезмерно большой. Последняя часть блума прокатывается при температуре более низкой, чем первые. Большое количество обрези снижает выход годного.

Два непрерывных заготовочных стана изображены на рис. 85. На этих станах производится целиком прокатка всей полосы, поступающей от обжимного стана без промежуточного подогрева. Для обжатия боковых граней установлены клети с вертикальными валками. Несмотря на сравнительно высокую стоимость оборудования данных станов, эксплуатация их оказывается более

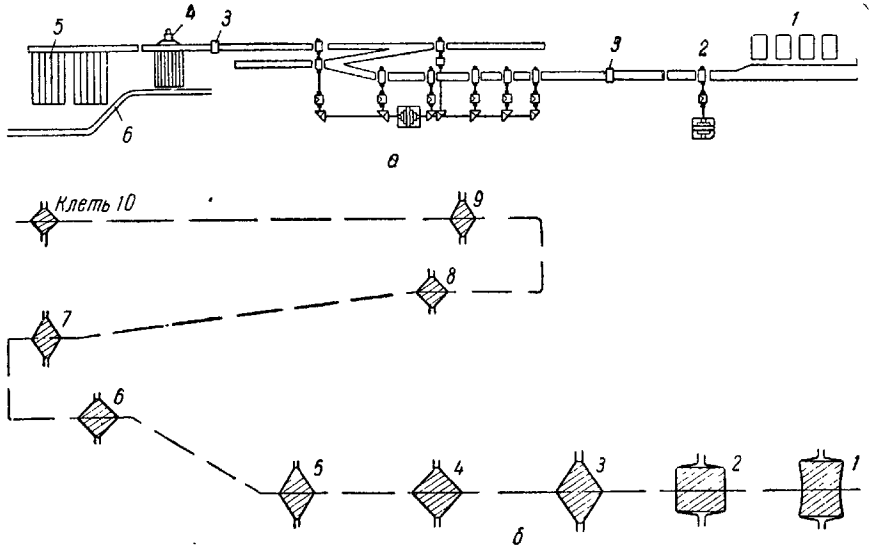


Рис. 84. Схема заготовочного стана типа кросс-коунтри и расположение ящичных, ребровых, ромбических и квадратных калибров:

а — схема расположения заготовочного стана кросс — коунтри; *б* — ящичные, ребровые, ромбические и квадратные калибры для заготовки,
1 — нагревательные колодцы; *2* — обжимная клеть; *3* — ножницы; *4* — сталкиватель; *5* — стеллаж; *6* — железнодорожный путь

выгодной, чем станов других типов, так как производительность их очень высока, и они обеспечивают высокий выход годного. Применяя на этих станах двигатели с регулируемым числом оборотов, можно достигнуть полного использования отдельных клетей. Установка попеременно расположенных горизонтальных и вертикальных клетей на таких станах дает хорошую поверхность прокатываемого металла и удлиняет срок службы валков. На заводе в Лорейне (США) недавно введен в эксплуатацию заготовочный стан, отвечающий самым высоким требованиям. Стан — непрерывного типа и состоит из двух групп. Первая группа имеет три горизонтальные и три вертикальные клети; диаметр валков равен 710 *мм*, длина бочки 1220 *мм*. Вторая группа состоит из двух горизонтальных и двух вертикальных клетей; диаметр вал-

ков 510 *мм*, длина бочки 910 *мм*. Все клети имеют индивидуальные электродвигатели и универсальные шпиндели. Сечение поступающего на стан блума равно 228 × 203 *мм*. В первой группе прокатывается заготовка 102 × 206, 102 × 102, 114 × 114 *мм* или трубная заготовка 140 *мм*; во второй группе квадрат 63,5 *мм* и круг 83—95 *мм*. Ввиду того что положение линии прокатки при смене калибров не должно изменяться, горизонтальные кле-

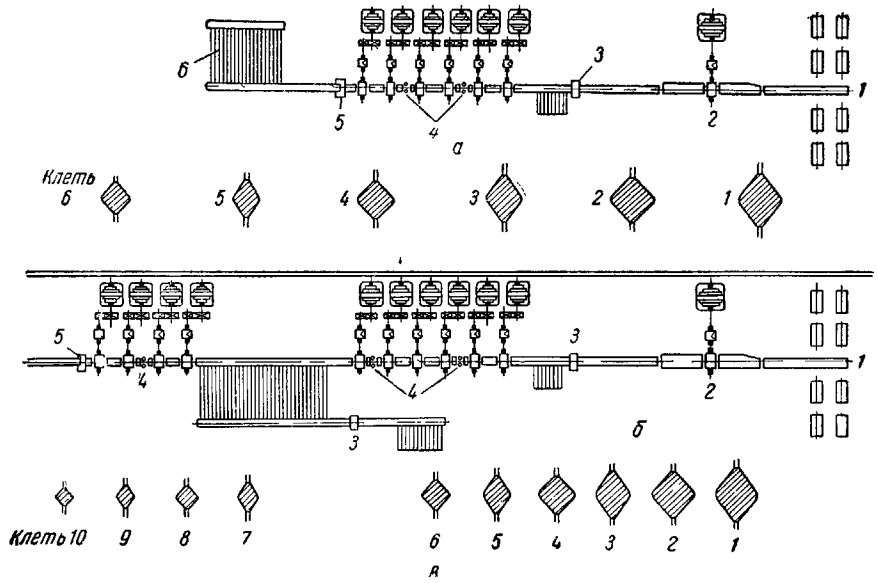


Рис. 85. Расположение двух непрерывных заготовочных станов:

а — схема расположения шестиклетьевого непрерывного заготовочного стана; *б* — квадратные и ромбические калибры; *в* — схема расположения десятиклетьевого непрерывного заготовочного стана:

1 — нагревательные колодцы; *2* — обжимная клеть; *3* — ножницы; *4* — Эджер; *5* — летучие ножницы; *6* — холодильник

ти могут перемещаться в горизонтальном, а вертикальные — в вертикальном направлении за счет оборудования клетей телескопическими шпинделями, которые допускают изменение расстояния между рабочими и шестеренными клетями. Вертикальные валки имеют нижний привод через наклонный вал, расположенный под углом 40°. Муфты и телескопические шпиндели подвешены к рабочей клети. Подушки внешнего валка вертикальной клети при помощи гидравлического устройства прижимаются к станине, подушки внутреннего валка таким же образом прижимаются к нажимному винту, вращение которого обеспечивается электродвигателем. При смене валков вводные проводки раздвигаются при помощи гидропривода, выводные убираются вручную

поворачиванием вокруг оси. В горизонтальной клети уравновешивание верхнего валка гидравлическое, привод нажимного устройства — от электродвигателя. Для регулировки линии прокатки горизонтальная клеть передвигается при помощи особого механизма по плитовине вместе с шестеренной клетью и шпиндельным устройством. Закрепление клети на плитовине производится не только при помощи болтов, но и при помощи гидравлики. Первая группа имеет ящичную калибровку, вторая — калибровку квадрат — овал.

В общем случае для прокатки заготовки применяются плоские калибры, чередующиеся с ребровыми, ромбические, квадратные и овальные калибры. Ящичные калибры не дают таких глубоких врезов в валки, как ромбические и квадратные, и отличаются более энергичными обжатиями, позволяя получить больший выбор различных заготовок. Недостаток этой калибровки состоит в том, что при прокатке малых квадратов (менее 90 × 90 *мм*) полоса в калибре легко сворачивается. Поэтому ящичные калибры применяют главным образом при прокатке заготовки больших сечений.

Прокатка в ромбических калибрах позволяет получить по сравнению с прокаткой в ящичных калибрах заготовку лучшего качества, так как металл деформируется со всех сторон. В каждом ромбическом калибре получается сечение, близкое к квадрату, однако вытяжка в них небольшая. При прокатке квадратной заготовки ромбический калибр является хорошим предчистовым калибром.

Калибровка ромб — квадрат отличается бо́льшей вытяжкой по сравнению с чисто ромбической калибровкой, но имеет меньший выбор конечных квадратов. На рис. 86 представлены различные калибровки, применяемые при прокатке заготовки. Третий столбец представляет косую калибровку. Однако эта калибровка ненадежна, так как вследствие неодинакового диаметра валка в калибре возникает скручивание раската, увеличивается износ валков и затрудняется согласование между отдельными проходами.

Калибровка квадрат — ромб применяется для больших квадратов и особенно часто для прокатки квадратов средней величины.

В табл. 27 приведена схема обжатий для ящичной калибровки, а на рис. 87 графически представлена схема обжатий в зависимости от числа проходов. Калибровки этого типа обычно встречаются в первых группах непрерывных заготовочных станов, в которых производится прокатка блума 200 × 200 *мм* на заготовку 100 × 100 *мм*. Так как при таких больших сечениях металла кантовка между клетями связана с некоторыми трудностями,

Таблица 27

Прокатка заготовки в ящичных калибрах

Ширина калибров: 210, 170, 130, 100 *мм*

№ прохода	№ калибра	h *мм*	b *мм*	Δh *мм*	$\frac{\Delta h}{h_0}$ %	Уширение
0	0	200	200			
1	I	160 К	210	40	20	Ограниченное
2	II	165	170	45	21,4	»
3	II	125 К	170	40	24,2	Уширения нет
4	III	130	130	40	23,5	Ограниченное
5	III	95 К	130	35	26,8	Уширения нет
6	IV	100	100	30	23,0	Ограниченное

Примечание. К — кантовка

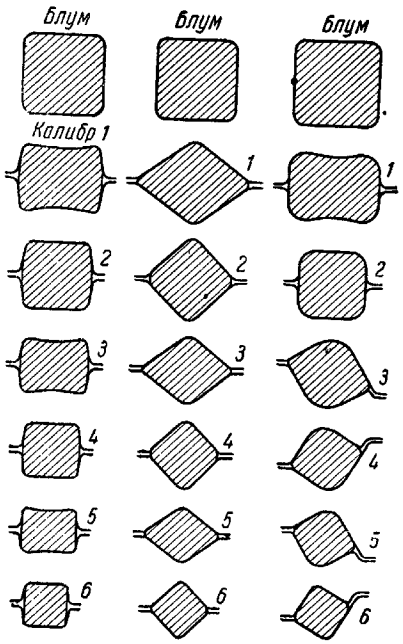


Рис. 86. Три калибровки заготовки

то большие преимущества имеют станы с попеременно расположенными горизонтальными и вертикальными клетями.

На рис. 88 и 89 приведены две калибровки заготовки для станов трио, заимствованные из книги Тринкса.

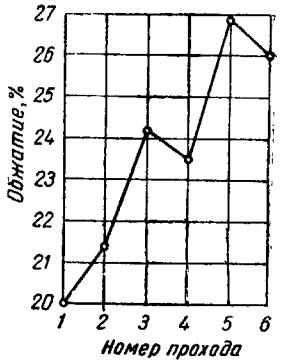


Рис. 87. График обжатий по проходам для калибровки по табл. 27

Такие калибровки применяются главным образом на заготовочных станах, состоящих из трио-клетей, расположенных в одну или две линии. Перед двумя клетями установлены ступенчатые кантователи, в которых полоса кантуется при перемещении с

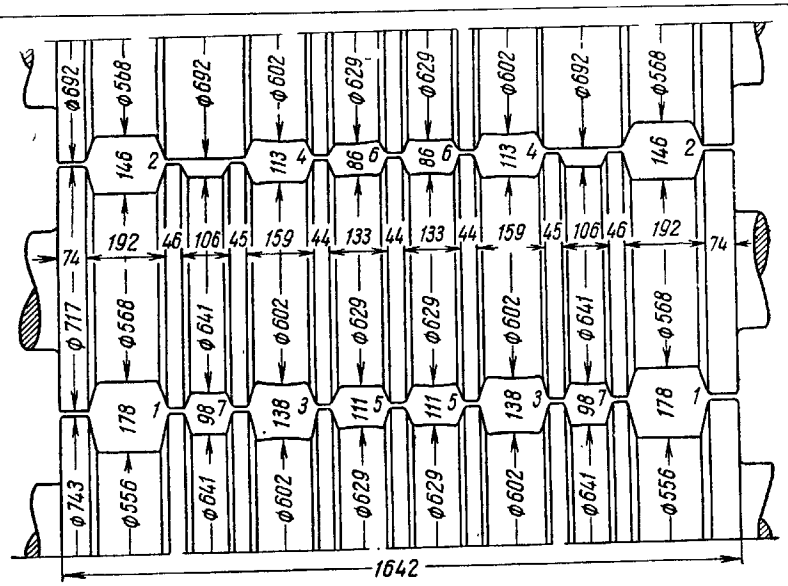


Рис. 88. Калибровка черновых валков трио по Тринксу (схема одновременной прокатки двух заготовок: 1—5, 2—6, 3—7, 1—5)

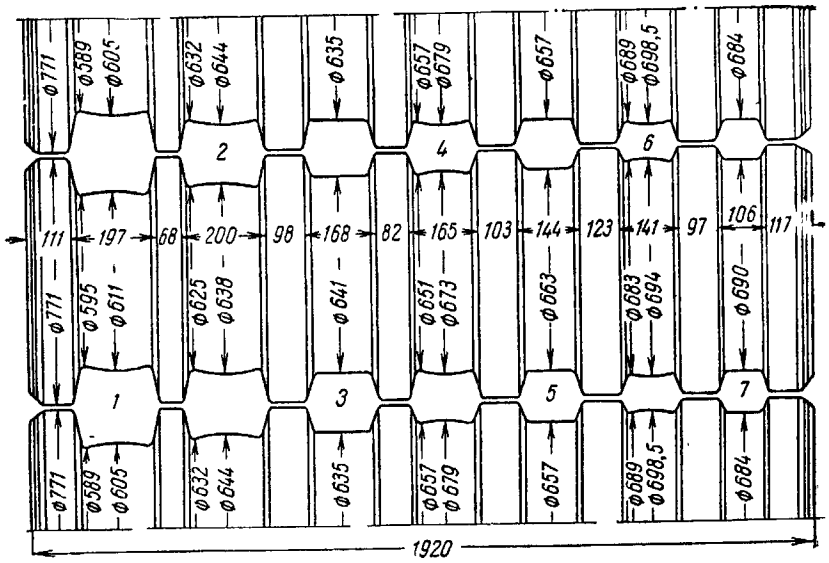


Рис. 89. Калибровка черновых валков трио по Тринксу (три заготовки одновременно):

1—3—5, 2—4—6, 3—5—7, (схема А),
4—6, 1—5—7, 2—6 (схема Б)
1—3—7, 2—4, 1—3—5 (схема В)

верхнего ряда калибров на нижний, после чего она задается в следующий калибр. Обе клети оборудованы качающимися сто-

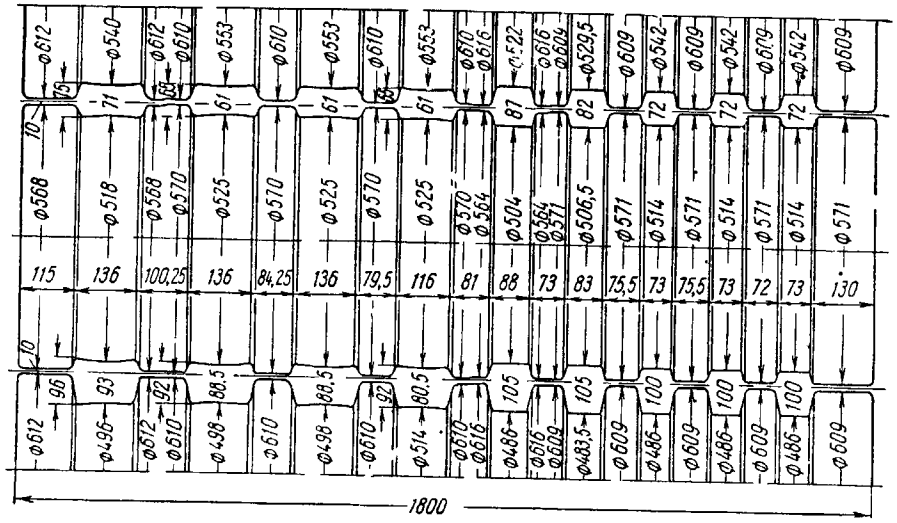


Рис. 90. Калибровка черновых валков заготовочного стана трио (немецкая система)

лами. Качающийся стол за первой клетью должен по ширине соответствовать длине бочки валка, а за второй — только части

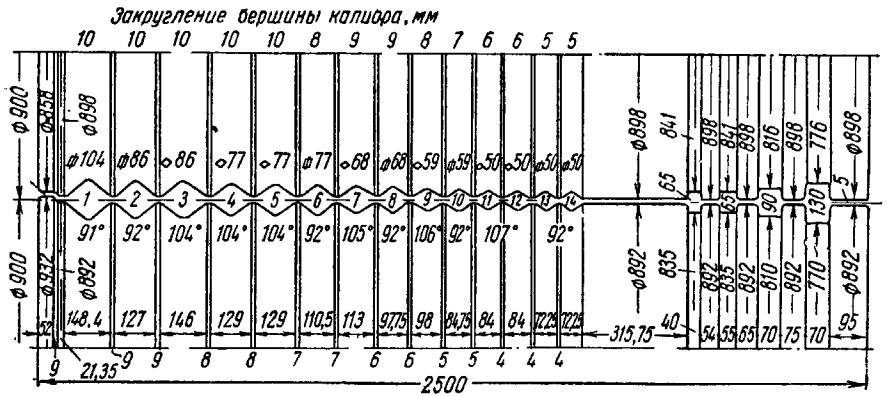


Рис. 91. Калибровка чистовых валков сутуночно-заготовочного стана дуо 900

длины бочки, так как калибр для чистового квадрата остается свободным и может работать без участия качающегося стола.

Производительность такого стана достаточно высока, так как на нем могут прокатываться две полосы одновременно.

Пример калибровки немецкого заготовочного стана с ящичными калибрами представлен на рис. 90. На рис. 91 показана калибровка чистовой клети заготовочного и полосового стана дуо 900. Эта ромбическая калибровка дает постоянную вытяжку за проход λ, равную 1,3. При величине коэффициента $C = 52$ *мм*, стороны последующих калибров получаются умножением на $\sqrt{1{,}3} =$

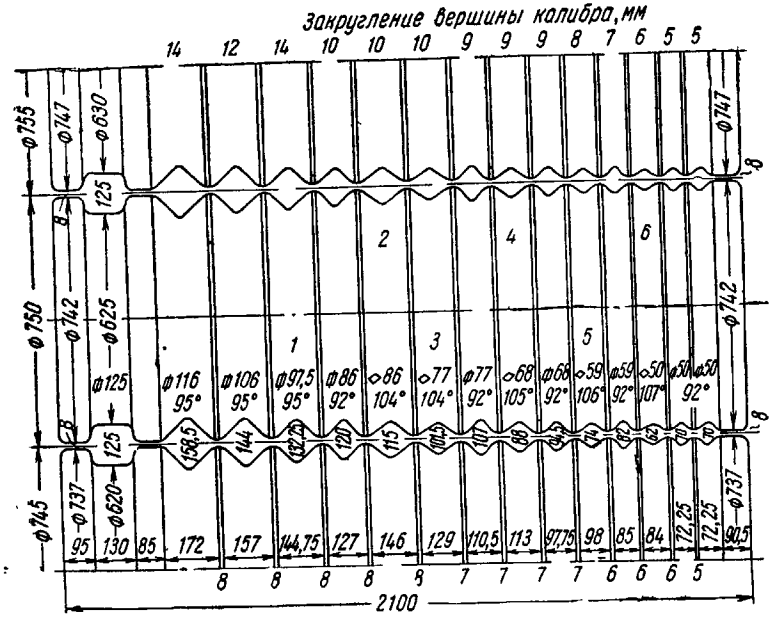


Рис. 92. Калибровка чистовых валков заготовочного стана трио 750 (Цифры 1—6 обозначают номера проходов)

$= 1{,}14$. Угол при вершине для чистового калибра принимается равным 91°, углы при вершине для ромбов находятся в пределах от 102 до 106° с возрастанием по мере уменьшения площади сечения. Следует при этом заметить, что прокатка квадрата 50 *мм* на стане 900 является исключением. Для этого более пригодны станы с диаметром валков от 500 до 700 *мм*. Радиусы закругления заготовки принимаются минимальными, для того чтобы, с одной стороны, обеспечить точную задачу полосы в калибр, с другой стороны, избегнуть «кантования» заготовки в методических нагревательных печах при последующем нагреве. Износ калибров при этом несколько увеличивается, однако этот недостаток незначителен. На рис. 92 представлена ромбическая калибровка

заготовочного стана трио, а на рис. 93 — калибровка для прокатки заготовки на дуо-реверсивном стане 800, в которой первые три калибра являются ящичными, а остальные спроектированы по схеме ромб — квадрат. Калибровка валков для прокатки квадрата 50 *мм* из заготовки квадрат 130 *мм* в 5 проходов показана на рис. 94. Калибровка заготовки на заготовочном стане трио 875, состоящем из трех клетей, показана на рис. 95. В первой клети расположены черновые калибры для прокатки заготовки и сутунки. Во второй клети прокатываются квадраты от 50 до 100 *мм* и в третьей — сутунка от 200 × 10 *мм* и толще. Чистовые валки для прокатки квадратов во второй клети имеют ромбические и квадратные калибры.

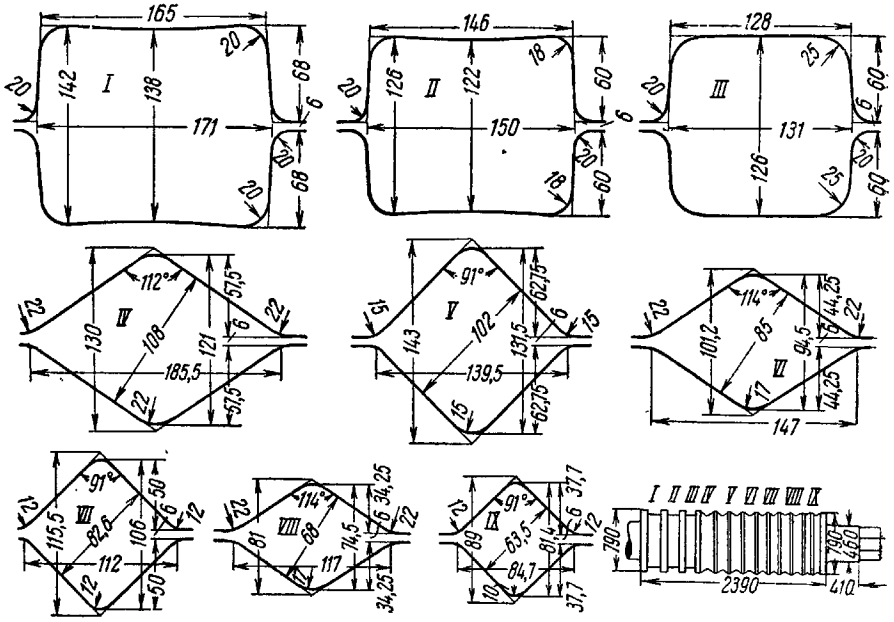


Рис 93. Калибровка заготовки для реверсивного стана дуо 800

На рис. 96, 97 и 98 представлены калибровки для непрерывных заготовочных станов. В калибровке на рис. 97 угол при вершине ромба принят равным 128°, вытяжка от квадрата к квадрату λ равна 2, отношение сторон квадратов — 1,41. На рис. 99 представлена калибровка непрерывного заготовочного стана завода Гэри (США). Стан состоит из двух групп, по шесть клетей каждая. Калибровка дает возможность прокатать из исходного квадрата 190,5 *мм* 13 различных видов заготовки. После первой группы полоса свободно выходит на рольганг, подвергается обрезке и разрезке на части, после чего поступает на склад или без промежуточного нагрева направляется для дальнейшей прокатки во вторую группу.

Методика расчета калибровки валков непрерывных станов соответствует обычной, применяемой для линейных станов. Для непрерывных станов с групповым приводом нужно учесть неизменное определяемое редуктором соотношение чисел оборотов отдельных клетей.

При всех последующих изменениях калибровки это положение должно приниматься во внимание. В настоящее время непрерывные заготовочные станы имеют индивидуальный привод клетей. На непрерывных станах можно применять высокие обжатия, так как числа оборотов невысоки, а условия захвата полосы валками более благоприятны, чем в других станах, поскольку металл подается в валки со сравнительно большим давлением, действующим со стороны предыдущей клети.

Типы сутуночных станов и калибровок

Сутунка прокатывается на станах, имеющих такое же расположение, как и заготовочные станы. Поэтому заготовочные станы обычно устраивают таким образом, что на них можно прокатывать сутунку. Существуют линейные сутуночные станы, станы типа кросс-коунтри и непрерывные сутуночные станы.

Даже при прокатке сутунки из стали хорошего качества, на боковых кромках появляются трещины, если боковые грани недо-

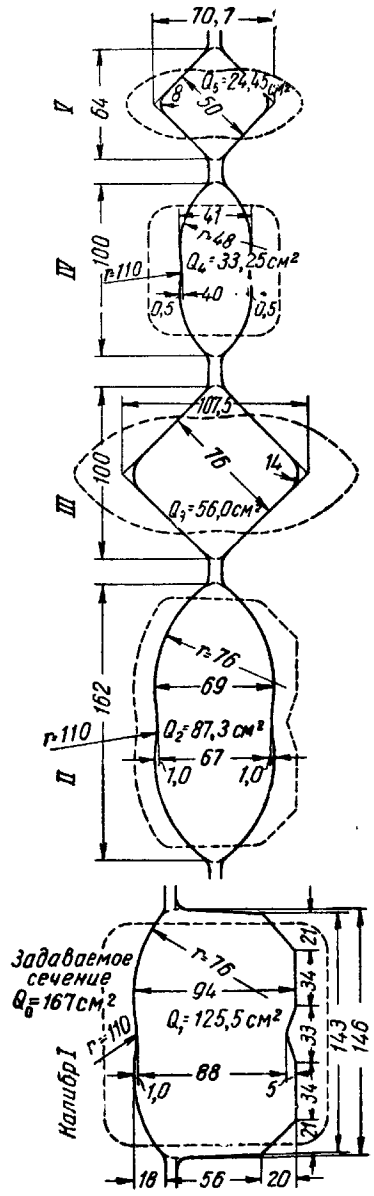


Рис. 94. Калибровка заготовки для стана трио 450

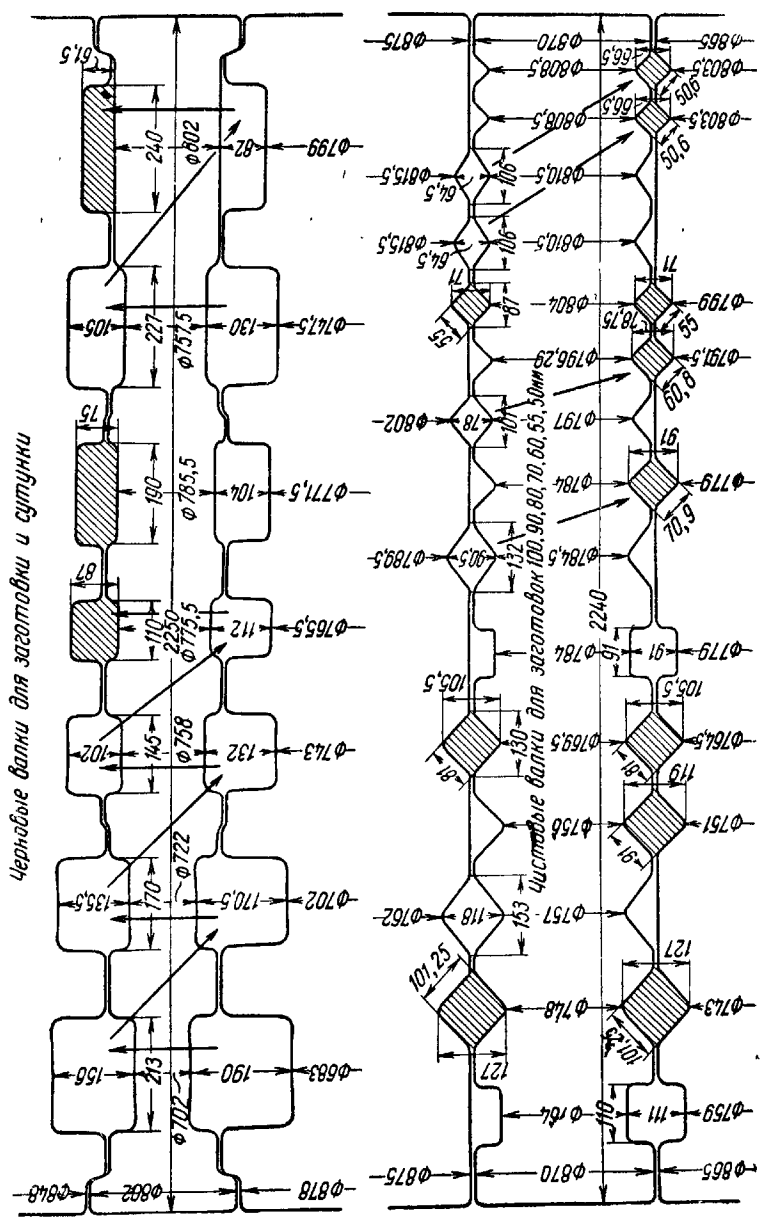


Рис. 95. Калибровка черновых валков для сутуночно-заготовочного стана и чистовых валков для заготовки

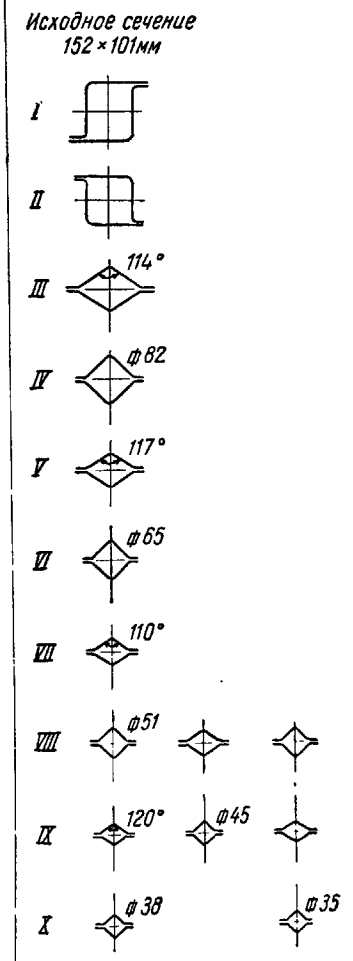


Рис. 96. Калибровка десятиклетьевого непрерывного заготовочного стана (*I—X* — номера прохода)

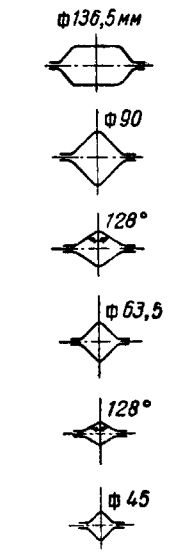


Рис. 97. Калибровка шестиклетьевого непрерывного заготовочного стана

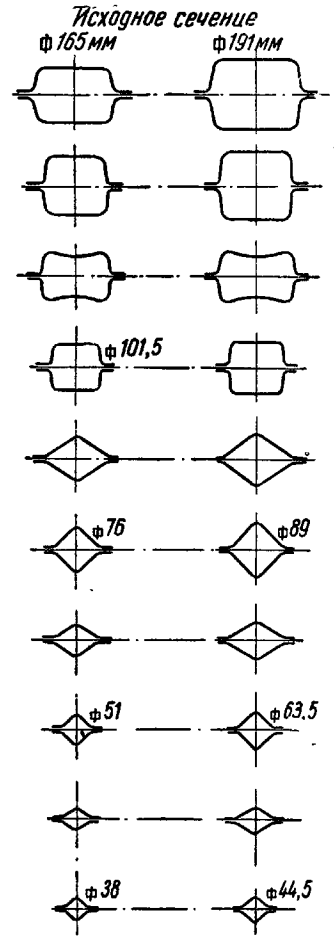


Рис. 98. Калибровка десятиклетьевого непрерывного заготовочного стана

статочно хорошо обжаты. Поэтому прокатку следует производить либо в закрытых калибрах, либо, если она осуществляется на гладких валках, иметь ребровые проходы. В закрытых калибрах прокатывают с ограниченным уширением, причем небольшое обжатие производится буртами валков, что способствует получению

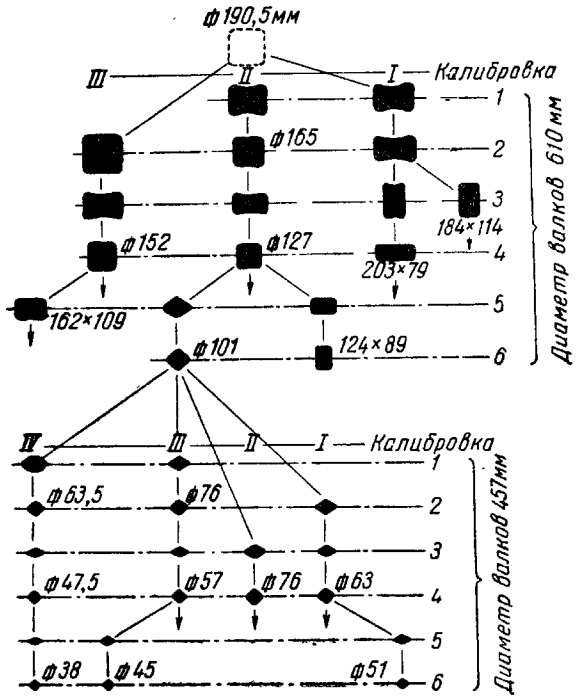


Рис. 99. Калибровка непрерывного заготовочного стана, состоящего из двух групп диаметром валков 610 и 457 *мм*

(цифры *1—6* обозначают номера клетей)

чистых кромок. Этот метод применяется всюду, где для сутунки каждой прокатываемой ширины имеется отдельный калибр; это, однако, влечет за собой необходимость частой перестройки стана. При прокатке на гладкой бочке для получения чистых кромок и регулирования ширины полосы необходимо применять ребровые проходы. Обжатие кромок может производиться в горизонтальных валках при условии кантовки полосы, либо в вертикальных валках без кантовки. Дополнительным следствием ребровых проходов является удаление окалины с поверхности полосы. Окалину можно удалять также за счет обдувания паром или возду-

хом; более хороший способ заключается в подаче струй воды высокого давления примерно до 100 *атм*. Применяются также особые отделочные или полировочные клети. На рис. 100 изображена калибровка второй клети реверсивного сутуночного стана дуо 750, который состоит из двух клетей с расположенной перед холостым калибром отделочно-полировочной клетью. Из табл. 28 видно, что обжатие составляет от 27,4 до 38,2%, в то время как в полировочной клети оно составляет 18%. При прокатке сутунки

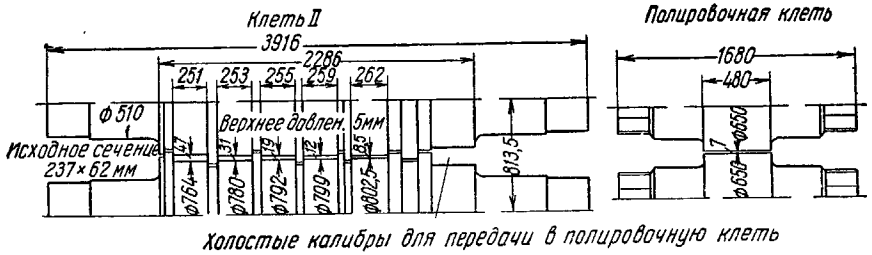


Рис. 100. Калибровка чистовых валков для сутунки. Стан 750 дуо-реверсивный и полировочная клеть

в закрытых калибрах станов дуо необходимы врезные замки на нижнем и верхнем валке для точной настройки калибров.

Таблица 28

Схема прокатки сутунки в чистовой клети

(см. рис. 100)

№ прохода	№ калибра	*h* *мм*	*b* *мм*	Сечение *мм*²	Обжатие *мм*²	Обжатие %	Вытяжка λ
0	—	65	250	16250	—	—	—
1	I	47	251	11797	4453	27,4	1,37
2	II	31	253	7843	3954	33,5	1,50
3	III	19	255	4845	2998	38,2	1,41
4	IV	12	259	3108	1737	35,8	1,56
5	V	8,5	262	2227	881	28,3	1,39

Две ступенчатые калибровки валков для прокатки сутунки на дуо-реверсивном стане 900 представлены на рис. 101 и 102. Сутунки прокатывают на гладкой бочке, ребровой калибр расположен в предчистовой клети. На табл. 29 и 30 представлены схемы обжатия для стана трио.

На рис. 103 представлена калибровка чистовой клети сутуночного стана трио 875. Черновые калибры этого стана, на которых

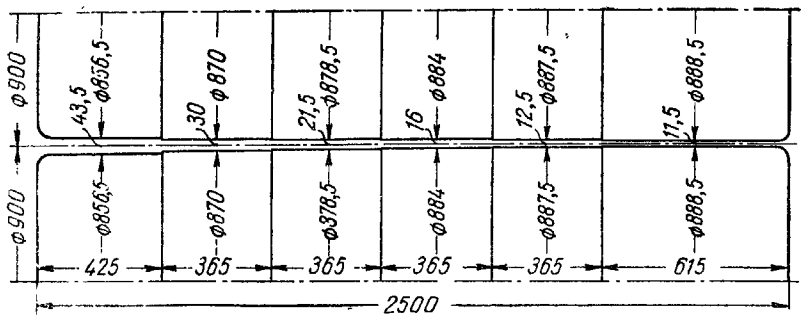


Рис 101 Ступенчатые валки дуо-реверсивного стана 900 для прокатки сутунки шириной от 200 до 250 *мм*

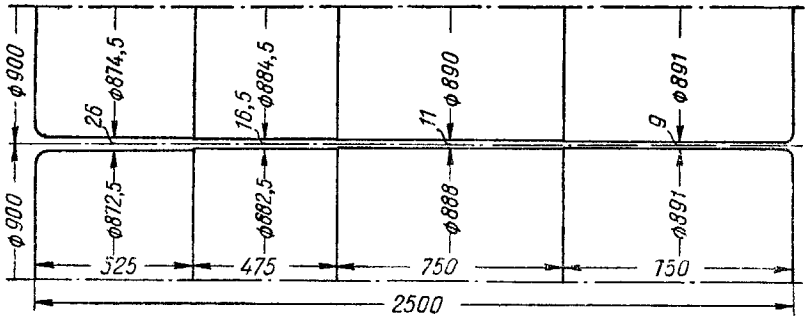


Рис. 102. Ступенчатые валки дуо-реверсивного стана 900 для прокатки сутунки шириной 300 *мм*

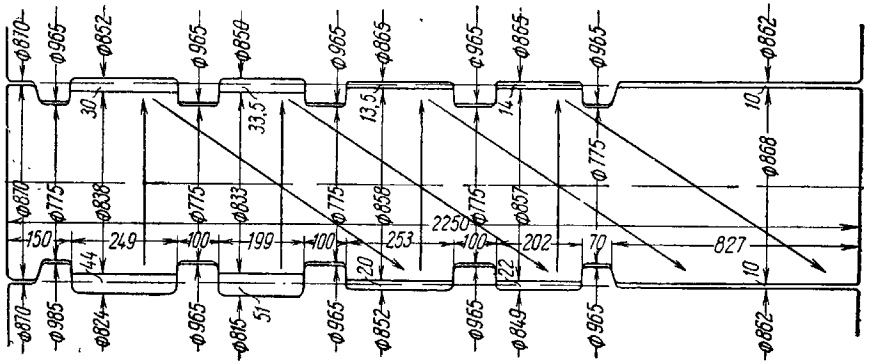


Рис. 103. Чистовые валки для прокатки сутунки шириной 200—250 *мм* на заготовочном стане трио 875

Таблица 29

Схема прокатки заготовки на стане трио

Ширина калибров: 187, 190, 162, 165, 132, 138, 105 *мм*

№ прохода	h *мм*	b *мм*	Δh *мм*	$\frac{\Delta h}{h_0}$ %	Уширение
0	216	184	—	—	—
1	187	187	29	13,4	Ограниченное
2	152 К	190	35	18,7	»
3	149	162	41	21,6	»
4	122 К	165	27	18,1	»
5	127	132	38	23,0	»
6	97 К	138	30	23,6	»
7	98	105	40	29,0	»

Примечание. К — кантовка.

Таблица 30

Схема прокатки заготовки на стане трио

Ширина калибров: 181, 152, 127 и 101 *мм*

№ прохода	h *мм*	b *мм*	Δh *мм*	$\frac{\Delta h}{h_0}$ %	Уширение
0	237	167			
1	178	181	59	24,9	Ограниченное
2	146 К	181	32	18,0	Уширения нет
3	142	152	39	21,6	Ограниченное
4	117 К	152	25	17,6	Уширения нет
5	116	127	36	23,7	Ограниченное
6	90 К	127	26	22,4	Уширения нет
7	98	101	29	22,8	Ограниченное

Примечание. К — кантовка.

производится также прокатка заготовки, представлены на рис. 95 На стане прокатывается сутунка толщиной 10 *мм* и шириной от 200 до 250 *мм*; обжатия колеблются от 26 до 36%. Величина верхнего давления в каждой паре калибров соответствует величине абсолютного обжатия в верхнем ряду калибров, при этом по ходу прокатки оно уменьшается. Расположение калибров в валках трио вытекает из калибровки. Верхний и нижний валок имеют врезы, средний валок — выступы.

Прокатка сутунки на стане трио 750 представлена на рис. 104—108 и в табл. 31 и 32. Направление полосы в валки производится автоматически при помощи проводки, которой оборудована черновая клеть (рис. 109).

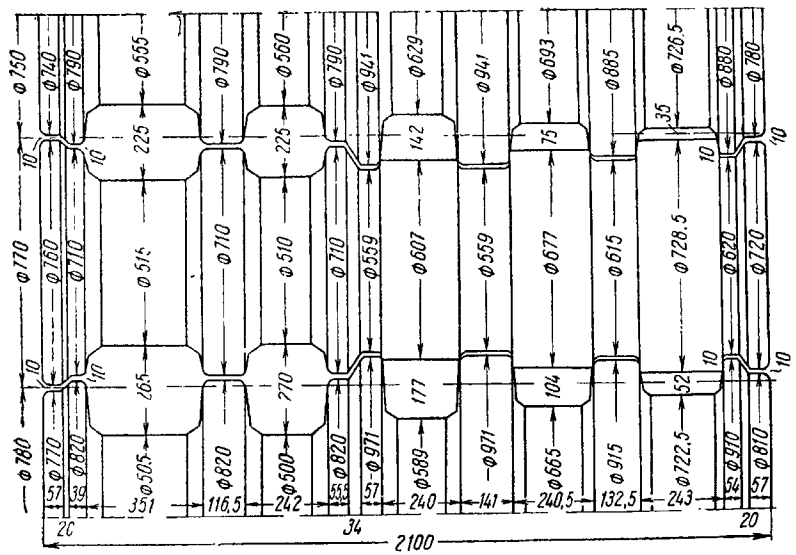


Рис. 104. Черновые валки стана трио 750 для прокатки сутунки шириной 200 *мм*

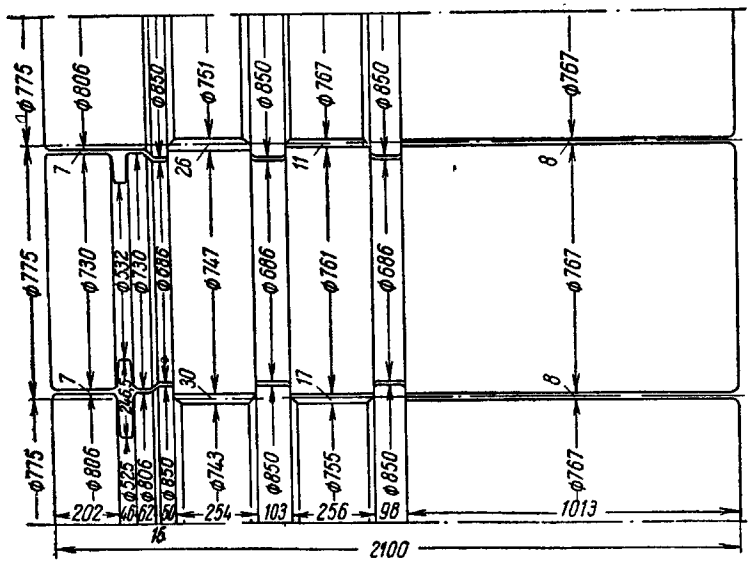


Рис. 105. Чистовые валки стана трио 750 для прокатки сутунки шириной 200 *мм*

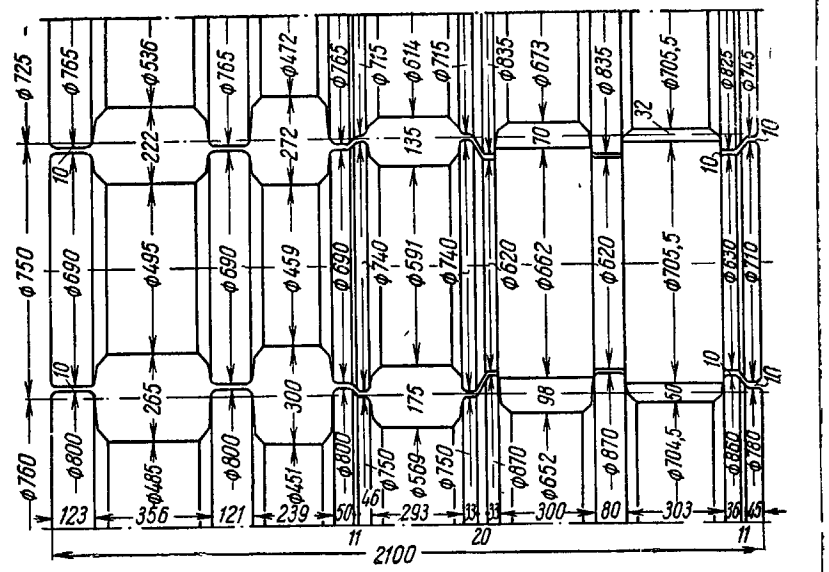


Рис. 106. Черновые валки стана трио 750 для прокатки сутунки шириной 250—300 *мм*

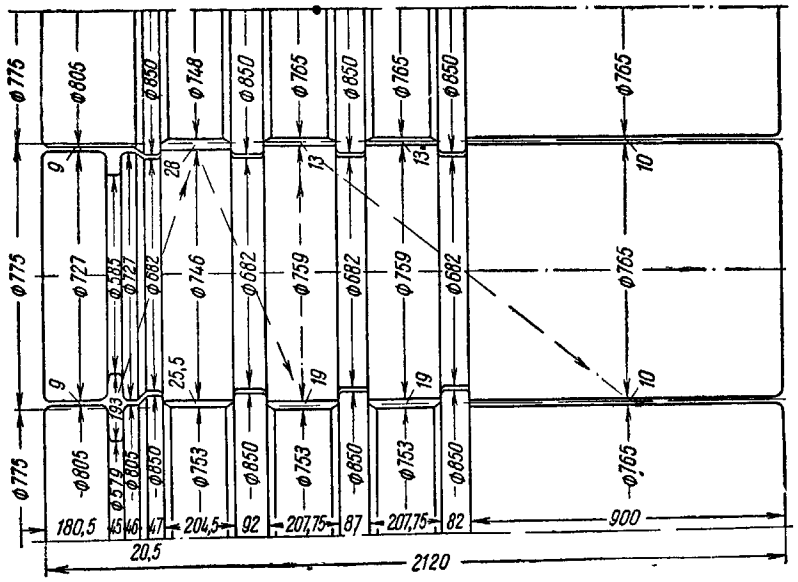


Рис. 107. Чистовые валки стана трио 750 для прокатки сутунки шириной до 250 *мм*

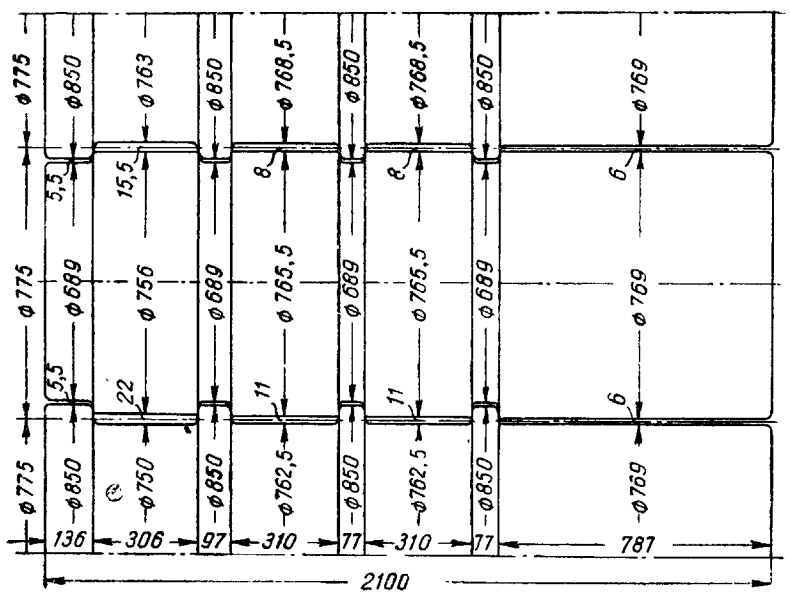


Рис. 108. Чистовые валки стана трио 750 для прокатки сутунки шириной 300 *мм*

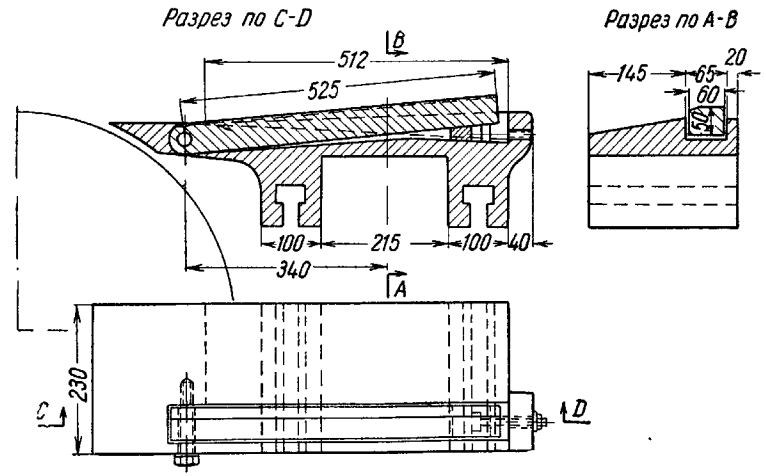


Рис. 109. Нижняя проводка стана трио 750 для сутунки (по Хольцвейлеру)

Таблица 31

Схема прокатки сутунки 200×10 *мм* из блума 170×170 *мм* на стане дуо 900 *мм*

№ прохода	Валки	№ калибра	h *мм*	b *мм*	Δh *мм*	Δb *мм*	$\frac{\Delta h}{h_0}$ %
0			170	170	—	—	—
1	Черновые	Плоский	135	180	35	10	20,5
2	»	»	15	190	30	10	22,2
3	»	»	80 К	198	25	8	23,8
4	»	Ребровой	178 К	85	20	5	10,1
5	»	Плоский	62	186	23	8	27,0
6	Чистовые	»	44	192	18	6	29,0
7	»	»	30,5	196,5	13,5	4,5	30,6
8	»	»	22,0	199	8,5	2,5	28,0
9	»	»	16,5	200,5	5,5	1,5	25,0
10	»	»	13,0	201,5	3,5	1,0	21,2
11	»	»	12,0	202,0	1,0	0,5	7,7

Примечание. К — кантовка.

Черновые калибры с насечкой имеют проводки, изображенные на рис. 110, причем носок проводки, как и следует при прокатке в насеченных валках, не касается дна калибра. На этом стане чистовые калибры оборудованы двумя расположенными одна над другой верхними проводками с передвижными пропусками, что дает возможность выдержать каждую полосу перед чистовым проходом в течение времени, нужного для прокатки, не мешая прокатке в других калибрах. Такое мероприятие позволяет проводить прокатку в последнем проходе при пониженной температуре, исключающей образование окалины после прокатки и получать полосу с хорошей поверхностью.

Схемы прокатки сутунки на станах трио даны в табл. 33 и 34.

Прокатка сутунки на непрерывных станах отличается большими преимуществами, которые заключаются не только в низкой себестоимости, но и в возможности получать сутунку меньшей толщины, что весьма выгодно при дальнейшей прокатке сутунки на листовых станах. На непрерывных сутуночных станах старой конструкции прокатка до сих пор производится в закрытых калибрах. Этот метод заставляет заводы придерживаться прокатки сутунки

Таблица 32

Схема прокатки сутунки 300×10 *мм* из блума 330×235 *мм* на стане дуо 900 *мм*

№ прохода	Валки	№ калибра	h *мм*	b *мм*	Δh *мм*	Δb *мм*	$\frac{\Delta h}{h_0}$ %
0	Черновые	II	235	230			
11	»	Плоский	195	340	40	10	17,0
12	»	»	160 К	350	35	10	18,0
13	»	IV	310	165	40	5	11,4
14	»	IV	280 К	170	30	5	9,7
1	Промежуточные	Плоский	130	290	40	10	23,5
2	»	»	90	300	40	10	30,8
3	»	»	60 К	310	30	10	33,3
4	»	Ребровой	285 К	65	25	5	8,1
5	»	Плоский	42	293	23	8	35,3
6	Чистовые	»	27	298	15	5	35,7
7	»	»	17,5	301	9,5	3	35,2
8	»	»	12,0	302,5	5,5	1,5	31,5
9	»	»	10,0	303	2,0	0,5	16,7

Примечание. К — кантовка.

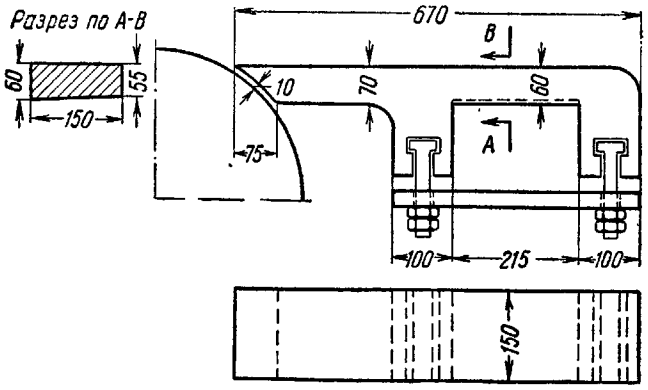


Рис 110. Проводка с насечкой для черновых сутуночных валков (по Хольцвейлеру)

Таблица 33

Схема прокатки сутунки 200×10 *мм* из блума 330×330 *мм* на стане трио 750

№ прохода	Валки	№ калибра	h *мм*	b *мм*	Δh *мм*	Δb *мм*	$\frac{h_0}{h_1}$	$\frac{\Delta h}{h_0}$ %
0	Черновые	—	330	330	—	—	—	—
1	»	I нижний	265	330	65	0	1,25	19,7
2	»	I верхний	225 К	334	40	4	1,18	15,1
3	»	II нижний	270	228	64	3	1,25	19,1
4	»	II верхний	225 К	230	45	2	1,24	16,6
5	»	III нижний	177	232	53	7	1,30	23,0
6	»	III верхний	142	234	35	2	1,25	19,8
7	»	IV нижний	104	236	38	2	1,37	26,7
8	»	IV верхний	75	238	29	2	1,39	27,8
9	»	V нижний	52	240	23	2	1,44	30,6
10	»	V верхний	35 К	244	17	4	1,49	32,6
11	Чистовые	Ребровой	193 К	45	51	10	1,27	21,0
12	»	II верхний	28	197,5	17	1,5	1,61	37,7
13	»	III нижний	19	200	9	2,5	1,47	32,1
14	»	IV верхний	13	201	6	1,0	1,46	31,5
15	»	Плоский	10	202	3	1,0	1,30	23,0

Примечание. К — кантовка.

единообразных размеров, чтобы иметь малый парк валков. Чаще всего ширина проката равна 203 *мм* (8 дюймов).

С увеличением развеса сутунки увеличивается ее толщина. Большим недостатком прокатки сутунки в закрытых калибрах является то, что изменение ширины сутунки заставляет переваливать валки, что влечет за собой повышение простоев.

Получение сутунки любой желаемой ширины без смены валков становится возможным, если вместо калиброванных валков применять валки с гладкой бочкой, для чего боковые кромки сутунки должны быть обработаны по крайней мере двумя парами промежуточных вертикальных валков. Эти валки регулируют ширину сутунки и обеспечивают совместно с подачей на металл воды высокого давления (до 100 *атм*), хорошее удаление окалины.

Чувствительность к натяжению особенно тонких полос требует широкой регулировки скорости привода. В новых непрерывных сутуночных станах индивидуальным приводом оборудуют не только чистовые и черновые клети, но и клети с вертикальными валками и клети с чистовыми валками. На таких станах можно

Таблица 34

Схема прокатки сутунки 300×7 *мм* из блума 330×330 *мм* на стане трио 750

№ прохода	Валки	№ калибра	h *мм*	b *мм*	Δh *мм*	Δb *мм*	$\frac{h_0}{h_1}$	$\frac{\Delta h}{h_0}$ %
0	—	—	330	330	—	—	—	—
1	Черновые	I нижний	265	335	65	5	1,25	19,7
2	»	I верхний	222 К	339	43	4	1,19	16,3
3	»	II нижний	300	225	39	3	1,13	11,5
4	»	II верхний	272 К	228	28	3	1,10	9,3
5	»	III нижний	175	285	53	13	1,13	24,1
6	»	III верхний	135	287	40	2	1,30	22,8
7	»	IV нижний	98	292	37	5	1,38	27,4
8	»	IV верхний	70	294	28	2	1,40	28,5
9	»	V нижний	50	296	20	2	1,40	28,5
10	»	V верхний	33	298	17	2	1,51	34,0
11	Чистовые	I нижний	23	300	10	2	1,43	30,3
12	»	I верхний	16,5	302	6,5	2	1,39	28,2
13	»	II нижний	12	304	4,5	2	1,38	27,2
14	»	III верхний	9	305	3,0	1	1,33	25,0
15	»	Плоский	7	305	2,0	—	1,29	22,2

Примечание. К — кантовка.

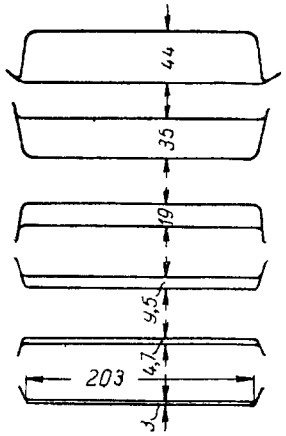


Рис. 111. Калибровка шестиклетьевого непрерывного сутуночного стана с диаметром валков 410 *мм*

прокатывать сутунку любого размера. Устройство для регулировки длины петли исключает натяжение полосы между соседними клетями. Такие современные станы дают высокую производительность и хорошее качество проката.

Калибровка шестиклетьевого сутуночного стана 410 представлена на рис. 111. Калибры являются закрытыми, вертикальных валков на этом стане нет. Для прокатки сутунки различной ширины нужно применять различные комплекты валков. Прокатка производится из заготовки 185 × 70 *мм* на полосу 203 × 10 *мм* в восемь проходов. На рис. 112 представлена калибровка восьмиклетьевого сутуночного стана 800. На этом стане 7 и 8-я клети имеют гладкие валки. Прокатка заготовки 187 × 120 *мм* на полосу 203 × × 10 *мм* производится в восемь проходов при обжатиях 16—34%. Калибровка, изображенная на рис. 113, относится к непрерывному восьмиклетьевому сутуночному стану с диаметром валков 457 *мм*. Оба первых калибра — закрытые. Третий калибр нарезан в вертикальных валках, которыми регулируется ширина прокатываемой полосы. Следующие четыре калибра также являются закрытыми, а две последние клети имеют валки с глад-

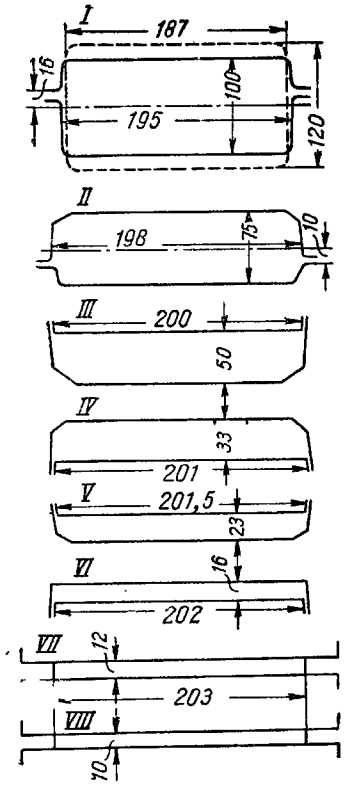


Рис. 112. Калибровка восьмиклетьевого непрерывного сутуночного стана с диаметром валков 600 *мм*

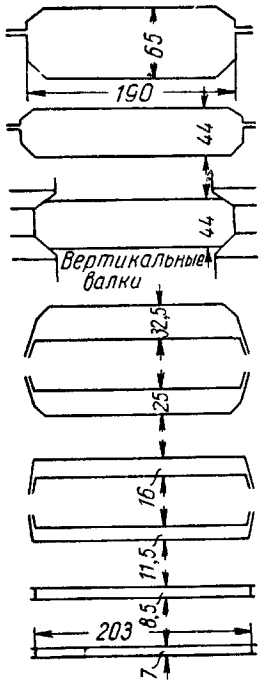


Рис. 113. Калибровка восьмиклетьевого непрерывного сутуночного стана с диаметром валков 457 *мм*

кой бочкой. Прокатка полосы 203 × 7 *мм* производится из заготовки 185 × 114 *мм*. При обжатиях 17,7 — 43,0%.

В непрерывных сутуночных станах новой конструкции на вторых группах закрытые калибры вообще не применяются. Прокатка производится исключительно на гладких бочках при наличии двух или трех клетей с вертикальными валками. На рис. 114 представлена калибровка для сутунки и заготовки на непрерывном стане 600 с горизонтальными валками. Прокатка

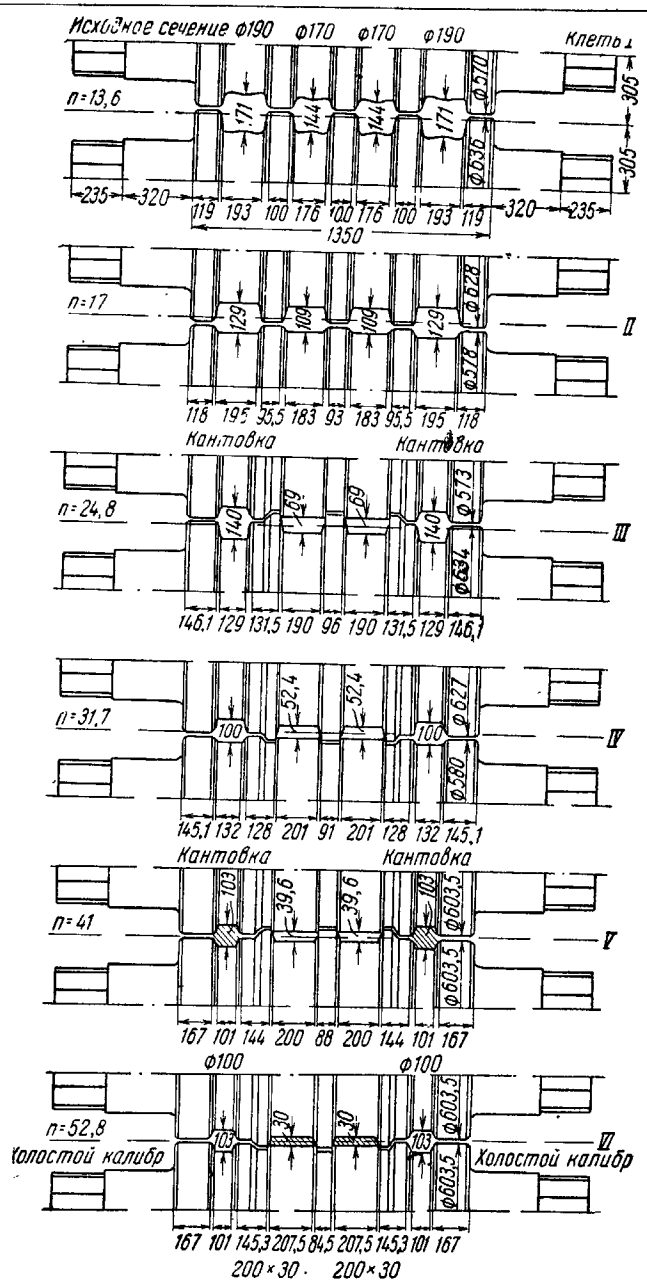


Рис. 114. Калибровка для заготовки и сутунки непрерывного стана диаметром валков 600 *мм* с горизонтальными валками и закрытыми калибрами

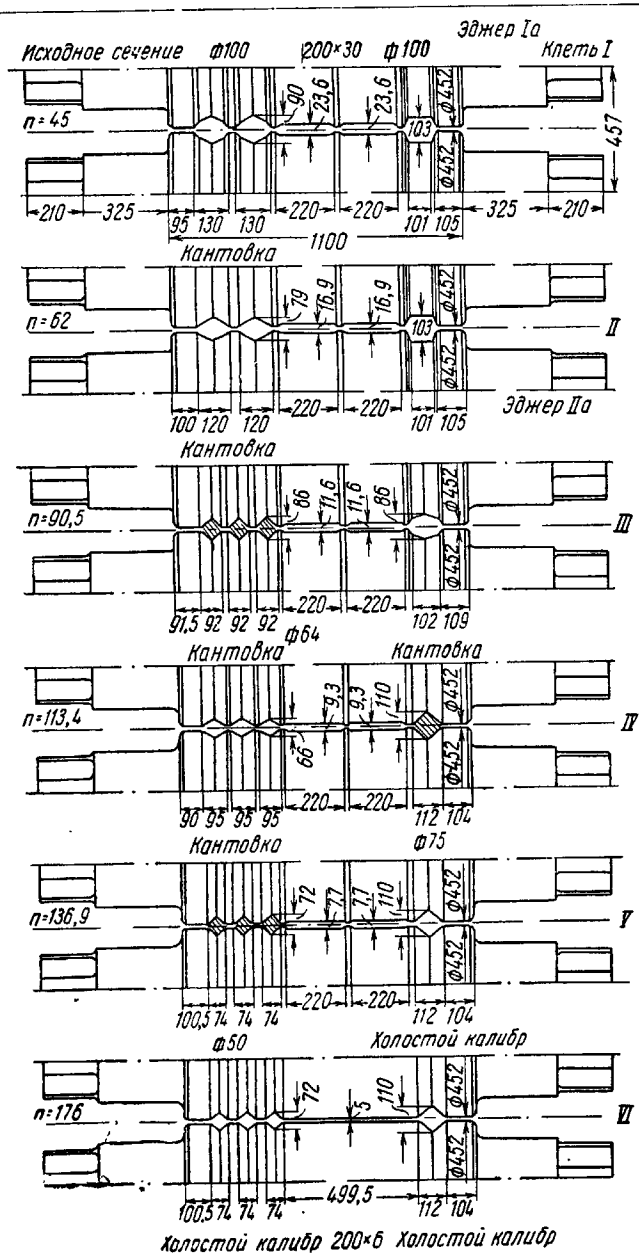


Рис. 115. Калибровка для заготовки и сутунки непрерывного стана с диаметром валков 460 *мм* с горизонтальными и вертикальными валками и открытыми калибрами для сутунки

производится в закрытых калибрах. На рис. 115 представлена калибровка заготовки и сутунки с применением горизонтальных и вертикальных валков и открытых калибров.

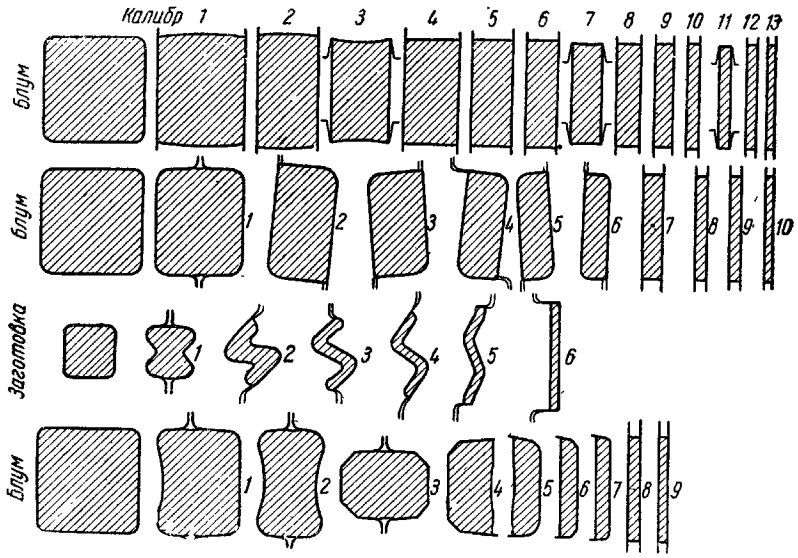


Рис. 116. Различные калибровки для прокатки сутунки, применяемые в Америке (по Р. Бейнону)

На рис. 116 показаны типовые калибровки для прокатки сутунки, применяемые в США.

Глава IV

ПРОКАТКА КВАДРАТНОЙ И КРУГЛОЙ СТАЛИ

1. ПРОКАТКА КВАДРАТНОЙ СТАЛИ

Прокатка квадратной стали без проводок (ручной способ)

Калибровка квадрат-квадрат состоит из ряда квадратных калибров с острыми углами. В табл. 35 приведены величины

Таблица 35

Величина угла при вершине 2 α. Калибровка квадрат — квадрат при ручной прокатке без проводок (по Брово)

Сторона квадрата *мм*	Угол 2 α град. — мин.	$\operatorname{tg}\alpha = \frac{b}{h}$
160—65	90—40	1,0117
65—30	91—00	1,0176
Менее 30	91—20	1,0235

верхнего угла калибра 2α, рекомендуемые Брово. Размеры квадратных калибров определяются по следующим формулам:

$$c_w = 1{,}014 c_k; \quad h = \sqrt{2}\, c_w = 1{,}412 c_w; \quad b = h \operatorname{tg}\alpha;$$

где c_k — сторона квадрата в холодном состоянии;
c_w — сторона квадрата в горячем состоянии.

Для квадратов всех размеров можно применять следующие соотношения:

$$2\alpha = 91°; \quad h = 1{,}40 c_w; \quad b = 1{,}42 c_w.$$

Закругления или развалы калибра (рис. 117), по Кирхбергу, равны

$$r = \frac{h}{2} - \frac{s}{2},$$

где s — игра или «пружина» клети.

Эти закругления расположены на расстоянии $^1/_3\, c_w$. Брово рекомендует величину r брать равной $0{,}35\, c_w$.

М. Хольцвейлер на основании многолетнего опыта утверждает, что калибры, построенные по формулам Кирхберга, дают прокатываемый профиль лучших размеров.

Общепринятый ряд квадратов с острыми углами включает размеры:

При стороне квадрата	от	100	до	160	*мм*	через	10	*мм*
» »	»	95	»	45	»	»	5	»

Вытяжки за проход λ находятся в пределах 1,15—1,20, отсюда $\sqrt{\lambda} = 1{,}07—1{,}10$.

Квадраты промежуточных размеров могут быть получены путем поднятия или опускания валков.

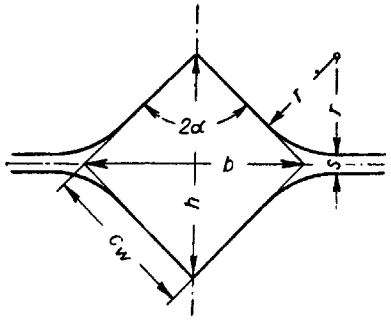


Рис. 117. Развал квадратного калибра при прокатке квадрата без проводок (ручной способ)

При прокатке квадрата ручным способом полоса задается в валки без проводок и удерживается от сворачивания клещами или ключом. Исходная заготовка, получаемая с черновой клети, подается в квадратный калибр, на две ступени больший чистового калибра, причем между проходами происходит кантовка на 90°. В конце прокатки раскат трижды пропускается через чистовой калибр с кантовкой на 90° перед каждым проходом, что необходимо выполнять, поскольку при прокатке квадрата без проводок полоса подается в более узкий калибр. Для того, чтобы дать место металлу, уширяющемуся под действием обжатия, калибру придается «развал». Металл при этом образует выступ вместо заусенца, который при кантовках перемещается вверх и вниз. Вследствие этого обжатие в середине калибра увеличивается, и прокатываемый металл по вертикальной оси обжимается сильнее, чем в местах, расположенных около развала калибра. Эти части сечения увлекаются частями, получающими более сильную деформацию, в результате чего возникает утяжка. Диагональ b и угол грани металла 2α у выходящего из валков раската получаются меньше, чем эти размеры калибра. Поэтому угол 2α в вершине калибра делается несколько больше 90°, а горизонтальная диагональ квадрата несколько больше вертикальной. При этом в последующем калибре середина обжимается еще сильнее, а боковые части еще слабее, и утяжка горизонтальной диагонали усиливается. Эта причина в соединении с сильной деформацией прокатываемого металла в калибре, имеющем остроконечное очертание, приводит к тому, что полоса должна быть задана в более узкий калибр, из-за чего необходимо пропускать полосу в чистовом калибре два, а лучше три раза. Подобная прокатка ведет к тому, что выступы, полученные в предыдущих проходах, закатываются, готовый профиль не имеет выступов, и диагонали его равны по величине. Профиль имеет острые углы, и сечение его достаточно точно приближается к квадрату.

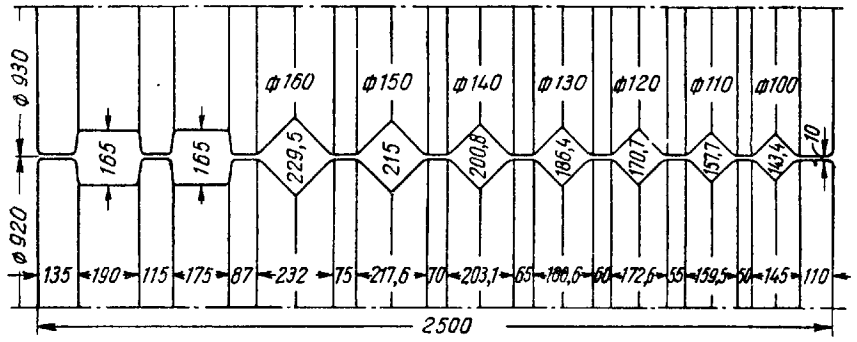


Рис. 118. Чистовые валки клети дуо для прокатки квадрата без проводок для размеров от 100 до 160 *мм*

Прокатка без проводок имеет то преимущество, что чистовой калибр для данного размера является предварительным для следующего, меньшего калибра, что позволяет на одной паре валков разместить большое количество чистовых калибров совместно с предварительными черновыми и прокатывать на одних валках большое количество размеров квадратного профиля. При переходе с одного профиля на другой нет необходимости изменять исходную заготовку. Отдельные проводки так соединены между собою, что возникает так называемый прокатный стол. Вводные проводки вообще могут не применяться. Переход с сорта на сорт также производится без проводок очень просто.

Недостаток этого метода прокатки состоит в необходимости несколько раз пропускать полосу через чистовой калибр, что приводит к значительной потере времени. Вследствие малых обжатий в последних проходах полоса имеет малую устойчивость во время прохода, что заставляет прокатывать полосы небольшой длины. Во время прокатки необходимо держать полосу клещами, что не позволяет увеличить скорость прокатки. Поэтому подобный способ прокатки применяется при получении незначительных количеств проката и проката небольших длин, и то на станах старой конструкции. На рис. 118 изображены валки дуо для

прокатки квадратов 100—160 *мм*, на рис. 119 — валки трио для квадратов 50—95 *мм*. Размеры калибров для квадратов 160—45 *мм* приведены в табл. 36.

Прокатка квадрата из ромба в проводках

Если требуется прокатывать большие количества квадратного профиля точных размеров, прокатку выгоднее проводить из ромба в проводках. При прокатке квадрата размерами меньше 50 *мм*

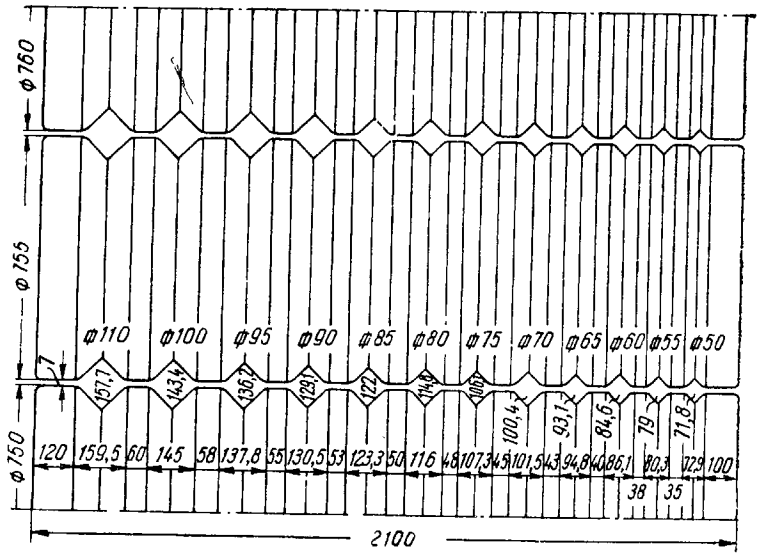


Рис. 119. Чистовые валки клети трио для прокатки квадрата без проводок для размеров от 50 до 95 *мм*

этот метод применяется чаще всего. При этом исходным является черновой (предчистовой) квадрат, который задается в ромбический калибр, носящий название шлихтового калибра или шлихтового ромба. Выходящий из этого калибра раскат задается в чистовой калибр на ребро. Полоса в чистовом калибре поддерживается вводными проводками, препятствующими сваливанию ее. Эти проводки соответствуют ромбическому сечению профиля, выходящего из предчистового калибра.

Преимущество прокатки в проводках заключается в том, что полоса не свертывается в калибре даже при ее большой длине и высокой скорости прокатки.

Такая прокатка позволяет применять большой угол при вершине 2 α, а также работать с большими вытяжками, что увеличивает производительность прокатного стана по сравнению с прокаткой без проводок.

Таблица 36

Размеры калибров (в *мм*) для различных квадратов, при прокатке без проводок; *s* — игра («пружина») валков = 0,01 *D*; *r* — радиус развала (по Хольцвейлеру)

c_k	c_w $(1{,}014\ c_k)$	h $(1{,}414\ c_w)$	b $(1{,}0176\ h)$	r $\left(\frac{h}{2}-\frac{s}{2}\right)$	Диаметр валков
160	162,2	229,5	233,5	110,0	950
150	152,1	215,0	218,7	102,0	950
140	142,0	200,8	204,3	95,0	950
130	131,8	186,4	189,6	88,0	950
120	121,7	172,1	175,1	81,0	950
110	111,5	157,7	160,5	74,0	950
100	101,4	143,7	145,9	67,0	950
95	96,3	136,2	138,5	64,0	750
90	91,3	129,1	131,3	61,0	750
85	86,2	122,0	124,1	58,0	750
80	81,1	114,8	116,8	54,0	750
75	76,1	107,7	109,6	50,0	750
70	71,0	100,4	102,2	47,0	750
65	65,9	93,2	94,8	43,0	750
60	60,8	86,0	87,5	40,0	750
55	55,8	79,0	80,3	36,0	750
50	50,7	71,8	72,9	32,0	750
45	45,6	64,4	65,9	29,0	750

Поскольку при прокатке в проводках применяются большие обжатия, возникает и повышенное уширение, поэтому высота предчистового калибра должна быть соответственно меньше, чем горизонтальная диагональ чистового калибра. Предчистовой и чистовой калибры располагают на отдельных комплектах валков. Валки с предчистовыми калибрами таким образом необходимо установить так, чтобы получить предчистовой ромб надлежащей высоты, т. е. чтобы он хорошо проходил по проводкам и захватывался валками чистовой клети, полностью заполняя чистовой калибр, однако не переполняя его. При этом нет необходимости иметь развалы на чистовом калибре, что необходимо при ручной прокатке без проводок. Отпадает также необходимость пропускать полосу несколько раз через чистовой калибр, что увеличивает производительность стана.

Чистовой калибр протачивается в валках без закруглений, как точный квадрат. Предчистовой калибр имеет вертикальную диагональ на 1—3 *мм* (иногда и более) меньше, чем горизонтальная диагональ чистового калибра. Эта величина равна 1 *мм* при $c = 5$—8 *мм*, 2 *мм* при $c = 8$—20 *мм*, 3 *мм* при $c = 20$—40 *мм*. Нет необходимости точно определять величину уширения, так как

высота калибра регулируется при прокатке подъемом и опусканием верхнего валка. Предчистовой и чистовой калибры располагаются на различных комплектах валков, поэтому их регулировка может быть произведена независимо один от другого. Ширина b предчистового или шлихтовочного калибра зависит от величины уширения в чистовом калибре. Вытяжка в чистовом калибре, определяемая как частное от деления площади предчистового калибра на площадь чистового квадрата, обычно принимается равной 1,14.

Отсюда

$$\frac{b \cdot h}{2c_w^2} = 1{,}14$$

или

$$b = \frac{2 \cdot 1{,}14 c_w^2}{h} = 2{,}28 \frac{c_w^2}{h} = \frac{c_w^2}{c_w - \Delta b}.$$

Величина угла при вершине для предчистового ромба 2α увеличивается по мере уменьшения стороны прокатываемого квадрата. Значения применяемых углов приведены в табл. 37.

Таблица 37

Угол при вершине 2α (шлихтовочного) чистового ромба при прокатке квадрата из ромба в проводках

Длина стороны квадрата *мм*	Угол при вершине град.
5—13	112
14—26	108
27—32	105
Более 32	102

Отношение ширины ромба к его высоте также увеличивается с уменьшением размеров квадрата — ромб становиться более остроугольным. Такой вытянутый ромб лучше удерживается в проводках и сопротивляется сворачиванию и его можно подвергать большим обжатиям, так как он медленнее остывает, что особенно ценно для проката малых размеров.

Вытяжка между предчистовым квадратом и шлихтовальным ромбом принимается равной 1,28. Таким образом, общая вытяжка в предчистовом и чистовом квадратах равна 1,28. 1,14 = 1,46. Отсюда сторона предчистового квадрата равна $\sqrt{1{,}46}\ c_w = 1{,}21\ c_w\ (\backsim 1{,}2 c_w)$.

Чистовой и предчистовой калибры нарезают в валках остроугольными. Калибры должны быть размещены на бочке валков таким образом, чтобы против крайних калибров можно было беспрепятственно установить коробку с проводками. Это же обстоятельство требует того, чтобы бурты между калибрами были также достаточно широкими.

Формулы и таблицы для расчета размеров чистового калибра, предчистового ромба и предчистового квадрата разработаны

Брово [3], Кирхбергом [4], и Жезом [6]. Хорошие практические результаты дает применение формул, выведенных Далем для квадратов размером от 5 до 40 *мм* (табл. 38). В табл. 39 приведены размеры калибров, вычисленные по этим формулам для квадратного профиля некоторых размеров.

Таблица 38

Формулы для вычисления размеров калибров при прокатке квадратного профиля размерами от 5 до 40 *мм*

1.	Чистовой калибр	$c_w = 1{,}015\ c_k$
2.	Шлихтовой ромбический калибр	$b = 1{,}63\ c_k + 3{,}4$ *мм*, $h = 1{,}38\ c_k - 1{,}6$ *мм*
3.	Первый черновой квадратный калибр	$s_1 = 1{,}16\ c_k + 0{,}6$ *мм* $b = 1{,}42\ s_1$; $h = 1{,}41\ s_1$ $2\alpha = 91°$; $r = 0{,}1\ s_1$
4а.	Вытяжной ромбический калибр	$b = 2{,}0\ s_1 + 3{,}5$ *мм* $= 2{,}32\ c_k + 4{,}7$ *мм* $h = 1{,}27\ s_1 - 1$ *мм* $= 1{,}47\ c_k - 0{,}25$ *мм* $r = 0{,}1\ s_1$
5а.	Второй черновой квадратный калибр	$s_{II} = 1{,}34\ s_1 + 0{,}5$ *мм* $= 1{,}55\ c_k + 1{,}305$ *мм* $r = 0{,}2\ s_{II}$; $h = b = 1{,}414\ s_{II}$
4б.	Вытяжной овальный калибр	$b = 2{,}4\ s_1 = 2{,}79\ c_k + 1{,}44$ *мм* $h = 0{,}85\ s_1 = 0{,}985\ c_k + 0{,}51$ *мм* $R = 1{,}95\ s_1 = 2{,}26\ c_k + 1{,}17$ *мм*
5б.	Второй черновой квадратный калибр	$s_{II} = 1{,}46\ s_1 - 1{,}5$ *мм* $= 1{,}695\ c_k - 1{,}25$ *мм* $r = 0{,}2\ s_{II}$ $h = b = 1{,}414\ s_{II}$

2. ПРОКАТКА КРУГЛОЙ СТАЛИ

Прокатка круглой стали без проводок (ручной способ)

Круглые профили, прокатываемые без проводок так же, как было описано выше в случае прокатки квадрата без проводок, составляют ряд размеров с интервалом для диаметров от 200 до 130 *мм* через 10 *мм*, для диаметров от 125 до 85 *мм* — 5 *мм*, для диаметров 84—55 *мм* — 3 *мм* и для диаметров ниже 55 *мм* — 2 *мм*. Интервал между размерами круглой стали целесообразно принимать несколько меньшим, чем для квадратной, так как форма круглого калибра при изменении взаимного расположения валков в вертикальной плоскости несколько искажается.

Таблица 39

Размеры калибров (в *мм*) при прокатке квадратной стали (5—35 *мм*)

а) Прокатка с вытяжным ромбом

Сторона квадрата	1. Чистовой калибр		2. Шлихтов. ромб		3. Предчистовой квадрат			4а. Вытяжной ромб			5а. Второй квадрат		
	c_w	$h=b$	h	b	s_I	$h=b$	r	h	b	r	s_{II}	$h=b$	r
6	6,09	8,61	6,68	13,18	7,56	10,69	0,76	8,60	18,62	0,76	10,61	15,00	2,12
10	10,15	14,35	12,2	19,70	12,2	17,25	1,22	14.45	27,9	1,22	16,80	23,80	3,36
15	15,23	21,34	19,1	27,85	18,0	25,45	1,80	21,80	39,5	1,80	24,56	34,73	4,91
20	20,30	28,70	26,0	36,00	23,8	33,65	2,38	29,15	51,1	2,38	32,31	45,79	6,46
25	25,38	35,89	32,9	44,15	29,6	41,85	2,96	36,50	62,7	2,96	40,06	56,64	8,01
30	30,45	43,06	39,8	52,30	35,4	50,06	3,54	43,85	74,3	3,54	47,81	67,60	9,56
35	35,53	50,24	46,7	60,45	41,2	58,26	4,12	51,20	85,9	4,12	55,56	78,56	11,11

б) Прокатка с вытяжным овалом

Сторона квадрата	1. Чистовой калибр		2. Шлихтовальный ромб		3. Предчистовой квадрат			4б. Вытяжной овал			5б. Второй квадрат		
	c_w	$h=b$	h	b	s_I	$h=b$	r	h	b	R	s_{II}	$h=b$	r
6	6,09	8,61	6,68	13,18	7,56	10,69	0,76	6,42	18,14	14,73	9,53	13,5	2,06
10	10,15	14,35	12,2	19,70	12,2	17,25	1,22	10,36	29,34	23,77	16,30	23,1	3,36
15	15,23	21,34	19,1	27,85	18,0	25,45	1,80	15,29	43,29	35,07	23,80	33,7	5,06
20	20,30	28,70	26,0	36,00	23,8	33,65	2,38	20,21	57,24	46,37	33,28	47,3	6,76
25	25,38	35,89	32,9	44,15	29,6	41,85	2,96	25,14	71,19	57,67	41,70	59,2	8,45
30	30,45	43,06	39,8	52,30	35,4	50,06	3,54	30,06	85,14	68,97	48,70	67,2	10,16
35	35,53	50,24	46,7	60,45	41,2	58,26	4,12	35,02	99,09	80,27	58,65	83,3	11,84

Прокатка круглой стали аналогична прокатке квадратной стали. Исходным служит получаемый в черновых клетях круглый профиль, на два интервала больший, чем выходящий из чистового калибра. Для прокатки круглой стали целесообразно применять стрельчатые калибры; они имеют закругленную форму, что облегчает получение конечного профиля круглого сечения (рис. 120). После первого калибра металл подается в последующие с кантовкой на 90° после каждого прохода, а в чистовой калибр задается два или три раза также с кантовкой после каждого прохода. Чтобы избежать образования заусенца в чистовом калибре, калибры для круга имеют развалы, в которые перемещается металл под влиянием уширения (рис. 121).

Многократная прокатка в чистовом калибре необходима для того, чтобы сгладить получающиеся при прокатке выступы и получить правильный круглый профиль.

Поскольку в последних проходах обжатие возникает только за счет сглаживания выступа, а выступ от прохода к проходу уменьшается, то в последних проходах обжатие очень невелико. При этом профиль имеет большую возможность сворачиваться, чем при прокатке квадрата, так как уменьшается тормозящее

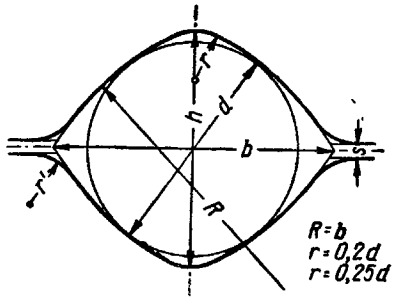


Рис. 120. Предчистовой стрельчатый калибр для прокатки круглого профиля без проводок

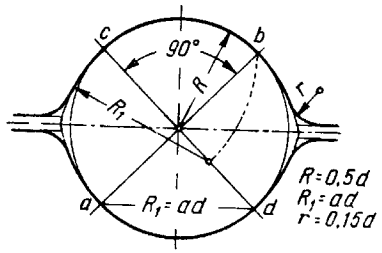


Рис. 121. Круглый калибр для прокатки без проводок

действие наклонных боковых граней калибра. Закругленные очертания калибра не могут оказать сопротивления скручивающему действию круглого калибра, и поэтому раскат нужно поддерживать при прокатке клещами, предохраняя его от сворачивания. Для этого в зависимости от диаметра прокатываемого круга необходимо от двух до четырех вальцовщиков, которые должны следовать за движущимся металлом, что определяет низкую скорость прокатки. Во избежание скручивания полосы ее длина не должна превышать 8—10 *м*. Отсюда прокатка круглой стали без проводок отличается малой производительностью, и она применяется исключительно при прокатке малых партий металла или специальных сталей и с каждым годом вытесняется прокаткой в проводках. Весьма прочные стали, например, быстрорежущие, при диаметре прутка свыше 60 *мм* не могут быть прокатаны с применением проводок, так как большие обжатия, применяемые в таких калибровках, вызывают появление трещин. Ручную прокатку без проводок лучше всего производить на стане дуо с зафиксированным верхним валком и нижним валком, имеющим возможность регулировки в боковом направлении при верхнем давлении порядка 5 *мм*. По Крамеру [50] круглую сталь можно прокатывать также на стане трио. При этом следует работать с закрепленным средним валком и регулируемым верхним и нижним валками. Диаметр верхнего валка должен быть на 3 *мм*, а нижнего—на 5 *мм* меньше среднего.

Прокатка круга из овала в проводках

При прокатке круга из овала с применением проводок исходным является квадрат, который задается в овальный калибр. Раскат овального сечения кантуется на ребро и задается в этом положении в чистовой калибр, причем от сваливания металл удерживается проводками.

Чистовой калибр имеет точную форму круга, диаметр которого с учетом температурной усадки равен 1,013 от диаметра круга в холодном состоянии (d_k). Некоторые калибровщики рекомендуют для кругов меньше 30 *мм* чистые калибры изготовлять с развалом под углом 45°. Такое мероприятие предупреждает образование заусенца при незначительном переполнении калибра металлом.

Овал, предшествующий чистовому калибру (шлихтовочный овал), имеет для круглых профилей диаметром от 30 до 200 *мм* следующие размеры:

$$h = d_к - 4\ мм;\ b = 1{,}18\ d_к + 10\ мм;\ R = \frac{h^2 + b^2}{4h}$$

Высота овала, установленного на ребро, больше, чем диаметр чистового круга, но ширина его меньше, что дает возможность для уширения при обжатии. Согласно приведенным выше условиям величина уширения для всех размеров от 30 до 200 *мм* берется одинаковой и равна 4 *мм*. Однако при этом предполагается, что высота точно определяется при установке валков в зависимости от условий прокатки. При прокатке круга, так же как при прокатке квадрата, чистовой и предчистовой калибры должны настраиваться независимо друг от друга, а поэтому их следует размещать на различных комплектах валков.

В табл. 40 приведено отношение толщины овала к диаметру чистового калибра по Тринксу [51], согласно этим данным получается, что чем меньше диаметр круга, том более плоским должен быть овал. Это означает, что при прокатке круга малых размеров лучшей задачи металла в калибр можно достигнуть теми же методами, как и при прокатке квадрата в проводках.

Таблица 40

Отношение высоты овала h к диаметру чистового калибра d_k для круга различных размеров

$d_к$, *мм*	50	38	25	12	6
$h : d_к$	0,87	0,86	0,85	0,80	0,65

Размеры квадрата, задаваемого в шлихтовой овал приведены в табл. 41. Для получения точного круглого профиля необходимо иметь исходный квадрат с равными диагоналями и хорошо закругленными углами. Формулы дают хорошие результаты для всех диаметров. Данные для различных диаметров круга приводятся в табл. 42 и 43.

Таблица 41

Размеры квадрата, задаваемого в чистовой овал

Диаметр готового профиля $d_к$, *мм*	Сторона квадрата задаваемого в чистовой овал s_1, *мм*
200—140	$1{,}06\ d_к + 4$
130—100	$1{,}05\ d_к + 4$
95— 70	$1{,}04\ d_к + 4$
68— 30	$1{,}03\ d_к + 4$

Кирхберг рекомендует применять вытяжку λ при прокатке шлихтового овала в чистовом круге равную 1,14. Тринкс рекомендует принимать вытяжки в чистовом калибре от 1,05 до 1,18, причем величина λ принимается тем большей, чем меньше сечение профиля, что выполняется для того, чтобы уменьшить остывание прокатываемого металла. Жез принимает вытяжку предчистового квадрата в шлихтовом овале равной 1,36. Общая вытяжка от предчистового квадрата до чистового круга получается при этом равной $\lambda = 1{,}14 \cdot 1{,}36 = 1{,}55$. Отсюда

$$s_1^2 = \frac{1{,}55\,\pi\, d_w^2}{4}\ ;\ s_1 = 1{,}1 d_w.$$

Эта формула дает приближенные значения, пригодные для примерных вычислений. Точные данные можно получить из табл. 42 и 43.

Очертание шлихтового овала для круга диаметром до 80 *мм* показано на рис. 122, *а*, а для круга диаметром свыше 80 *мм* — на рис. 122, *б*.

Для кругов больших диаметров целесообразно вместо квадратного калибра применять стрельчатый, который при следующем проходе дает раскат такого сечения, который лучше совмещается с овалом, чем квадрат, очерченный прямыми линиями (рис. 123). Применение стрельчатого калибра вместо квадратного уменьшает износ овального калибра, а также облегчает работу вальцовщиков при кантовании, что важно для больших профилей. Во многих случаях становятся ненужными специальные кантовальные устройства. Поэтому квадраты для круга диаметром свыше 120 *мм* зачастую прокатываются в ящич-

Таблица 42

Размеры калибров (в *мм*) при прокатке в проводках круга диаметром 30—68 *мм*

Круг		Овал			Квадрат			
d_k	$d_w = 1{,}013\, d_k$	$h = d_k - 4$	$b = 1{,}18\, d_k + 10$	$R = \frac{h^2 + b^2}{4h}$	$s = 1{,}03\, d_k + 4$	$h_1 = 1{,}414\, s$	$b_1 = 1{,}425\, s + 3$	$r = 0{,}2\, d_k + 5$
30	30,4	26,0	45,5	26,4	35,0	49,5	53,0	9,0
31	31,4	27,0	47,0	27,2	36,0	51,0	54,5	9,0
32	32,4	28,0	48,0	27,6	37,0	52,5	56,0	9,5
33	33,4	29,0	49,0	27,9	38,0	54,0	57,5	9,5
34	34,4	30,0	50,0	28,3	39,0	55,0	58,5	10,0
35	35,5	31,0	51,5	29,1	40,0	56,5	60,0	10,0
36	36,5	32,0	52,5	29,6	41,0	58,0	61,5	10,0
37	37,5	33,0	53,5	30,0	42,0	59,5	63,0	10,5
38	38,5	34,0	55,0	30,8	43,0	61,0	64,5	10,5
39	39,5	35,0	56,0	31,1	44,0	62,5	66,0	11,0
40	40,5	36,0	57,0	31,6	45,0	63,5	67,0	11,0
41	41,5	37,0	58,5	32,4	46,0	65,0	68,5	11,0
42	42,5	38,0	59,5	32,8	47,5	67,0	70,5	11,5
43	43,6	39,0	61,0	33,6	48,5	68,5	72,0	11,5
44	44,6	40,0	62,0	34,0	49,5	70,0	73,5	12,0
45	45,6	41,0	63,0	34,4	50,5	71,5	75,0	12,0
46	46,6	42,0	64,5	35,2	51,5	73,0	76,5	12,0
47	47,6	43,0	65,5	35,7	52,5	74,5	78,0	12,5
48	48,6	44,0	66,5	36,2	53,5	76,0	79,5	12,5
49	49,6	45,0	68,0	37,0	54,5	77,0	80,5	13,0
50	50,6	46,0	69,0	37,4	55,5	78,5	82,0	13,0
51	51,7	47,0	70,5	38,2	56,5	80,0	83,5	13,5
52	52,7	48,0	71,5	38,6	57,5	81,5	85,0	13,5
53	53,7	49,0	72,5	39,0	58,5	83,0	86,5	13,5
54	54,7	50,0	74,0	39,9	59,5	84,5	88,0	14,0
55	55,7	51,0	75,0	40,4	60,5	85,5	89,5	14,0
58	58,8	54,0	78,5	42,1	64,0	90,5	94,0	14,5
60	60,8	56,0	81,0	43,3	66,0	93,5	97,0	15,0
63	63,8	59,0	84,5	45,0	69,0	97,5	101,5	15,5
65	65,8	61,0	87,0	46,3	71,0	100,5	104,0	16,0
68	68,9	64,0	90,5	48,0	74,0	105,0	108,5	16,5

ных калибрах (рис. 124). На рис. 125 изображены черновые валки стана трио 750 для прокатки кругов диаметром 60—120 *мм*.

На рис. 126 показаны чистовые валки стана дуо 900 для прокатки кругов диаметром 170—220 *мм*.

Если прокатка круглых профилей производится на стане трио, то сильная деформация квадрата в шлихтовом овале несколько уменьшается, если под чистовыми овальными калибрами расположить черновые овальные калибры. Последние либо построены с таким же радиусом, что и чистовые овалы, но увеличивается

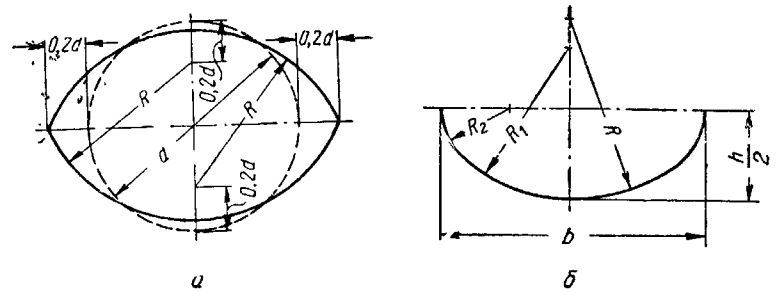


Рис. 122. Построение чистового овала:
а — для круга диаметром до 80 *мм*; *б* — для круга диаметром более 80 *мм*: $b = 1{,}288\ d$; $h/2 = 0{,}465\ d$; $R = d - 1$; $R_1 = 0{,}74\ d$; $R_2 = 0{,}38\ d$; где d — диаметр конечного круга

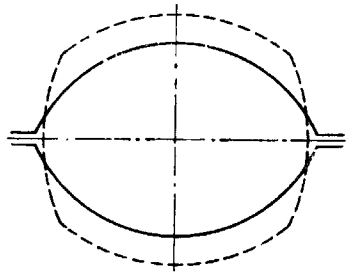


Рис. 123. Положение профиля в чистовом овале (после прокатки в стрельчатом калибре)

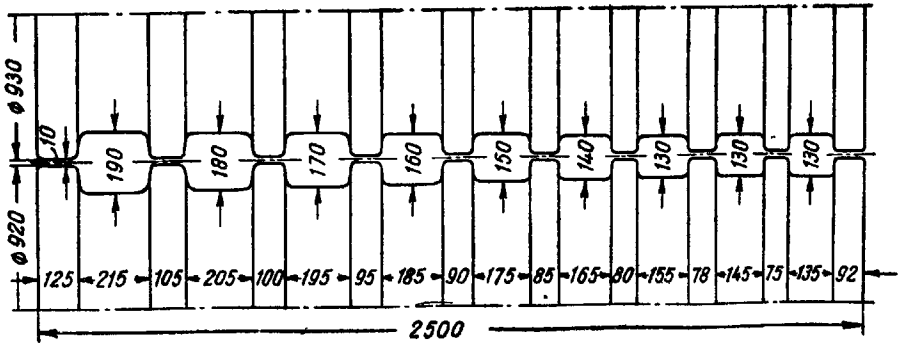


Рис. 124. Предчистовые валки стана дуо для прокатки круга диаметром 125—200 *мм*

Таблица 43

Размеры калибров (в *мм*) при прокатке в проводках круга диаметром 70—200 *мм*

Круг		Овал			Квадрат			
d_k	$d_w = 1{,}013 \cdot d_k$	$h = d_k - 4$	$b = 1{,}18 \cdot d_k + 10$	$R = \frac{h^2+b^2}{4h}$	$s = 1{,}04 d_k + 4$	$h_1 = 1{,}414 \cdot s$	$b_1 = 1{,}425 s$	$r = 0{,}2 d_k + 3$
70	70,9	66,0	92,5	49,0	77,0	108,5	112,5	17,0
73	74,0	69,0	96,0	50,7	80,0	113,0	117,0	17,5
75	76,0	71,0	98,5	51,9	82,0	116,0	120,0	18,0
78	79,0	74,0	102,0	53,7	85,0	120,0	124,0	18,5
80	81,0	76,0	104,5	55,0	87,0	123,0	127,0	19,0
83	84,1	79,0	108,0	56,7	89,5	126,5	130,5	19,5
85	86,1	81,0	110,5	58,0	92,5	130,5	134,5	20,0
90	91,2	86,0	116,0	60,6	98,0	138,5	142,5	21,0
95	96,2	91,0	122,0	63,8	103,0	145,5	150,0	22,0
					$s = 1{,}05 \cdot d_k + 4$			
100	101,3	96,0	128,0	66,7	109,0	154,0	158,5	23,0
105	106,4	101,0	134,0	69,4	114,0	162,0	165,5	24,0
110	111,4	106,0	140,0	72,7	119,5	169,0	173,0	25,0
115	116,5	111,0	146,0	75,6	125,0	176,5	181,0	26,0
120	121,6	116,0	152,0	78,7	130,0	183,5	188,0	27,0
125	126,6	121,0	157,5	81,5	135,0	191,0	195,5	28,0
130	131,7	126,0	163,5	84,5	140,5	198,5	203,0	29,0
					$s = 1{,}06 \cdot d_k + 4$	Ящичный калибр		
140	141,8	136,0	175,0	90,2	152	—	—	31,0
150	152,0	146,0	187,0	96,4	163	—	—	33,0
160	162,1	156,0	199,0	102,3	174	—	—	35,0
170	172,2	166,0	211,0	108,2	184	—	—	37,0
180	182,3	176,0	222,0	114,0	194,5	—	—	39,0
190	192,5	186,0	234,0	120,0	205,0	—	—	41,0
200	202,6	196,0	246,0	126,0	216,0	—	—	43,0

высота овала, либо калибр в нижнем валке очерчивается по другому радиусу (рис. 127). Квадратная полоса проходит прежде черновой овал, что уменьшает обжатие в чистовом (шлихтовом) овале. Этот прием применяется главным образом для прочных сталей и для мягких сталей при диаметре кругов свыше 150 *мм*.

Ввиду того что при изменении расстояния между валками чистовой калибр теряет свою круглую форму, для каждого прокатываемого размера профиля должен быть отдельный чистовой калибр. Для овального калибра в этом нет необходимости, так как, изменяя настройку валков, можно из одного овального калибра получить овал для круга двух-трех различных диаметров,

причем для определения ширины овального калибра в формулу подставляется больший диаметр, а в формулу для определения высоты толщины h — меньший диаметр из числа тех кругов, ко-

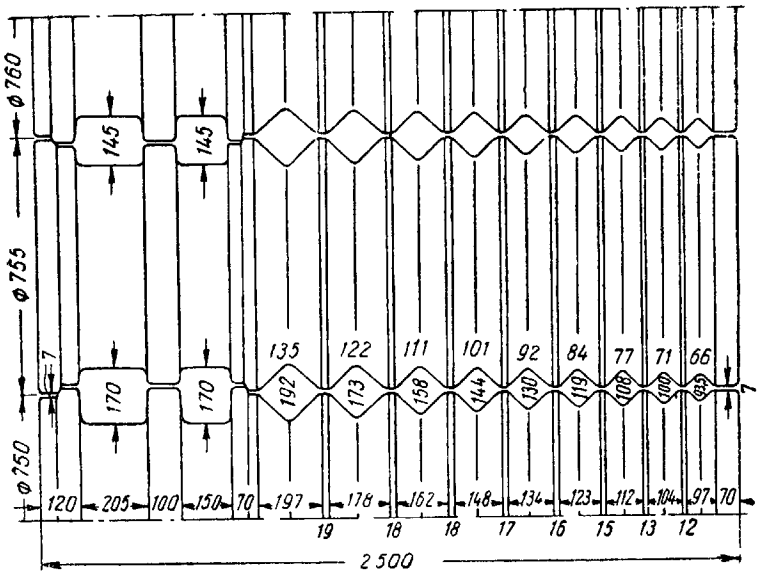


Рис. 125. Предчистовые валки клети трио для прокатки круга диаметром 60—120 *мм*

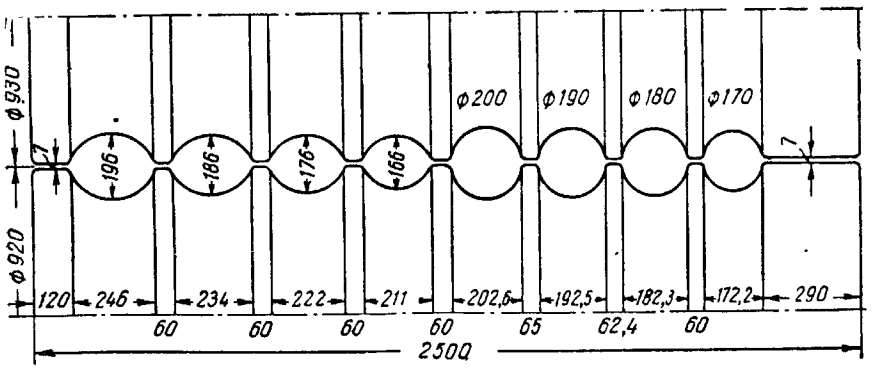


Рис. 126. Чистовые валки клети дуо для прокатки круга диаметром 170—200 *мм*

торые предполагают прокатать из данного овала. Возможность применения квадратных и стрельчатых калибров для различных овалов еще шире, что позволяет более целесообразно использовать бочку валков.

При размещении калибров на бочке валка следует стараться, чтобы крайние калибры не находились слишком близко к краю валка, с тем чтобы обеспечить надлежащую ширину крайних буртов и установку проводок для указанных калибров.

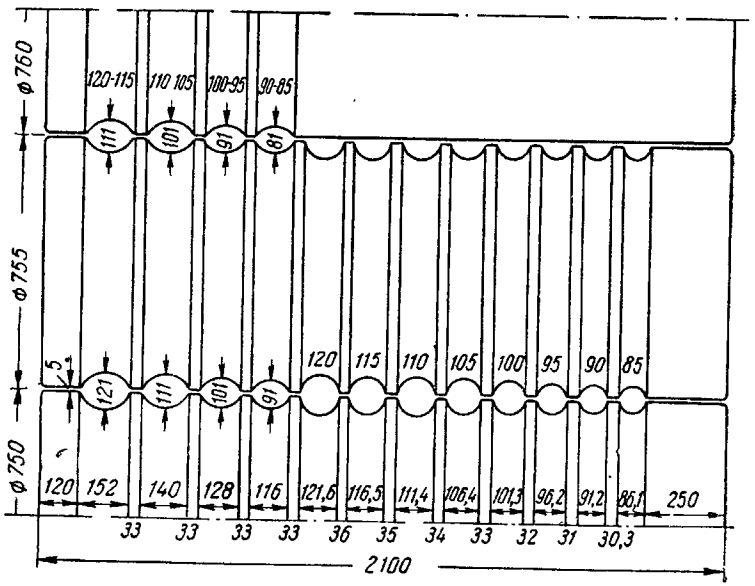


Рис. 127. Чистовые валки клети трио для прокатки круга диаметром 90—120 *мм*

Для малых профилей, имеющих диаметр менее 40 *мм*, приведенные выше формулы дают неточные данные. Рекомендуется для расчета пользоваться данными, приведенными в табл. 44. В табл. 45 показаны размеры калибров при диаметре круга от 6 до 35 *мм*.

3. СКРУЧИВАНИЕ ПОЛОСЫ ПРИ ПРОКАТКЕ СОРТОВОГО МЕТАЛЛА

При прокатке полос круглого, квадратного, шестигранного и восьмигранного сечения иногда наблюдается сваливание (скручивание) их. Это явление возникает чаще всего по следующим причинам:

1) дефекты калибровки;
2) неправильная установка валков;
3) неправильная установка вводных проводок;
4) неправильная установка выводных проводок;
5) отклонения валков от горизонтального положения вследствие неправильной установки или неравномерного износа подшипников или вкладышей.

Таблица 44

Формулы для вычисления размеров калибров (в *мм*) при прокатке круглого профиля диаметром 5—40 *мм*
(см. также табл. 38)

1.	Чистовой круглый калибр	$d_w = 1{,}015\ d_k$
2.	Чистовой (шлихтовой) овал	$h = 0{,}92\ d_k - 1{,}2$ *мм* $b = 1{,}46\ d_k + 1{,}8$ *мм* $R = 0{,}77\ d_k + 2{,}5$ *мм*
3.	Первый (чистовой) квадрат	$s_I = 1{,}14\ d_k - 0{,}6$ *мм*. Угол при вершине 91° $b = 1{,}42\ s_I$; $h = 1{,}41\ s_I$ $r = 0{,}1\ s_I$
4.	Вытяжной ромбический калибр	$h = 1{,}27\ s_I - 1{,}0$ *мм* $= 1{,}45\ d_k - 1{,}76$ *мм* $b = 2{,}0\ s_I + 3{,}5$ *мм* $= 2{,}28\ d_k + 2{,}3$ *мм* $a = 1{,}06\ s_I = 1{,}21\ d_k - 0{,}69$ *мм* $c = 1{,}2\ s_I + 1{,}0$ *мм* $= 1{,}37\ d_k + 0{,}28$ *мм* $r = 0{,}1\ s_I$
5а.	Второй (предчистовой) квадрат	$s_{II} = 1{,}34\ s_I + 0{,}5$ *мм* $= 1{,}53\ d_k - 0{,}3$ *мм* $r = 0{,}2\ s_{II}$; $h = b = 1{,}44\ s_{II}$
4б.	Вытяжной овал	$h = 0{,}85\ s_I = 0{,}97\ d_k - 0{,}51$ *мм* $b = 2{,}4\ s_I = 2{,}74\ d_k - 1{,}44$ *мм* $R = 1{,}95\ s_I = 2{,}22\ d_k - 1{,}17$ *мм*
5б.	Второй (предчистовой) квадрат	$s_{II} = 1{,}46\ s_I - 1{,}5$ *мм* $= 1{,}67\ d_k - 1{,}9$ *мм* $r = 0{,}2\ s_{II}$ $h = b = 1{,}414\ s_{II}$

Вследствие различных воздействий полоса может скручиваться в различном направлении. При этом принято говорить, что полосу крутит или сваливает вправо или влево (если смотреть по направлению прокатки). Скручивание распознается путем сравнения «плечей», за которые принимаются два диаметра круга, расположенные приблизительно под углом 30° к линии разъема валков (рис. 128).

Если, например, правое плечо больше левого и полосу крутит влево, то это происходит вследствие сдвига валков, как пока-

Таблица 45

Примеры расчета размеров калибров (в *мм*) при прокатке круга диаметром 6—35 *мм*

а) с вытяжным ромбом

Диаметр, $d_к$	I круг d_w	2 Чистовой овал			3 Чистовой квадрат			4а Вытяжной ромб			5а Предчистовой квадрат		
		h	b	R	s_I	$h=b$	r	h	b	r	s_{II}	$h=b$	r
6	6,09	4,32	10,56	7,12	6,24	8,82	0,62	6,94	15,98	1,39	8,88	12,56	1,78
10	10,15	8,00	16,4	10,20	10,8	15,3	1,08	12,74	25,10	2,53	15,00	21,20	3,00
15	15,23	12,6	23,7	14,05	16,5	23,3	1,65	19,99	36,50	4,00	22,65	32,03	4,53
20	20,30	17,2	31,0	17,90	22,2	31,4	2,22	27,24	47,90	5,45	30,30	42,84	6,06
25	25,38	21,8	38,3	21,75	28,5	40,3	2,85	34,47	59,30	6,89	37,45	53,56	7,59
30	30,45	26,4	45,6	25,60	33,6	47,5	3,36	41,74	70,70	8,35	45,60	64,48	9,12
35	35,53	31,0	52,9	29,40	39,3	55,6	3,93	48,99	82,10	9,80	53,25	75,30	10,65

б) с вытяжным овалом

Диаметр, $d_к$	I круг d_w	2 Чистовой овал			3 Чистовой квадрат			4б Вытяжной овал			Предчистовой квадрат		
		h	b	R	s_I	$h=b$	r	h	b	R	s_{II}	$h=b$	r
6	6,09	4,32	10,56	7,12	6,24	8,82	0,62	5,31	15,0	12,15	8,12	11,48	1,62
10	10,15	8,00	16,4	10,20	10,8	15,3	1,03	9,20	25,96	21,00	14,80	20,90	2,96
15	15,23	12,60	23,7	14,05	16,5	23,3	1,65	14,04	39,66	32,13	23,15	32,13	4,63
20	20,30	17,2	31,0	17,90	22,2	31,4	2,22	18,89	53,36	43,23	31,50	44,54	6,30
25	25,38	21,8	38,3	21,75	28,5	40,3	2,85	23,74	67,06	54,33	39,85	56,34	7,97
30	30,45	26,4	45,6	25,60	33,6	47,5	3,36	28,59	80,76	65,43	48,20	68,15	9,64
35	35,53	31,0	52,4	29,40	39,3	55,6	3,93	33,44	94,46	76,53	56,55	79,96	11,31

зано на рис. 129. Более сильное давление на левую верхнюю и правую нижнюю четверти окружности являются причиной скручивания полосы влево (рис. 129). Для устранения разности плечей нужно сдвинуть верхний валок влево или нижний вправо. Этим устраняется причина скручивания полосы, т. е. более сильное давление на левую верхнюю и правую нижнюю четверти окружности калибра. Скручивание полосы при этом прекращается, так как давление равномерно распределяется по сечению калибра. На рис. 130 показаны проводки для овала.

Если правое плечо оказывается больше, чем левое, но полосу крутит вправо, то разница размеров плеч должна быть устранена при помощи передвижения верхнего валка влево или нижнего вправо. Если при этом скручивание вправо не исчезает или даже

усиливается, то причина неравномерного распределения давления по окружности калибра является другой, а именно — неправильная установка проводковой коробки, которая должна быть передвинута влево. Однако в этом случае лучше поднять

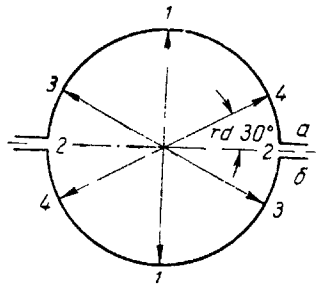


Рис. 128. Схема измерения размеров прокатанного круглого профиля:

а — верхний валок, *б* — нижний валок; *1—1* высота; *2—2* — ширина; *3—3* — левое плечо, *4—4* — правое плечо

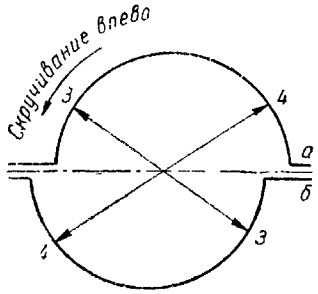


Рис. 129. Правое плечо толще левого, возникает скручивание влево. Для устранения его следует подать верхний валок влево или нижний валок вправо:

а — верхний валок, *б* — нижний валок

левый пропуск, что можно сделать, подложив под него подкладку из листа. При этом целесообразно также опустить правый пропуск (рис. 131).

Как видно из рис. 131, при этом большая ось овала получает наклон влево, что равносильно передвижению проводковой ко-

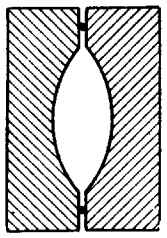


Рис. 130. Проводки для овала

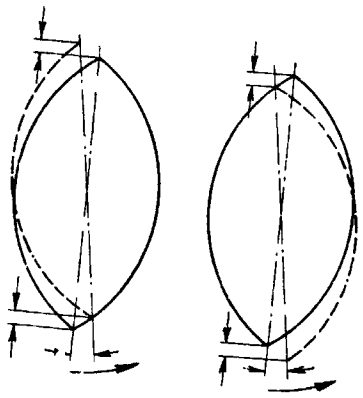


Рис. 131. Наклон продольной оси овала влево путем поднятия левого овального пропуска или опускания правого

робки влево. При этом с помощью подкладок различной толщины может быть достигнута более тонкая регулировка. Придавая оси овала уклон влево можно увеличить давление на левое плечо, что увеличивает силы, стремящиеся скрутить полосу влево, и устраняет скручивание вправо. Когда левое плечо толще, чем правое, следует поступать наоборот.

Перекошенный овал ведет себя так же, как правильный овал в косоустановленных проводках. Путем соответствующей установки проводок можно из перекошенного овала получить точный круг. При этом все же следует принять меры к получению точного овала, так как прокатка из перекошенного овала может повести к появлению закатов и поверхностных пороков. Вообще не следует допускать работы на неправильных и неточных промежуточных сечениях. Более подробно этот вопрос разработан Седлачеком [52] и Крамером [50].

При прокатке квадрата в подобных случаях принимаются аналогичные меры. При этом более целесообразно не регулировать положение проводок, а правильно устанавливать валки с ромбическим калибром из-за большей простоты этого мероприятия. Так же, как при прокатке круга, причиной скручивания полосы является неравномерное распределение давления по периметру раската. Если эта неравномерность устранена, скручивание прекращается. Когда квадрат имеет одинаковые плечи, но его скручивает вправо, то это значит, что давление на правое плечо является более сильным, чем на левое. Поэтому в предчистовом ромбе нужно уменьшить правое плечо, для чего валки с ромбическим калибром следует сдвинуть вправо.

Такое положение относится только к тому случаю, когда овал или ромб, выходящий из калибра, не сжаты или растянуты. Если полоса, выходящая из чистового калибра, растянута, то это означает, что пропуски или верхний валок ромбического калибра оказывают обратное действие, поэтому в последнем случае верхний валок ромбического калибра следует подавать не вправо, а влево.

Ниже приведены различные дефекты, встречающиеся при прокатке квадратного и круглого профилей, и мероприятия для их устранения.

4. ТОЧНАЯ ПРОКАТКА КРУГЛОЙ И КВАДРАТНОЙ СТАЛИ

Требования потребителей к точности сортового проката с каждым годом возрастают, так как эти профили в основном подвергаются дальнейшей обработке в станках-автоматах, производительная работа которых основана на обработке металла с малыми допусками.

Допуски на прокат в Германии определяются стандартами DIN, 1013 и 1014, которыми установлены допустимые отклонения

Дефект	Мероприятие для его устранения
Прокатка круга	
1. Правое плечо больше:	
а) полосу крутит влево	Подать верхний валок влево
б) полосу крутит вправо	Подать верхний валок влево и поднять левый пропуск вверх
2. Левое плечо больше:	
а) полосу крутит вправо	Подать верхний валок вправо
б) полосу крутит влево	Подать верхний валок вправо и поднять правый пропуск или опустить левый
3. Плечи одинаковы по величине:	
а) полосу крутит вправо	Подать верхний валок с овальным калибром вправо
б) полосу крутит влево (возможно только при перекошенном овале)	Подать верхний валок овального калибра влево
Прокатка квадрата	
1. Правое плечо больше:	
а) полосу крутит влево	Подать верхний валок с квадратным калибром влево
б) полосу крутит вправо	Подать верхний валок с квадратным калибром влево, верхний валок с ромбическим—вправо
2. Левое плечо больше:	
а) полосу крутит вправо	Подать верхний валок с квадратным калибром вправо
б) полосу крутит влево	Подать верхний валок с квадратным калибром вправо, верхний валок с ромбическим—влево
3. Плечи одинаковы по величине:	
а) полосу крутит вправо	Подать верхний валок с ромбическим калибром вправо
б) полосу крутит влево	Подать верхний валок с ромбическим калибром влево

по толщине для горячекатаной круглой и квадратной стали. К стали для гаек и болтов предъявляются повышенные требования.

По сообщению Стюартсона [53] в США для горячекатаной стали диаметром от 8 до 50 *мм* допуск составляет ±0,5% по размерам и 1% по отклонению от круглой формы.

Соблюдение заданного размера зависит от разнообразных условий прокатки. Особенное значение имеют следующие условия:

1) равномерность температуры по сечению и длине прокатываемой полосы;

2) условия деформации, зависящие от диаметра валков, скорости вращения валков и калибровки;

3) конструкция стана и обслуживание его;

4) состояние арматуры стана, в особенности проводок.

Температура прокатываемого металла изменяется во время прокатки. При самом тщательном нагреве она не остается равномерной, так как передний конец раската всегда будет деформироваться при более высокой температуре, чем задний. Хорошо известно, что металл с пониженной температурой оказывает бо́льшее сопротивление деформации, чем более горячий. В первом случае повышается давление на валки, а следовательно, изгиб валков и упругая деформация деталей рабочей клети. Поэтому площадь поперечного сечения заднего конца раската будет больше, чем переднего. Влияние этого фактора на точность прокатки может быть уменьшено путем увеличения скорости прокатки, и в частности, в непрерывных станах оно очень невелико. По сообщению Нолля [54], для увеличения точности прокатки может быть применено автоматически регулируемое нажимное устройство, которое в процессе прокатки реагирует на увеличение упругой деформации стана [1] Влияние различных систем калибровки будет описано ниже.

Были сделаны также попытки увеличить точность прокатки путем соответствующего оборудования чистового калибра.

В упоминавшемся выше докладе Стюартсона [53] приводится описание новой системы построения чистового калибра при прокатке круга.

На американских прокатных станах для точной прокатки круга применяется метод построения чистового калибра, названный «трехразмерным». Сначала круглый калибр протачивают на номинальный горячий размер, затем вторым большим резцом протачивают края примерно на 30% глубины калибра. Наконец, при помощи меньшего резца, который примерно соответствует размеру холодного профиля, снимают столько металла со дна калибра, чтобы обеспечить хороший переход к средней дуге круга. Этот

[1] Подробное устройство разработано А. П. Чекмаревым и И. Т. Жердевым. См. А. П. Чекмарев. Точная прокатка. Гостехиздат УССР. 1952 (*Прим перев*).

метод калибровки позволяет избегнуть перенапряжения на плечах калибра, причем по всему сечению профиль имеет точную форму круга. Другой метод заключается в установке непосредственно за чистовым калибром небольшой клети с вертикальными валками (рис. 132) из легированной стали, вращающихся в текстолитовых вкладышах с водяной смазкой. Регулировка этих валков производится при помощи установочных болтов, опирающихся на станины клети.

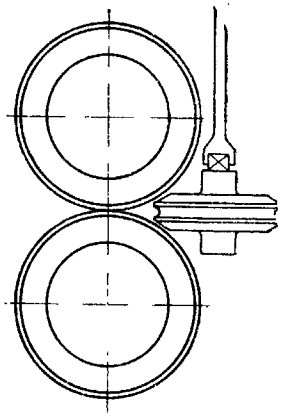


Рис. 132. Приспособление для точной прокатки, устанавливаемое за чистовой клетью сортового стана

Высокая точность прокатываемого профиля может быть достигнута только при правильной конструкции и квалифицированном обслуживании прокатного стана. Следует отметить новые конструкции шведских прокатных станов, обеспечивающих высокую точность прокатки [55]. Хорошо зарекомендовал себя метод работы, при котором валки собирают и подготовляют предварительно в особых кассетах или сменных клетях совместно с подушками и подшипниками. Валки сменяют в отдельной мастерской, и вальцовщики не загружаются этой работой. Для установки валков по высоте и в боковом направлении производится передвижение кассеты или клети целиком. Напряженная конструкция станин, разработанных в Швеции, сводит упругую деформацию деталей клети к минимуму. Размеры валков имеют тенденцию к уменьшению; стараются применять небольшие по длине и диаметру валки, особенно в чистовых клетях, что уменьшает изменение положения и формы валков. Привод валков осуществляется с помощью прецизионных муфт и универсальных шпинделей.

В части валковой арматуры наибольшее значение для работы и получения точного проката имеют вводные и выводные проводки. В настоящее время повсеместно наблюдается переход на роликовые проводки. На рис. 133 изображена роликовая проводка шведской конструкции. В коробке установлены два пропуска, прикрепленные к плоским пружинам и снабженные на концах роликами, вращающимися в шарикоподшипниках. Подрессоренные таким образом ролики обеспечивают хорошее направление металла в валки без царапин, которые обычно возникают на поверхности проката при его прохождении в проводках. Если коробка охлаждается водой под давлением, а подшипники роликов регулярно смазываются, роликовые проводки служат очень долго, и ролики выдерживают до 10 переточек.

5. ТИПЫ СОРТОВЫХ И ПРОВОЛОЧНЫХ СТАНОВ

Большая часть прокатных станов, прокатывающих круглые и квадратные профили, имеет диаметр валков от 250 до 380 *мм* в зависимости от размеров прокатываемого металла. Эти станы

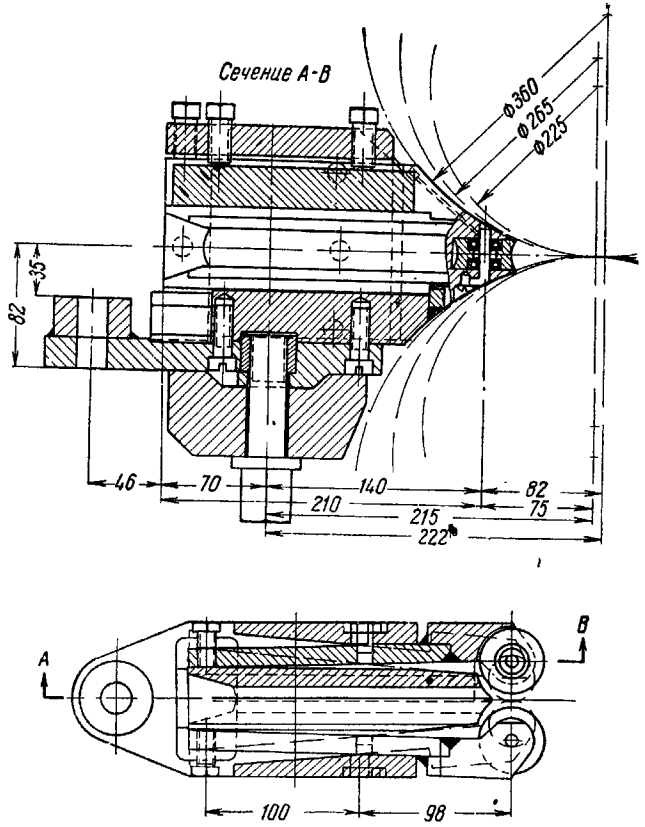


Рис. 133. Роликовые проводки сортового стана

обычно относят к классу мелкосортных и строят самых различных типов и конструкций. Так, применяют клети дуо, трио, доппельдуо, которые располагают в одну или несколько линий или последовательно группами (специальные и полунепрерывные станы). Клети разделяются на черновые, промежуточные и чистовые линии или группы и имеют групповой или индивидуальный привод.

Линейный прокатный стан, изображенный на рис. 134, состоит из двухклетьевой черновой линии 550 и семиклетьевой чистовой линии 330. На стане прокатывают преимущественно простые профили. Исходным профилем является заготовка квадрат 130 *мм* весом 240 *кг*, которая в первой клети черновой линии прокатывается в 7 проходов до квадрата 55 *мм*, после чего разрезается на части или обрезается на ножницах. Во второй клети черновой линии полоса совершает еще три прохода, и полученный квадрат 32 *мм* передается на чистовую линию. На рис. 135 изображен прокатный стан, состоящий из трех линий: трехклетьевой черновой линии 460, трехклетьевой промежуточной линии 325 и чистовой линии 280. Этот стан имеет бо́льшую производительность, чем предыдущий, так как наличие промежуточной линии позволяет снабжать чистовую линию более разнообразным набором исходных квадратов. Сортамент стана включает круг 6—25 *мм*, квадрат 6—22 *мм*, полосу шириной 20—40 *мм*, оконный профиль, полукруг, шестигранник, угловое железо 15—35 *мм* и другие мелкие профили. Прокатка производится из заготовки квадрат 100 *мм* весом 195 *кг*. На рис. 136 показана схема полунепрерывного сортового стана. Аналогичный стан изображен на рис. 137. Он состоит из непрерывной черновой линии из 4 клетей диаметром валков 350 *мм*. Стан прокатывает круглую сталь диаметром 9,5—25 *мм* из заготовок различного сечения. При прокатке круга диаметром 25 *мм* исходной является квадратная заготовка 63 *мм*, при прокатке круга диаметром 9,5—12,5 *мм* — квадратная заготовка 38 *мм*. Следует отметить, что чистовые линии полностью оборудованы обводками; овал в квадратный калибр передается также при помощи обводок. Производительность стана составляет (для круга диаметром 19 *мм*) 900 *т* за 24 часа. На рис. 138 представлен непрерывный сортовой стан. Клети этого стана имеют индивидуальный привод от электродвигателей с широким диапазоном регулировки, что дает возможность, в зависимости от прокатываемого профиля, устанавливать для каждого прохода оптимальную величину обжатия и скорости прокатки. Диа-

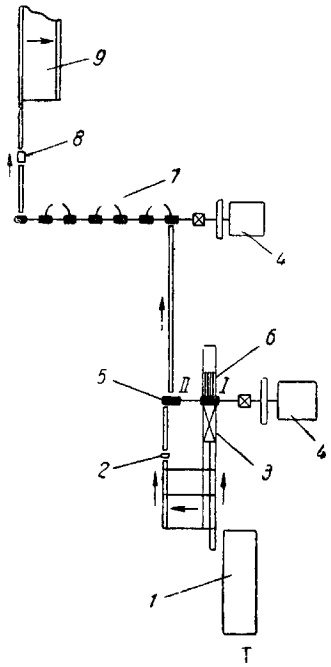


Рис. 134. Мелкосортный стан

1 — печь; *2* — ножницы для квадрата 80 *мм*; *3* — качающийся стол; *4* — становой двигатель; *5* — черновая клеть трио 550; *6* — кантователь; *7* — чистовая линия 330; *8* — ножницы; *9* — механизированный холодильник

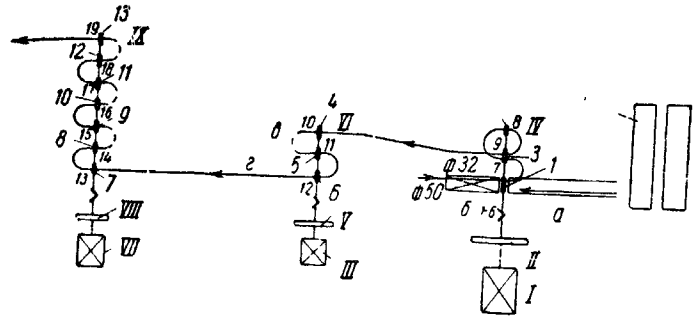


Рис. 135. Прокатный стан для прокатки полосовой стали малого сечения и мелких профилей:

I — двигатель 750 *квт*, 75/150 об/мин, $v = 1{,}8—3{,}6$ *м/сек*; *II* — маховик 5 *м*, 40 *т*; *III* — двигатель 600 *квт*, 160/320 об/мин, $v = 2{,}7—5{,}7$ *м/сек*; *IV* — линия 460, длина бочки 1100, 900, 600 *мм*, *V* — маховик 4 *м*, 20 *т*; *VI* — линия 325, длина бочки 900 *мм*; *VII* — двигатель 1300 *квт*, 260/540 об/мин, $v = 3{,}8—7{,}6$ *м/сек*; *VIII* — маховик 3 *м*, 10 *т*; *IX* — линия 260/300, длина бочки 800, *а* — исходный профиль 100 × 100 × 2500 *мм*; вес 195 *кг*; *б* — проходы 1—6; *в* — овал для квадрата 14 *мм*; *г* — овал для квадрата 10 *мм*

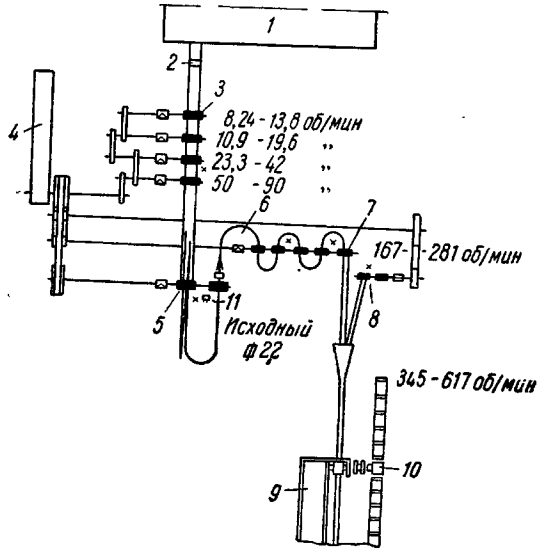


Рис 136. Полунепрерывный сортовой стан:

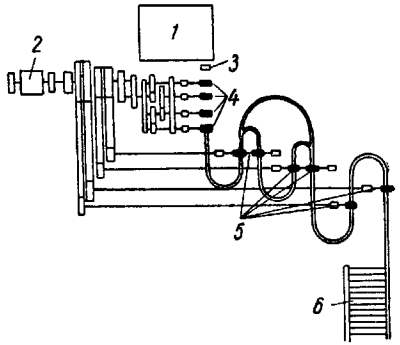
1 — печь; *2* — ножницы; *3* — четыре клети дуо диаметром 325 *мм*, длиной бочки 508 *мм*; *4* — паровая машина 1320 *квт*; 50/90 об/мин; *5* — промежуточная линия, две клети трио диаметром 407 *мм*, $L = 812$ *мм*; *6* — автоматические проводки для овала; *7* — первая чистовая линия, 5 клетей диаметром 304 *мм*, $L = 508$ *мм*; *8* — вторая чистовая линия, две клети диаметром 203 *мм*, $L = 305$ *мм*; *9* — холодильник; *10* — летучие ножницы; *11* — ножницы для скрапа; *x* — место вальцовщика

метр валков равен 305 *мм*. В сортамент стана входят круг диаметром 12—45 *мм* и соответственные по сечению квадраты, полосы и фасонные профили.

Потребность в катанке диаметром 5—12 *мм*, предназначенной для дальнейшего волочения, настолько велика, что для прокатки этого профиля устанавливают специальные проволочные станы. Если же потребность в прокате невелика, то катанку и сорт про-

Рис. 137. Полунепрерывный мелкосортный стан с четырьмя ступенчато расположенными чистовыми линиями:

1 — нагревательная печь Моргана, *2* — становой двигатель 1100 *квт*; *3* — ножницы; *4* — непрерывная группа из 4 клетей с диаметром валков 350 *мм*; *5* — петлевая группа из 6 клетей с диаметром валков 250 *мм*; *6* — холодильник длиной 125 *м*



катывают на одном и том же стане. На рис. 139 изображен подобный стан; в частности в Швеции их установлено несколько. Стан прокатывает средний, мелкий сорт и катанку. Он состоит из трех линий: линии трио с валками диаметром 500 *мм*, линии трио с валками диаметром 360 *мм* и трех отдельных линий клетей дуо. На линии 500 прокатываются круги диаметром 20—100 *мм* и соответствующие им сечения, а также исходные квадраты для двух остальных линий. На линии 360 прокатываются круг 10—30 *мм* и соответствующие квадратные, плоские и фасонные профили, а также исходные квадраты для проволочной группы линий.

Собственно проволочные станы строят двух различных типов: бывают линейные и непрерывные с последовательным расположением клетей.

В станах линейного типа полоса образует петли, причем квадраты из клети в клеть передаются при помощи автоматических обводок, а овалы — вручную. В непрерывных станах полоса проходит сквозь стан без помощи вальцовщиков, в подавляющем большинстве случаев прямолинейно. В станах линейного типа металл в валки повторно задают вручную; в непрерывном стане требуется только время от времени регулировка и устранение задержек. На линейных станах скорость прокатки ограничивается квалификацией персонала и не превышает 10 *м/сек* для катанки диаметром 5—8 *мм*. Скорость непрерывных станов достигает 20—25 *м/сек* и выше [1].

[1] В настоящее время известны станы, работающие со скоростью 32,5 *м/сек* (*Прим перев.*).

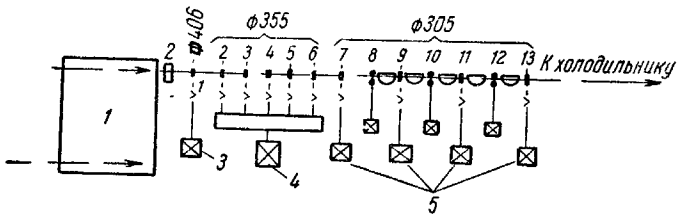


Рис. 138. Непрерывный мелкосортный стан:

1 — нагревательная печь; *2* — ножницы; *3* — становой двигатель 515 *квт*; 130—320 об/мин; *4* — двигатель 1470 *квт*, 315 — 500 об/мин, *5* — двигатель 515 *квт*, 310—620 об/мин

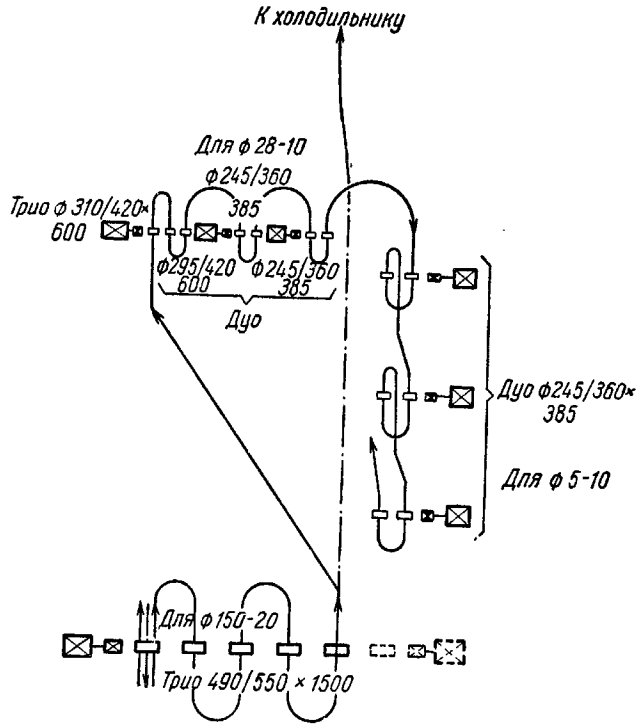


Рис. 139. Шведский мелкосортный и проволочный стан

Вследствие того, что между соседними клетями линейного стана в процессе прокатки образуются петли, степень обжатия в отдельных клетях не зависит от степени обжатия в других. Все клети могут быть расположены в одну линию и иметь одинаковое число оборотов. Для уменьшения длины петель предусматривается устройство нескольких линий с различной скоростью вращения валков. Иначе обстоит дело на непрерывных станах с групповым приводом.

До недавнего времени, а частично и в настоящее время образование петель между соседними клетями не допускалось за редкими исключениями. Поэтому коэффициенты обжатия в одних клетях были связаны с коэффициентами обжатия в соседних клетях. Во избежание неполадок из-за запутывания металла между клетями работали с натяжением металла, которое может создать небольшую добавочную утяжку катанки, допустимую, если нет высоких требований к точности размеров получаемого профиля. На современных непрерывных проволочных станах прокатка примерно до квадрата 12 *мм* производится с образованием петель, которые не должны быть такими большими, как на линейных станах петлевого типа. Петли могут быть образованы в вертикальной или в горизонтальной плоскостях. Точное управление длиной петель производится за счет регулировки числа оборотов электродвигателей клетей и облегчается достаточно большим расстоянием между клетями. Вследствие этого в непрерывных станах все время наблюдается тенденция к переходу с группового привода на индивидуальный и к замене групп с малым расстоянием между клетями отдельно стоящими клетями.

Одно из основных отличий между станами обоих описанных типов состоит в числе одновременно прокатываемых ниток. В чистовой клети линейного петлевого стана число ниток достигает семи. В непрерывных станах в чистовой клети число одновременно прокатываемых ниток не превышает двух и в исключительных случаях трех, так как управление натяжением или петлями при большой скорости прокатки для большего числа ниток становится весьма затруднительным. Поэтому теоретическая производительность петлевого проволочного стана составляет $7 \times 9 = 63$ *м/сек*, а непрерывного $2 \times 20 = 40$ *м/сек* *.

Вследствие образования петель между клетями задний конец прокатываемой полосы более длительное время проходит через стан, чем передний. Длина петель бывает наибольшей перед чистовым калибром. Температура металла перед последним проходом имеет значение не только для сохранения одинаковых размеров прокатываемого профиля; она определяет механические свойства, структуру и способность к деформации готовой катанки.

* При скорости непрерывного стана 32,5 *м/сек* и прокатке в две нитки его теоретическая производительность будет равна 65 *м/сек* (*Прим. ред.*).

Для уменьшения вредного влияния этого фактора на станах линейного типа принуждены уменьшать длину прокатываемой штуки, а следовательно, снижать вес мотка. Для прочных, в том числе легированных сталей вес мотка равен примерно 75 *кг*, для мягких — 90 *кг*. На напрерывных станах имеется другое положение. Исследования В. Асбека [55] показали, что температура конца

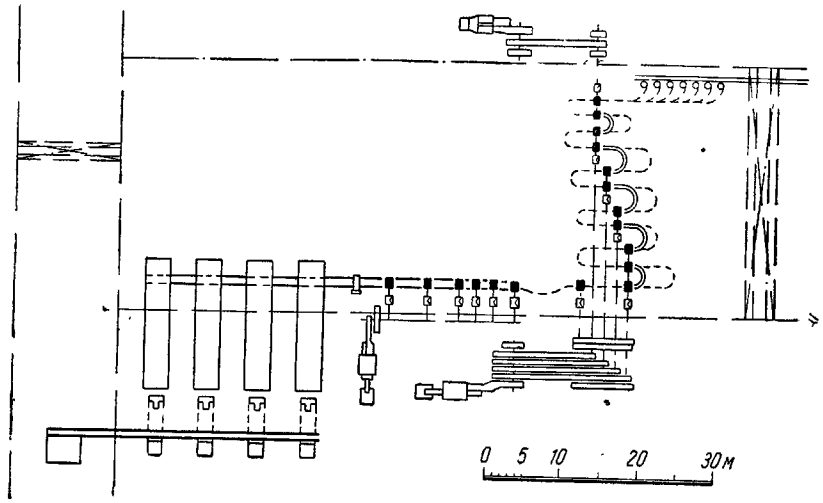


Рис. 140. Американский проволочный стан в Алабаме. Исходный профиль квадрат 102 *мм*, число проходов 18

прокатки оказывается выше точки Ac_3, а разница между температурой переднего и заднего конца настолько невелика, что ею можно пренебречь. Поэтому на величину веса мотка температура металла не влияет. В США вес мотка достигает 200 *кг* и более. За последнее время вес мотка еще более увеличился. В США и в Европе работают станы, прокатывающие мотки весом до 340 *кг*. В Германии также строят два подобных стана.

Для уменьшения длины петель станы линейного типа следует разбивать на большее количество отдельных линий и увеличивать число оборотов последней клети, т. е. скорости прокатки изменять пропорционально удлинению прокатываемой полосы. На рис. 140 показан американский проволочный стан, в котором каждая линия состоит только из двух клетей.

Для лучшего использования черновой группы с последовательным расположением клетей часто за такой группой располагают две чистовые петлевые. В показанном на рис. 141 стане имеется 10 линейно расположенных клетей, обслуживаемых пятью вальцовщиками.

Вследствие разделения чистовой линии на большое число групп и разницы чисел оборотов между группами длина петель, а следовательно, и разность температур между передним и задним концом прокатываемой полосы невелики, что позволяет увеличить

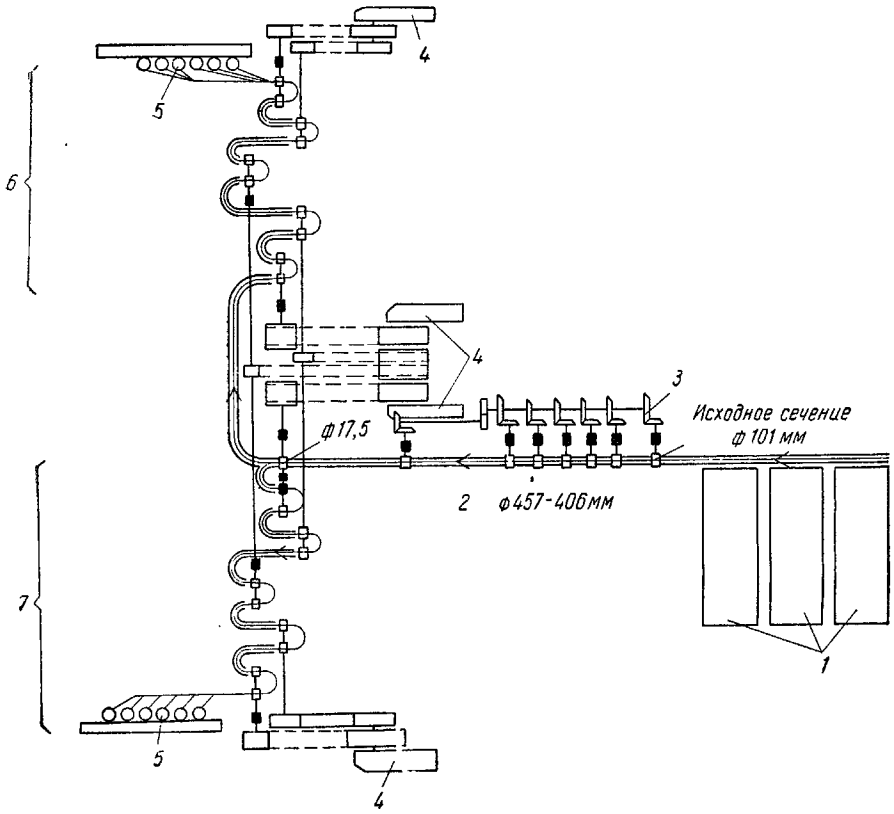


Рис. 141. Американский проволочный стан, состоящий из непрерывной черновой линии и двух чистовых линий со ступенчатым расположением клетей:
1 — нагревательные печи; *2* — непрерывная группа диаметр валков 457—406 *мм*, *3* — редуктор, *4* — паровая машина, *5* — моталки, *6* — I чистовая группа; *7* — II чистовая группа

вес мотка. Увеличение веса мотка позволяет уменьшить число задач и облегчает работу вальцовщиков.

Можно добиться, чтобы петли имели малую величину в том случае, когда каждая клеть имеет индивидуальный привод от регулируемого электродвигателя. Однако это сильно удорожает установку. На рис. 142 представлен проволочный стан конструкции Демаг, в котором редукторы с встроенными шестеренными валками расположены между рабочими клетями.

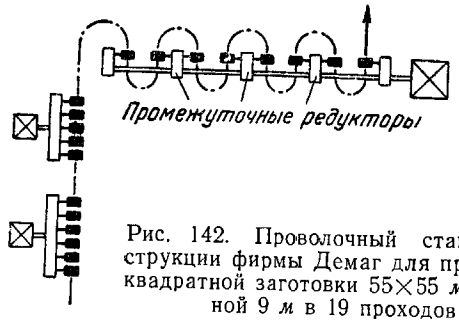


Рис. 142. Проволочный стан конструкции фирмы Демаг для прокатки квадратной заготовки 55×55 *мм* длиной 9 *м* в 19 проходов

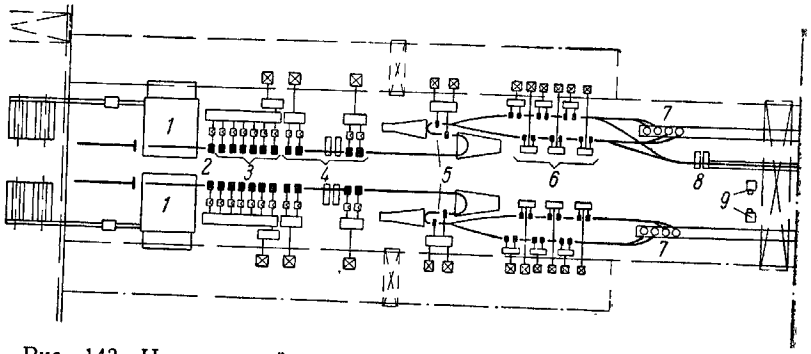


Рис. 143 Непрерывный проволочный стан конструкции фирмы Демаг

1 — методическая печь; *2* — окалиноломатель; *3*—I линия 360; *4* — II линия 300; *5* — III линия 280; *6* — IV линия 280/240; *7* — моталки, *8* — ротационные ножницы; *9* — моталки для брака

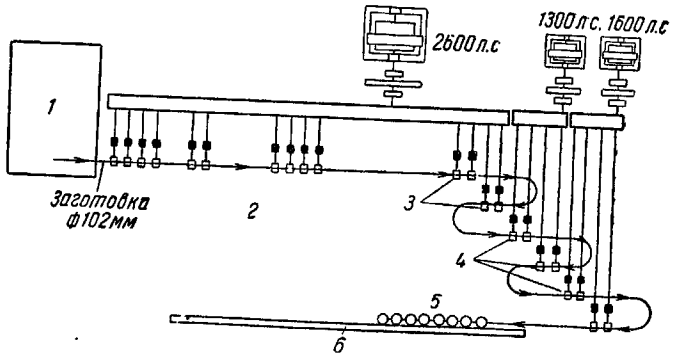


Рис. 144. Проволочный стан фирмы Американ Стил энд Уайр в Алабаме:

1 — нагревательная печь, *2* — черновая линия 425, *3* — промежуточная линия 350; *4* — чистовая линия 300; *5* — моталки; *6* — транспортер, *7* — двигатели

Одним из существенных преимуществ непрерывных проволочных станов является то, что благодаря высокой температуре конца прокатки точность прокатываемого профиля значительно выше, чем в линейных станах. Новые однониточные станы в Швеции (заводы в Фагерсте и Гофорсе) уже в течение двух лет поставляют катанку с допуском ±0,1 *мм*. Ожидается, что строящиеся проволочные станы в Рейнгаузене и Нидеррейне (Западная Германия) смогут обеспечить такую же точность прокатки. Для постройки этих станов в Германии приведенный довод имел решающее значение.

Все петлевые станы имеют один большой недостаток — их производительность в большой степени зависит от квалификации вальцовщика. Преимущество непрерывных станов состоит в том, что их работа в меньшей степени зависит от квалификации обслуживающего персонала, что обусловило, в частности, широкое распространение этих станов в Америке и Европе. Непрерывный проволочный стан конструкции Демаг, изображенный на рис. 143, имеет четыре чистовые линии, причем в каждой прокатывается только одна нитка.

Следует обратить внимание на наличие промежуточной петлевой линии с обводками, которая отделяет черновую линию от чистовой и позволяет им работать независимо, что дает возможность ускорять работу черновых клетей без нежелательного или чрезмерного увеличения скорости чистовых групп. Одновременно путем образования петель устраняется натяжение между клетями. Каждая чистовая линия состоит из трех групп, по две клети в каждой. Проволока проходит через клети без натяжения, образуя небольшую петлю.

Вследствие большого числа отдельных клетей, приводов и двигателей стоимость непрерывного стана в несколько раз превышает стоимость петлевого стана равной производительности. На рис. 144 изображен проволочный стан, установленный в Алабаме (США), который, по мнению конструкторов, должен соединить преимущества станов обоих типов. Чистовая линия состоит из шести групп, по две последовательно расположенные клети в каждой, причем группы имеют ступенчатое расположение. Овальные сечения проходят между последовательно расположенными клетями, а квадраты передаются по обводкам в следующую группу, расположенную уступом, причем между группами образуется петля. Ручная работа таким образом на этом стане отпадает. Производительность стана при работе в 4 нитки составляет 19 *т/час*,

Глава V

ПРОКАТКА И КАЛИБРОВКА ФАСОННЫХ ПРОФИЛЕЙ

1. ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ О КАЛИБРОВКЕ ФАСОННЫХ ПРОФИЛЕЙ

Сложность калибровки фасонных профилей заключается в том, что различные части профиля имеют разную деформацию. В качестве примера это положение представлено на рис. 145 для случая прокатки двутавровой балки из квадратной заготовки.

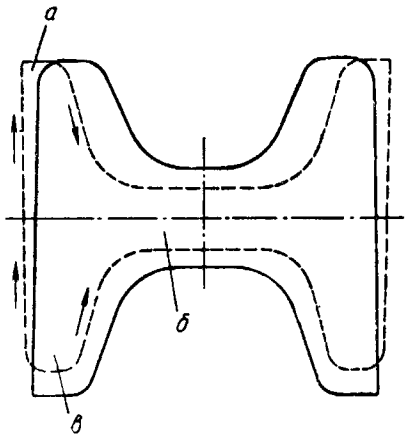


Рис. 145. Образование двутаврового сечения. Различные виды деформации в отдельных частях калибра. Стрелки показывают направление течения металла:

а — открытая часть калибра. Малое увеличение высоты, большое уменьшение ширины; *б* — шейка. Большое уменьшение высоты, малое уширение *в* — закрытая часть калибра Большое обжатие, малое уменьшение ширины

Деформация шейки происходит в вертикальном направлении при одновременном уширении этой части балки в горизонтальном направлении. В то же время фланцы деформируются в закрытой части калибров.

В открытых частях калибра, ограниченных двумя валками, происходит главным образом уменьшение толщины фланцев. Поэтому им придается уклон, который передает вертикальное давление валков на фланцы с целью увеличения уширения. Вопрос о том, какое обжатие нужно и допустимо в открытых частях калибра, решается соотношением толщины и ширины фланцев (величиной показателя устойчивости). Длинные тонкие фланцы должны быть образованы путем вытяжки в открытых калибрах с применением принудительного уширения. Если отношение толщины фланца к его высоте меньше (показатель устойчивости уменьшается), то постепенно получается профиль, допускающий применение ребровых калибров. При совсем малом коэффициенте устойчивости действие вытяжки оказывается совершенно достаточным, и применение

принудительного уширения становится излишним. Примером может служить калибровка рельсов. Если сравнительно тонкая подошва рельса в открытых калибрах при последних проходах не получает обжатия, между обжимаемой головкой и подошвой возникает утяжка и притом при калибровке с небольшим коэффициентом обжатия настолько сильная, что высота фланцев подошвы уменьшается.

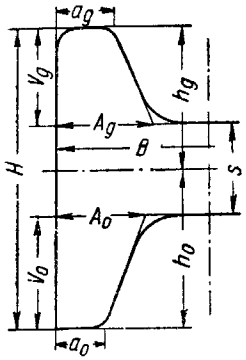


Рис. 146. Расчет размеров калибра для двутаврового профиля:

H — полная высота калибра (профиля): $V_д$ — высота закрытого фланца; V_0 — высота открытого фланца; B — ширина калибра в середине шейки, h_g — высота закрытого фланца; h_0 — высота открытого фланца; s — толщина шейки; A_g — толщина закрытого фланца; A_0 — толщина открытого фланца

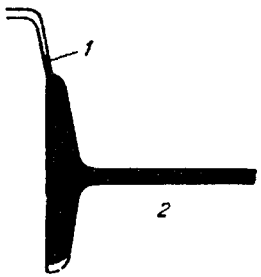


Рис. 147. Образование заусенца при неправильной калибровке двутаврового профиля, вызвавшей чрезмерное обжатие фланца по толщине в закрытой части калибра:

1 — заусенец; *2* — повышенное обжатие по толщине в закрытой части калибра

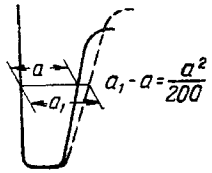


Рис. 148. Величина обжатия по толщине в закрытой части калибра по Кирхбергу

Для деформации в открытых частях калибра существует правило: сильное уменьшение толщины фланцев влечет за собой увеличение или уменьшение их высоты в зависимости от коэффициента устойчивости балки.

В закрытых калибрах деформация протекает по-другому. Высота фланца в части калибра, ограниченной одним валком (закрытой), преимущественно уменьшается (рис. 146). При этом допустимость уменьшения толщины зависит от коэффициента устойчивости фланца. При длинном, тонком фланце обжатие по толщине приводит к тому, что фланец защемляется в калибре, последний не заполняется, а излишний металл переходит в противолежащую открытую часть калибра и образует заусенец (рис. 147). По-

этому для очень тонких фланцев в закрытых калибрах обжатие не допускается; наоборот, следует иметь небольшое увеличение толщины. Это целесообразно также потому, что при небольшом случайном смещении валка обжатие в закрытой части калибра при прокатке профилей с тонкими фланцами может возрасти настолько, что образуется заусенец.

Приведем пример из области калибровки рельсов. Длинная и тонкая подошва рельса не получает обжатия в закрытых частях калибра при последних проходах. Напротив, толщина подошвы делается для открытой части больше, чем для врезанной; толщина массивной головки в закрытом калибре уменьшается. Для деформации в закрытых частях калибра существует правило, по которому необходимо сильное уменьшение высоты фланцев. Увеличение или уменьшение толщины фланцев происходит в зависимости от их коэффициента устойчивости. Допустимое уменьшение толщины снижается с увеличением коэффициента устойчивости.

В литературе существуют различные воззрения на описанный процесс. Л. Жез [6] не делает никакого различия между образованием фланцев в открытых и закрытых частях калибра. По рекомендуемой им системе калибровки невозможно получить хороший профиль проката. Э. Кирхберг [4] считает, что величина обжатия по толщине для фланца в закрытой части калибра равна $\frac{a^2}{200}$ (где a — толщина фланца в закрытой части калибра рис. 148).

Применение этой формулы по изложенным выше основаниям не рекомендуется, но для очень тонких фланцев в закрытых частях калибров она пригодна. Однако для толстых фланцев формула Кирхберга дает слишком большие значения. Например, при $a = 100$ обжатие по толщине получается $\frac{10000}{200} = 50$. Это значит, что по формуле Кирхберга толщина фланца при прокатке в закрытом калибре уменьшится со 100 до 50 *мм*, что невозможно.

Кирхберг называет величину $\frac{a^2}{200}$ «непрямым давлением» и понимает под ним величину обжатия, которое имеет место при вдавливании прокатываемого металла в более узкую закрытую часть калибра, т. е. между поверхностями калибра одного и того же валка. Величина a может считаться также боковым обжатием. Тафель [5] высказывает другое мнение. Он понимает под непрямым обжатием уменьшение размеров профиля, возникающее параллельно оси валков, но которое возможно только в открытых частях калибра. При этом Тафель исходит из того, что в закрытом калибре фланец должен подвергаться только «прямому обжатию», т. е. обжатию по высоте. Поэтому он рекомендует закрытую часть калибра делать несколько шире, чем задаваемый в нее фланец.

Другую точку зрения высказывает Метц [59]. Он обозначает обжатие, которое вызывает уменьшение толщины фланца в открытом калибре как «частичное прямое обжатие», а обжатие, вызывающее уменьшение толщины фланца в закрытом калибре, как «непрямое обжатие». Тафель высказывает при этом мнение, что боковое обжатие в закрытых частях калибра недопустимо. Это мнение в общем случае, т. е. без учета упомянутого выше коэффициента устойчивости, нельзя считать правильным. Пуппе [58] кратко отмечает, что в известных случаях применение бокового обжатия в закрытых частях калибра может оказаться необходимым.

Точка зрения Тринкса [10] близка к мнению Тафеля. Он указывает, что обжатие фланцев по толщине в закрытых частях калибра вызывается не боковым обжатием, а происходит вследствие вытяжки шейки в месте соединения с фланцами и за счет вытяжки фланцев в открытых частях калибра. Таким образом, по Тринксу, это явление есть следствие воздействия частей профиля, вытянутых под действием прямого обжатия. При этом он добавляет, что это воздействие проявляется только в тех случаях, когда сечение фланцев в закрытых частях калибра не больше, чем сечение шейки и фланцев в открытых частях калибра. По Тринксу, не следует допускать бокового обжатия в закрытых частях калибра, так как если задаваемый в закрытую часть калибра фланец, толще, чем сечение калибра в свету, то может возникнуть защемление металла и образоваться заусенец. В дальнейшем он рассматривает случай, когда сечение фланцев, находящихся в закрытых частях калибра, больше сечения шейки и других фланцев. Тогда последние не могут вытянуть за собой большее сечение, напротив, металл перемещается из шейки и фланцев в закрытую часть калибра. При этом ширина закрытой части калибра должна быть больше, чем в соответствующем предыдущем калибре. На рис. 149 показан случай защемления толстого фланца в закрытой части калибра.

Твердо установлено, и по этому вопросу нет никакого расхождения в мнениях, что распределение вытяжек и течение металла в открытых и закрытых частях калибра совершенно различно (рис. 145). Однако на основании опыта можно утверждать, что обжатие по толщине может производиться как в открытых, так и в закрытых частях калибра, однако обжатие в закрытом калибре можно допустить только при определенной величине коэффициента устойчивости и что при этом оно должно быть меньше, чем в открытых частях калибра.

Расхождение во мнениях существует не только относительно обжатий в закрытых частях калибра. Различные взгляды имеются

также по вопросу о величине обжатия в открытых частях калибра. Некоторые специалисты стоят на той точке зрения, что в открытых частях калибра не должно производиться никакого обжатия по высоте и поэтому должно соблюдаться равенство

$$h_{o_n} = h_{g_{n-1}},$$

где h_o — высота открытой части;
h_g — высота закрытой части калибра;
индексы n и $(n-1)$ — номер прохода (см. рис. 146).

Поэтому вследствие обжатия шейки высота фланца (v_{o_n}) в открытой части калибра будет больше, чем в закрытой ($v_{g_{n-1}}$) на величину, равную половине обжатия шейки. Поэтому

$$v_{o_n} - v_{g_{n-1}} = \frac{s_{n-1} - s_n}{2} = \frac{\Delta s}{2}$$

Брово при калибровке двутавровой балки принимает, что $v_{o_n} = v_{g_{n-1}}$ и h_o меньше, чем $h_{g_{n-1}}$ и, следовательно, фланец обжимается также в открытом калибре и притом на величину, равную половине обжатия шейки.

Кирхберг при калибровке двутавровой балки принимает обжатие фланца в закрытой части калибра по 5 *мм* в каждом проходе для всех профилей нормальных размеров. При калибровке рельсов Кирхберг применяет одинаковое обжатие головки в открытых и закрытых частях калибра, равное 1 *мм*. При калибровке двутавровых балок, по Кирхбергу, принимается, что в открытых частях калибра высота фланца увеличивается от $^1/_2$ до 1 *мм* на каждый проход для всех размеров балок.

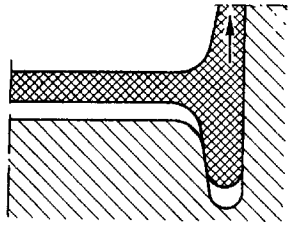


Рис. 149. Заклинивание фланца в закрытой части калибра

Нужно считать установленным, что при деформации фланцев как в открытых, так и в закрытых частях калибра следует принимать во внимание их коэффициент устойчивости.

Рассмотрим данный метод калибровки применительно к прокатке в нескольких калибрах. Как видно из изложенного выше, может быть применено значительное обжатие по высоте, в то время как уменьшение толщины фланцев, особенно в закрытых частях калибра, ограничено известными пределами. Однако это воздействие может быть равномерным, если готовый профиль симметричен. Для этого целесообразно в разных проходах задавать профиль попеременно в открытые и закрытые части калибра. При прокатке на стане трио эта задача проста, так как изменение сторон калибров совершается само собой. На стане дуо после каждого прохода либо необходима кантовка на 180°, либо следует обеспечить чередование на валках положительных и отрицательных буртов. Такое расположение калибров уменьшает количество кантовок, но требует большей длины бочки валков. Можно уменьшить число двойных буртов на валках, располагая калибры, следующих друг за другом проходов не рядом, а через один. Правда, при этом нужно передавать металл вдоль валка, но это не представляет особых затруднений. Расположение калибров при прокатке двутаврового профиля на стане дуо показано на рис. 150 и 151.

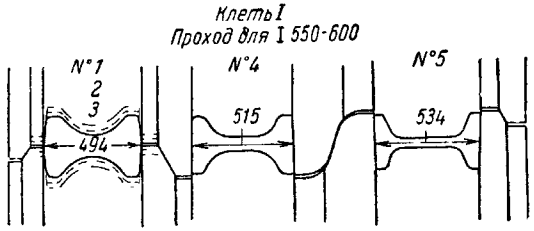


Рис. 150. Расположение калибров при прокатке балки № 60 в первой клети реверсивного стана дуо

При прокатке двутавровой балки фланцы попеременно попадают то в открытую, то в закрытую часть калибра. При прокатке швеллера, наоборот, фланцы большей частью подаются в открытую часть калибра, чтобы ускорить их вытяжку и формирование. Для точной регулировки формы и высоты фланца его обжимают

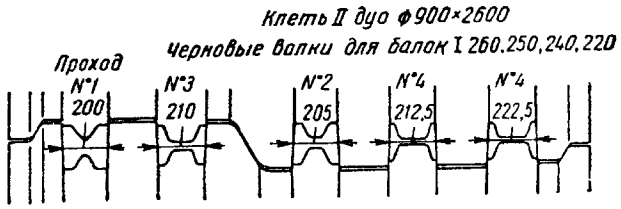


Рис. 151. Расположение калибров при прокатке двутавровых балок в реверсивном стане дуо

по высоте в предчистовом и пред-предчистовом проходе (рис. 152).

Для того чтобы иметь возможность использовать для двутавровой балки и швеллера одни и те же черновые калибры, при калибровке швеллера предусматривается образование ложных фланцев, которые в последующих проходах постепенно сглаживаются. Этот метод имеет то преимущество, что для образования фланца и угла шейки в непосредственной близости имеется запас металла, из которого он может переходить в нужном направлении.

Для построения общего чернового калибра для двутавровых

балок и швеллеров часто пропускают прокатываемый металл дважды через калибр, открытый снизу, а затем металл прокатывают в калибрах для швеллера, как описано выше. Если предстоит прокатать двутавровую балку, то полосу дважды пропускают через закрытый снизу калибр, для того чтобы получить симметричный двутавровый профиль.

Одностороннее расположение фланцев швеллера заставляет применять другой метод калибровки, при котором в предварительных калибрах фланцы наклонены в стороны. При этом ускоряется образование фланцев, так как деформация при наклонном положе-

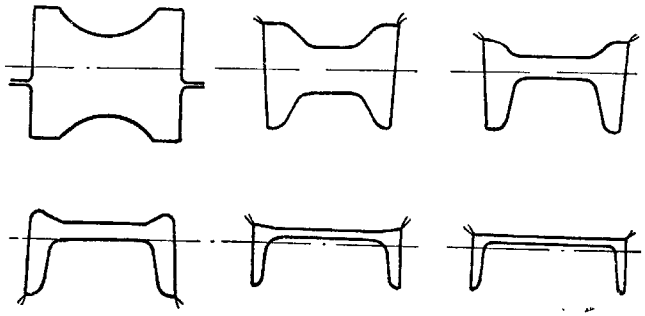


Рис. 152. Калибровка для швеллера с ложными фланцами

нии фланцев производится за счет прямого обжатия (рис. 153). Такое расположение калибров с отогнутыми полками, называемое также «угольным» способом, увеличивает длину, занимаемую калибром на бочке валков. Видоизменения этого метода калибровки представлены на рис. 154 и 155.

Различные калибровки рельсов представлены на рис. 156. Верхний ряд представляет наиболее старую калибровку. Отличие ее состоит в том, что образование шейки начинается с первых проходов. После четырех проходов металл задается в ребровой калибр, уширяющий подошву и регулирующий высоту рельса. Расположение реброваго калибра, после того как профиль в значительной степени сформирован, имеет существенные недостатки. В калибре, непосредственно следующем за ребровым, происходит весьма значительная деформация металла в подошве, что уменьшает срок службы валка.

В калибровке, изображенной во втором ряду, ребровой калибр расположен более удачно. Образование шейки начинается только после реброваго калибра. Следует, однако, заметить, что ребровой калибр имеет тот недостаток, что полоса не соприкасается с валками по всему периметру. Вследствие этого необрабатываемые участки поверхности заготовки скорее охлаждаются. Кроме того,

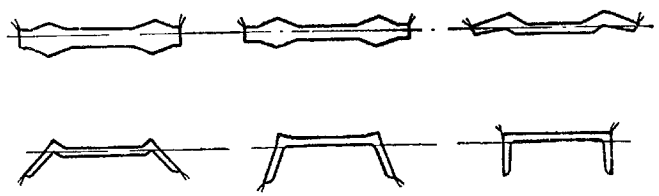


Рис. 153 Калибровка швеллера методом сгибания

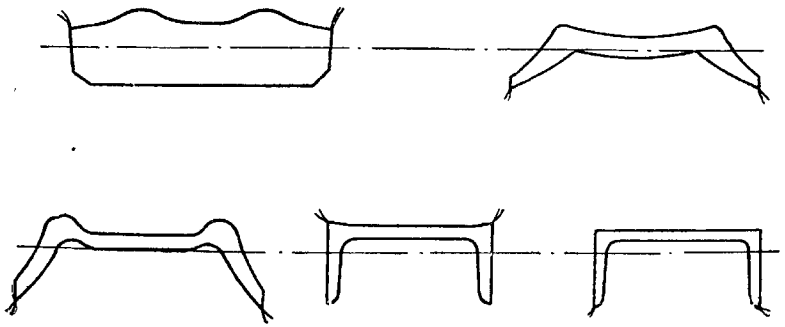


Рис. 154. Измененный способ калибровки швеллера по методу сгибания

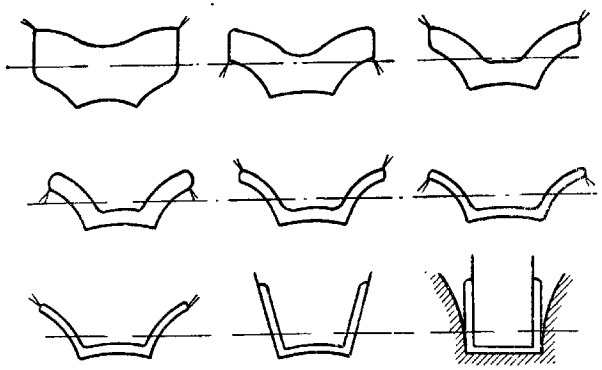


Рис. 155. Калибровка для получения швеллера с параллельными фланцами

перед и после реброваго калибра полосу нужно кантовать, что вызывает потерю времени и затруднения, если полоса не выходит из калибра прямо, как это часто происходит при прокатке в ребровых калибрах. Во всяком случае применение реброваго калибра сопряжено с потерей времени и снижением температуры. Поэтому более оптимальной следует считать калибровку без реброваго калибра с размещением, аналогичным применяемому при прокатке балок и швеллеров. Брово считает, что для швеллеров высотой менее 260 *мм* целесообразно применять ребровой калибр для того, чтобы прокатать больше профилей различной высоты из общего чернового ручья. Однако в настоящее время этот метод не применяется.

Третий ряд на рис. 156 представляет калибровку, в которой ребровой калибр и кантовки отсутствуют при прокатке. В нижнем ряду того же рисунка изображена калибровка, в которой средние линии калибров расположены не параллельно линии валков. Наклонное расположение калибров с переставленными замками дает возможность попеременно эффективно обжимать головку и подошву рельса и получить хорошо обжатую подошву без реброваго калибра, что дает равномерную вытяжку всех частей профиля. Калибровка имеет еще то преимущество, что благодаря наклонному расположению калибров облегчается переточка валков и улучшает поверхность головки и подошвы рельса и использование валков. Недостатком этой калибровки является то, что благодаря наклонному расположению калибров при прокатке возникают осевые усилия и, следовательно, для предотвращения бокового смещения валков необходимо применять усиленные установочные болты, замки калибров и опорные конусы. Необходимо также большое внимание в процессе прокатки. Калибровка, представленная в третьем ряду, до сих пор широко распространена. Количество проходов при этой калибровке колеблется между 5 и 13, причем крайние значения встречаются в единичных случаях. На немецких заводах обычно встречается калибровка в *7*, а чаще в *9* проходов. Следует отметить, что износ валков зависит от числа проходов; наименьшая величина износа соответствует среднему числу проходов.

По сравнению со старыми калибровками характерным для современных калибровок является наличие значительно более глубокого первого разрезного калибра. Особого внимания заслуживает новая калибровка рельсов Бартшерера (немецкий патент 607231), отличие которой состоит в том, что в первых проходах на плоскостях, соответствующих подошве и головке, делаются глубокие клиновидные надрезы, которые в ходе дальнейшей прокатки раскрываются (рис. 157). При этом подкорковые пузыри и дендриты зоны первичной кристаллизации, расположенные ранее перпендикулярно к поверхности, располагаются параллельно поверхности подошвы и головки. Вследствие этого концентрация напряжений в

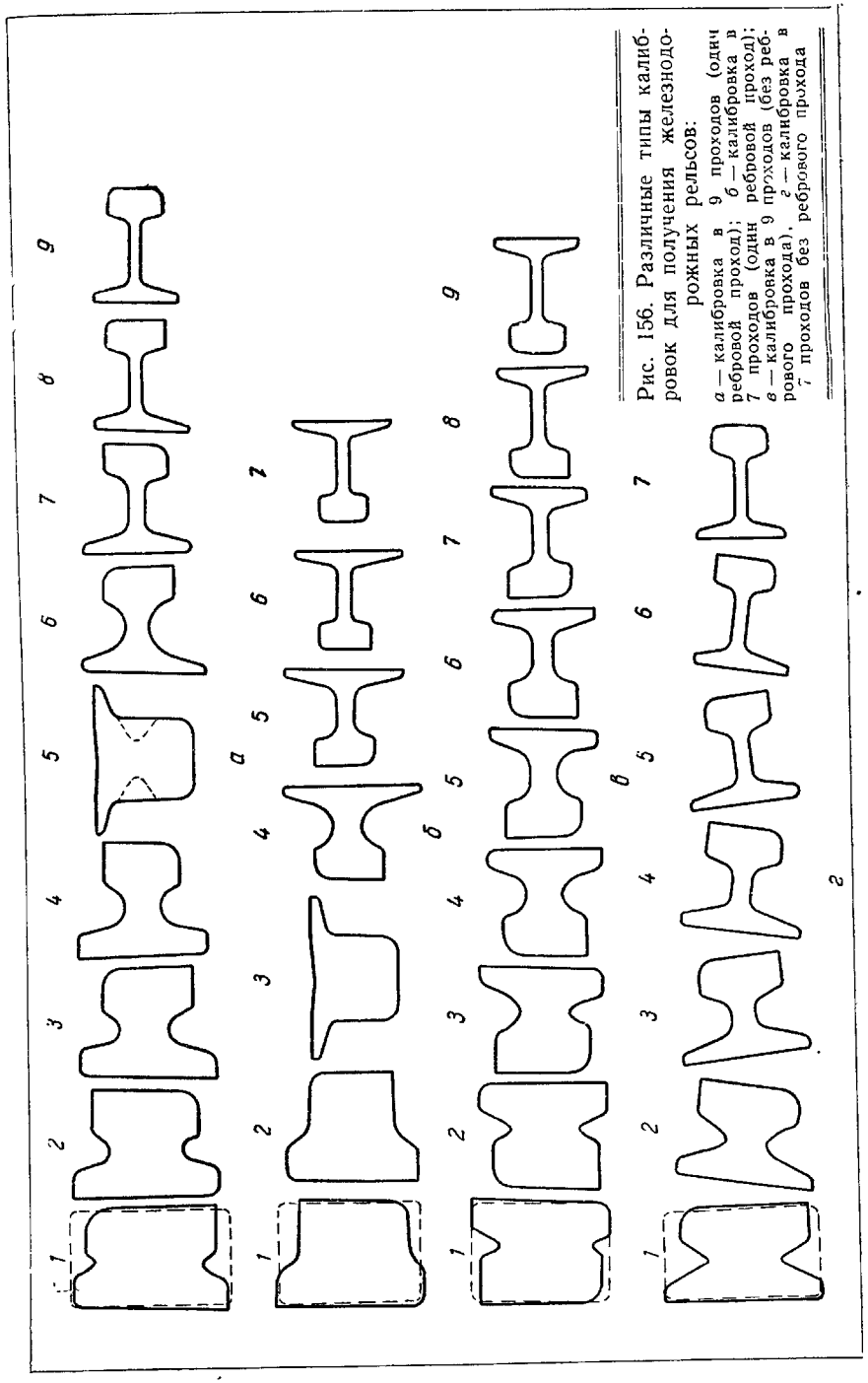


Рис. 156. Различные типы калибровок для получения железнодорожных рельсов:

а — калибровка в 9 проходов (один ребровой проход); *б* — калибровка в 7 проходов (один ребровой проход); *в* — калибровка в 9 проходов (без реброваго прохода), *г* — калибровка в *7* проходов без реброваго прохода

местах расположения дендритов и пузырей предотвращается, и неблагоприятное воздействие этих литейных дефектов стали значительно смягчается.

Дальнейшее изложение этого метода калибровки дает Фольмахер [57] (калибровка рельсов завода Тиссен). Многочисленными

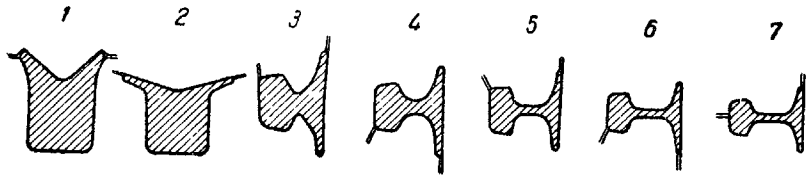


Рис. 157. Калибровка рельсов на стане завода Тиссен (патент Бартшерера)

исследованиями рельсового металла были доказаны преимущества описанного метода по сравнению с другими методами калибровки вследствие благоприятного расположения дендритов зоны поверхностной кристаллизации, в результате чего образуется свободная

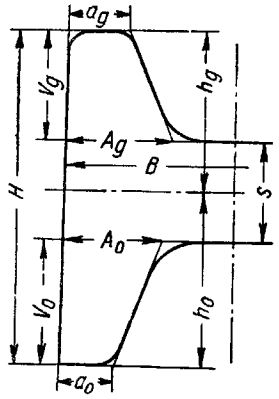


Рис. 158. Расчет размеров калибра двутаврового профиля:

H — полная высота калибра, — высота фланца; V_0 — высота фланца; B — ширина калибра в середине шейки; h_g — высота; h_0 — высота; s — толщина шейки

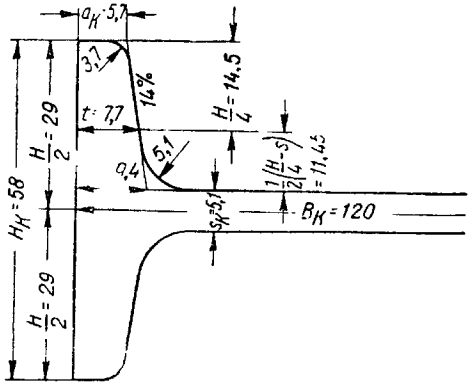


Рис. 159. Размеры готового профиля двутавровой балки № 12

от трещин зона с наружной поверхности подошвы рельса, что уменьшает возможность возникновения трещин в подошве рельса. Испытания подошвы рельса на изгиб показали значительное улучшение прочностных характеристик рельсов, прокатанных по этому методу.

2. КАЛИБРОВКА ВАЛКОВ ДЛЯ ПРОКАТКИ ДВУТАВРОВЫХ БАЛОК

После того как изложены общие сведения о калибровке фасонных профилей, перейдем к методам проектирования калибровок двутавровых балок. На рис. 158 размеры профиля в открытых частях калибра обозначены индексом o, в закрытых частях — индексом g. В качестве первого примера разберем калибровку нормальной двутавровой балки № 12 (рис. 159).

Калибровка двутавровой балки № 12 (табл. 46)

Калибровку производят, исходя из профиля, выходящего из чистового калибра. Размеры чистового калибра не всюду соответст-

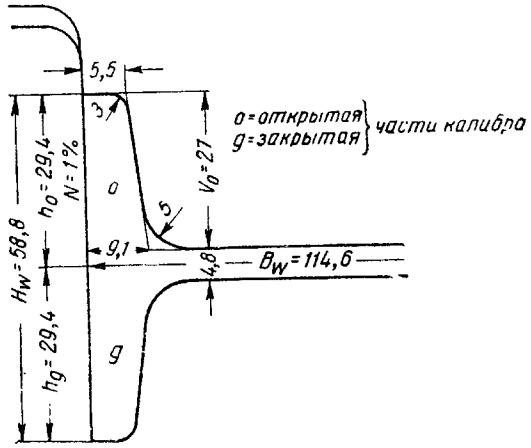


Рис 160. Чистовой калибр двутавровой балки № 12

вуют размерам профиля в горячем состоянии, которые равны размерам профиля в холодном состоянии (обозначенным индексом $к$), умноженным на коэффициент 1,013—1,015. Разница холодного и горячего профилей определяется условиями (рис. 160).

$$B = 1{,}013\,B_к - \Delta\ (\Delta \text{ — допуск})$$

$$H = 1{,}013\,H_к;$$

$$s = s_к - 6\%;$$

$$A = A_к - 3\%;$$

$$a = a_к - 3\%.$$

Эти размеры принимаются вследствие того, что увеличение вертикальных размеров профиля, возникающие из-за износа валков,

Таблица 46

Калибровка двутавровой балки № 12 в 7 проходов

№ прохода	№ калибра	Шейка					Высота фланцев					Толщина фланцев					Закругление	
		B мм	Δb мм	s мм	отношение Z_s	H мм	отношение Z_H	$h_o\ h_g$ мм	отношение Z_h	фланец V мм	$A_o\ A_g$ мм	отношение Z_A	$a_o\ a_g$ мм	отношение Z_a	$R_o\ R_g$ мм	отношение Z_R
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
0	0	90	—	120	—	120	—	o 60 g 60	—	—	—	—	—	—	—	—
1	I	93	3	30,4	3,95	106	1,13	o 53 g 53	1,13 1,13	o 37,8 g 37,8	o 37 g 40	—	o 20 g 22	—	o 45 g 45	—
2	II	100	7	17,5	1,73	93	1,13	g 43,5 o 50,3	1,21 1,05	g 34,75 o 41,55	g 39,7 o 26,4	1,24 1,52	g 17,2 o 13,6	1,15 1,60	g 27 o 30	1,65 1,50
3	III	106	6	11	1,59	83,6	1,12	o 41,8 g 41,8	1,04 1,20	o 38,3 g 36,3	o 19,8 g 21,8	1,49 1,21	o 11,0 g 12,35	1,57 1,12	o 20 g 20	1,35 1,50
4	IV	111	5	7,6	1,45	75,6	1,11	g 35,1 o 40,5	1,19 1,03	g 31,1 o 36,7	g 16,8 o 15,0	1,18 1,46	g 10,1 o 8,0	1,09 1,54	g 13,3 o 15,0	1,50 1,35
5	V	115	4	5,0	1,31	68,6	1,11	o 34,3 g 34,3	1,02 1,18	o 31,4 g 31,4	o 11,7 g 13,0	1,43 1,15	o 6,7 g 7,55	1,51 1,06	o 10,0 g 10,2	1,35 1,50
6	VI	118	3	5,0	1,17	63,5	1,08	g 29,4 o 34,1	1,17 1,01	g 26,9 o 31,6	g 10,5 o 9,3	1,12 1,40	g 6,9 o 5,1	1,03 1,48	g 6,5 o 7,3	1,50 1,35
7	VII	119,6	1,6	4,8	1,03	58,8	1,08	o 29,4 g 29,4	1,00 1,16	o 27,0 g 27,0	o 9,1 g 9,1	1,15 1,02	o 5,5 g 5,5	1,18 1,93	o 5,0 g 5,0	1,30 1,45

Примечание. Индекс *o* — открытая часть калибра; индекс *g* — закрытая часть калибра; *Z* — отношение какого-либо параметра в предыдущем калибре к этому параметру в последующем калибре (коэффициент деформации для данной части калибра).

может быть устранено регулировкой валков в вертикальном направлении, а износ боковых стенок калибра, формирующих фланцы, таким путем устранить невозможно. Поэтому подобное построение калибра необходимо для того, чтобы, используя минусовый допуск по размерам и весу профиля, не слишком быстро выйти из плюсового допуска.

Ширина калибра B. Допустимое уширение в последнем — седьмом — проходе примерно равно 2 *мм*. В других проходах величина уширения возрастает от чистового к черновому калибру примерно на 1 *мм* для каждого следующего прохода. Ширина задаваемого профиля будет меньше ширины первого калибра. В первом калибре обычно принимается меньшее уширение, поскольку имеется опасение, что клиновидный надрез не всегда точно попадает на середину заготовки. В остальных проходах допускаемое уширение принимается по усмотрению калибровщика. Следует добавить, что применение большого уширения выгодно только тогда, когда нужно прокатывать на одной паре черновых валков профили многих размеров, для того чтобы уменьшить количество валков и перевалок. При прокатке более широкого профиля принимается большее уширение с тем, чтобы дать возможность в черновых валках иметь узкий калибр, пригодный для прокатки из него также узких профилей с малым уширением. Это дает возможность прокатывать из одних черновых валков балки с разницей по высоте до 80 *мм*, конечно, если прокатка производится в нескольких клетях. Допустимое уширение, однако, имеет свои границы: они определяются возможностями захвата в последующем калибре. Фланцы должны входить в калибр, конечно, тем глубже, чем они толще. Более толстые фланцы естественно сгибаются хуже и не так легко задаются в более широкий калибр. Например, на рис. 161 изображено благоприятное соотношение между ширинами соседних калибров, а на рис. 162 — неблагоприятное; фланцы с трудом проходят в слишком широкий калибр. Размер *а* должен быть несколько меньше размера *б*, что видно также из рис. 163.

Толщина шейки s. В последнем проходе допускается только незначительное обжатие по высоте, что в особенности относится к шейке, о чем будет сказано ниже. Коэффициент обжатия по толщине шейки в последнем проходе принимается 1,03, что соответствует уменьшению толщины на 3%. В предыдущих проходах коэффициент вытяжки равномерно повышался в направлении, обратном ходу проходки, достигая 1,14 (14%). Шейка в первых проходах, таким образом, обжимается сравнительно сильно, что допустимо и рекомендуется, так как температура металла в начале прокатки является высокой. В первом проходе обжатие принимается особенно большим, так как в этом случае производится глубокий клиновидный надрез прокатываемого сечения, который по возможности делается острым, чтобы уменьшить величину вытяжки.

Это необходимо для того, чтобы фланцы не получали утяжки, что неизбежно при большой вытяжке. Следует учесть, что шейка в первом проходе настолько обжимается по высоте, что в последующих проходах при увеличившейся ширине калибра, соответствующей длине шейки, вытяжка шейки будет невелика, иначе при повышенном обжатии она окажет влияние на фланцы — высота их уменьшится и произойдет утяжка.

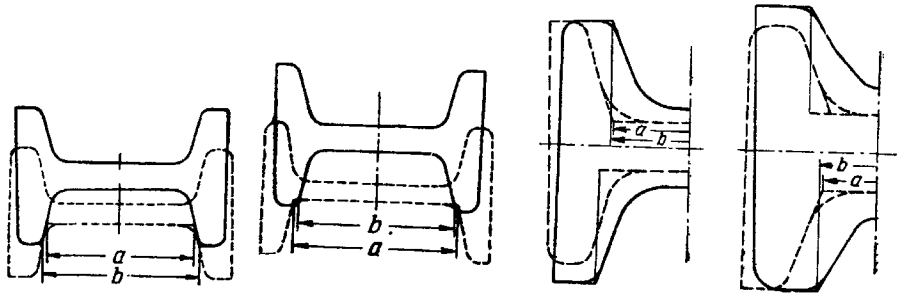


Рис. 161. Правильное соотношение ($a < b$)

Рис. 162. Неправильное соотношение ($a > b$)

Рис. 163. Захват фланцев в последующем калибре

Высота открытого и закрытого фланцев h_o и h_g. Коэффициент увеличения h_g в чистовом калибре равен 1,16. Он увеличивается от калибра к калибру примерно на 0,1. В одинаковой мере коэффициент деформации для h_o равномерно уменьшается от калибра к калибру, причем он значительно меньше, чем для h_g, так как обжатие по высоте в открытых частях калибра из опасения образования заусенца должно быть невелико. Поэтому высота фланцев в открытой части калибра в чистовом калибре должна быть равна таковой в закрытой части калибра в предчистовом калибре, т. е. коэффициент для h_o равен 1,0.

Высоты калибра h_o и h_g приведены в графе 9 табл. 46.

Высота фланцев V_o и V_g. Метод вычисления высоты фланцев V_o и V_g вытекает из вышесказанного. Фланец V_o равен размеру h_{o_n}, уменьшенному на половину толщины шейки s_n.

$$V_{o_n} = h_{o_n} - \frac{s_n}{2} \text{ и } V_{g_n} = h_{g_n} - \frac{s_n}{2}.$$

Высоты фланцев V_o и V_g приведены в графе 11 табл. 46. Вследствие того, что вертикальное обжатие в открытых частях калибра очень невелико, высоты фланцев в открытых частях калибра оказываются бо́льшими, чем в закрытой части предыдущего большого калибра, т. е. V_{o_n} больше, чем $V_{g_{n-1}}$.

При этом следует обратить внимание на то, чтобы фланцы в

первом калибре имели надлежащие размеры. Для двутаврового профиля они должны быть по крайней мере на 10 *мм* больше, чем в чистовом калибре, и, следовательно, толщина шейки в первом калибре должна быть невелика, т. е. разрез должен быть возможно более глубоким.

Общая высота калибра H. Общая высота калибра H равна сумме h_o и h_g. Как показано в графе 8 табл. 46, отношение наибольшей высоты H в чистовом калибре к высоте в первом калибре очень невелико. Это соотношение дает благоприятные результаты, что доказано опытом. Высота исходного профиля принимается в среднем в 1,6—2 раза больше высоты готового профиля. Можно также начинать и с более высокого исходного профиля, но тогда нужно, смотря по обстоятельствам, иметь два лишних фасонных прохода. Соответствующие исходные сечения должны быть получены с обжимного стана или прокатаны на черновой клети.

Толщина фланца у основания (A) и на конце (a). Как показано выше, фланцы по толщине обжимаются в открытых частях калибра значительно сильнее, чем в закрытых. Металл в закрытых частях калибра иногда не проникает до дна калибра, т. е. калибр остается незаполненным, в то время как в открытой части калибра может образоваться заусенец (см. рис. 147). Поэтому для сравнительно тонких фланцев в закрытых частях калибра вообще не допускается никакого обжатия по толщине. Так как чистовой калибр имеет симметричную форму, и образование фланцев с обеих сторон должно происходить равномерно, металл, который в данном калибре прокатывался в закрытой части, в следующем калибре попадает в открытую и наоборот. Размеры A и a при этом определяют следующим образом. Величина коэффициента деформации для A_o в чистовом калибре принимается 1,15, в черновом — 1,40. Уменьшение его от калибра к калибру составляет 0,03. Для A_g коэффициенты деформации имеют следующую величину: в чистовом калибре 1,02, в черновом калибре 1,12; снижение, так же как для A_o, равномерное по 0,03 на каждый проход. Величина коэффициента деформации для a_o в чистовом калибре составляет 1,18; в черновом — 1,48. Уменьшение от калибра к калибру составляет 0,03. Величина отношения для a_g следующая: в чистовом калибре 0,93 (или —1,08), в черновом калибре — 1,03, со снижением в каждом калибре на 0,03. Из этих соотношений, установленных на основании долголетнего опыта, можно сделать следующие выводы.

1. Обжатие является самым малым в чистовом (полировочном) проходе, что необходимо для уменьшения износа валков и получения профиля максимально точных размеров.

2. В начале прокатки обжатия максимальные, что целесообразно, поскольку температура в этом периоде максимальная и по ходу прокатки снижается.

3. Обжатие фланцев по толщине в открытых частях калибра

значительно выше, чем в закрытых. Это в особенности относится к концу прокатки. Как видно из табл. 46, a_{o_6} меньше, чем a_{o_7} и, следовательно, в чистовом калибре закрытая часть калибра имеет несколько большую ширину, чем задаваемый в нее фланец. При этом следует заметить, что обжатие по толщине в закрытых частях калибра должно быть небольшим, так как при малой толщине фланцев, незначительное боковое перемещение (уход) валков может настолько увеличить обжатие в закрытой части калибра, что могут возникнуть упомянутые выше нежелательные последствия — незаполнение закрытой части калибра и переполнение открытой с образованием заусенца.

Закругления. Для получения профиля приведенных выше геометрических очертаний в калибре необходимо иметь различные закругления. Для чистового профиля применяют следующие величины закруглений: радиус закругления между шейкой и фланцем равен толщине шейки, а радиус закругления внутреннего края фланца равен 0,6 от толщины шейки.

Для следующих калибров радиусы закругления вычисляют при помощи коэффициентов Z_R, приведенных в столбце 17 табл. 46. При этом следует отметить, что в отличие от изложенных выше методов определения размеров калибров коэффициенты Z для закрытых частей калибра больше, чем для открытых. Это означает, что разницу в закруглениях принимают от открытого к закрытому калибру больше, чем от закрытого к открытому. Это целесообразно во избежание образования складок при обжатии по высоте в закрытых частях калибра. Радиус закругления на внутренней стороне фланца вдвое меньше, чем при переходе от фланца к шейке, причем можно применять еще меньший радиус. Внешние закругления черновых калибров следует всегда увеличивать.

Построение профиля калибра. При построении профиля калибра следует поступать, как изображено на рис. 164.

1. Наносят вертикальную и горизонтальную оси калибра.
2. На горизонтальной оси отмечают половины ширины калибра от вертикальной оси.
3. Вычерчивают выпуск калибра, как показано на рис. 164, *а*. Выпуск для чистового калибра равен 1%, для черновых — 2,5%.
4. На вертикальной оси откладывают величины h_o и h_g и проводят соответствующие горизонтальные линии.
5. Наносят толщину шейки калибра.
6. Вычерчивают размеры A_o, A_g, a_o, a_g .
7. Вычерчивают закругления.

Начерченный калибр рекомендуется перевести на кальку и путем наложения последующих калибров проверить и оценить относительное формоизменение и заполнение калибров. В закрытых частях калибра может легко возникнуть опасность того, что металл в них не достигнет дна калибра, в то время как заусенец выходит за пределы открытой части калибра. Больший фланец можно задать в меньший закрытый фланец калибра (рис. 165). С понижением температуры трение между металлом и валком увеличивается, и поэтому опасность образования заусенца возрастает.

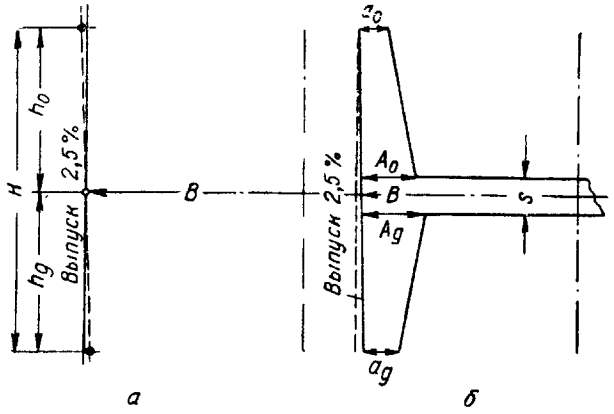


Рис. 164. Вычерчивание профиля калибра для двутаврового профиля

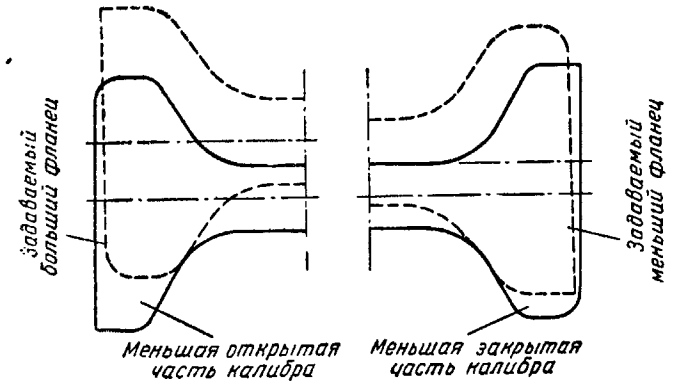


Рис. 165. Задача фланцев в открытую или закрытую часть калибра

Принимая во внимание, что в прокатку могут поступать заготовки с пониженной температурой, в закрытых частях калибра рекомендуется меньшее обжатие. В отдельных прокатных станах могут встретиться обстоятельства, которые заставляют уменьшить обжатия в закрытых частях калибра по сравнению с приведенным выше примером калибровки. Для того чтобы быть уверенным в том, что задаваемый в закрытую часть калибра фланец проникает достаточно глубоко, некоторые калибровщики выпуск для задаваемых

больших фланцев как в черновых, так и в чистовых калибрах делают равным выпуску меньших закрытых частей калибра (см. рис. 180). Профили калибров, начиная с № 1 по № 7, приведены на рис. 166.

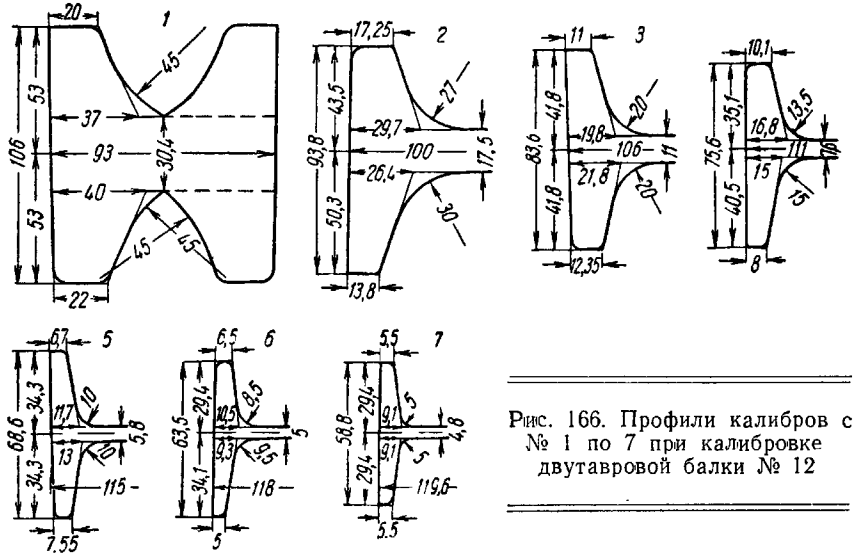


Рис. 166. Профили калибров с № 1 по 7 при калибровке двутавровой балки № 12

Ниже приведена калибровка большого двутаврового профиля для того, чтобы показать, что она построена, исходя из тех же установок и с применением тех же закономерностей, которые применяют при калибровке малых профилей. Для примера выбрана калибровка балки № 50.

Калибровка двутавровой балки № 50

Размеры отдельных частей калибра показаны в табл. 47.

Ширина калибра B. Допускаемое уширение (графа 4 табл. 47) в последнем калибре принимается равным 7 *мм*; в последующих калибрах, считая от чистового к черновым, уширение в каждом калибре возрастает на 1 *мм*. Ширина задаваемого профиля на 8 *мм* меньше ширины первого калибра.

Толщина шейки s. При определении толщины шейки (графа 6 табл. 47) исходят из вытяжки, равной 1,02. В последующих проходах вытяжка равномерно повышается на 0,04 в каждом проходе. Увеличение вытяжки является меньшим, чем для балки № 12, для которой оно принималось равным 0,14. Из этого следует, что деформация для малых профилей должна быть больше, чем для крупных. Ниже этот вопрос будет разобран дополнительно.

Высота открытого (h_o) и закрытого (h_g) фланцев. Размеры этих частей калибра определяются так же, как в разобранном выше примере. Вытяжка для h_g в чистовом калибре равна 1,055 и повышается в каждом проходе на 0,005. Вытяжка в открытом фланце для h_o принимается в чистовом калибре, равной единице, как в разобранном выше примере. В каждом последующем калибре она уменьшается на 0,0025.

Высота фланцев V_o и V_g. Высота фланцев V_o и V_g приведена в графе 11 табл. 47. При определении их исходят из тех же закономерностей, что для разобранного выше примера калибровки балки № 12, приведенного в табл. 46. Высота фланцев в первом калибре на 10 *мм* больше, чем в чистовом.

Общая высота калибра H. Величина H равна сумме $h_o + h_g$. Величина коэффициента вытяжки (графа 8 табл. 47) изменяется очень незначительно, слегка повышаясь по мере приближения к исходному профилю. Высота исходного квадрата равна 1,65 H.

Размеры фланцев A и a. Размеры калибра A и a определяются на основании того, что величина Z равна для A_0 в чистовом калибре — 1,11, в предчистовом — 1,22. Соответственно, Z для A_g в чистовом калибре равна 1,03, в предчистовом 1,08; для a_0 в чистовом калибре — 1,14, в предчистовом — 1,25; для a_g в чистовом калибре 1,01 и в предчистовом 1,06. В прочих калибрах коэффициент равномерно повышается в каждом проходе на 0,01 по сравнению с предыдущим калибром.

Профили калибров с № 1 по 11 приведены на рис. 167.

Определение числа проходов при прокатке двутавровых профилей

Число проходов, применяемое при прокатке двутавровых балок, не может быть неизменным для всех встречающихся на практике случаев. Оно зависит от величины исходной заготовки, скорости прокатки, температуры прокатываемого металла, конструкции стана и мощности двигателя. В справочнике Прокатчика [1] имеются подробные данные о числах проходов, применяемых на различных прокатных станах.

Ниже приводятся средние данные:

Номер балки	8—10	12—14	16—30	32—60
Число проходов	5—7	7—9	7—11	9—13

Применение бо́льших обжатий позволяет достигнуть более выгодных показателей при прокатке. При прокатке фасонных профилей выгодно работать на чистовой линии с минимально возможной вытяжкой для того, чтобы получить конечный профиль

[1] Handbuch des Walzwerkwesens, Band, II, s. 278—79.

Таблица 47

Калибровка двутавровой балки № 50 в 11 проходов

№ прохода	№ калибра	Размеры калибров и их относительное увеличение															
		для ширины и толщины шейки				для высоты фланцев					для толщины фланцев					для скругления между шейкой и фланцем	
		B мм	Δb мм	s мм	Z_s	H мм	Z_H	h_o, h_g мм	Z_h	фланцы V мм	A_o, A_g мм	Z_A	a_o, a_g мм	Z_a	R_o, R_g мм	Z_R
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
0	0	380	—	310	—	310	—	155 155	— —	— —	— —	— —	— —	— —	— —	— —
1	I	388	8	100	3,1	288,5	1,07	*o* 145 *g* 143,5	1,07 1,08	*o* 95 *g* 93,5	*o* 154 *g* 160	— —	*o* 101 *g* 105	— —	*o* 120 *g* 130	— —
2	II	404	16	73	1,38	272	1,06	*g* 132 *o* 140	1,10 1,0225	*g* 95,5 *o* 103,5	*g* 132 *o* 123	1,16 1,30	*g* 88,6 *o* 78,5	1,14 1,33	*g* 120 *o* 130	1,30 1,20
3	III	419	15	54,5	1,34	257	1,06	*o* 129 *g* 128	1,020 1,095	*o* 101,75 *g* 100,75	*o* 102,5 *g* 107	1,29 1,15	*o* 67,1 *g* 69,5	1,32 1,13	*o* 100 *g* 100	1,20 1,30
4	IV	433	14	42	1,30	244,5	1,05	*g* 118,5 *o* 126	1,090 1,0175	*g* 97,5 *o* 105	*g* 90 *o* 83,6	1,14 1,28	*g* 60 *o* 53	1,12 1,31	*g* 78 *o* 83	1,30 1,20
5	V	446	13	33,2	1,26	232	1,05	*o* 116 *g* 116	1,0150 1,085	*o* 99,4 *g* 99,4	*o* 70,7 *g* 74	1,27 1,13	*o* 46,1 *g* 47,8	1,30 1,11	*o* 65 *g* 65	1,20 1,30
6	VI	458	12	27,2	1,22	223	1,04	*g* 108 *o* 115	1,080 1,0125	*g* 94,4 *o* 101,4	*g* 63,1 *o* 58,8	1,12 1,26	*g* 42 *o* 37	1,10 1,29	*g* 50 *o* 54	1,30 1,20
7	VII	469	11	23	1,18	214	1,04	*o* 107 *g* 107	1,010 1,075	*o* 95,5 *g* 95,5	*o* 50,5 *g* 53	1,25 1,11	*o* 32,8 *g* 34	1,28 1,09	*o* 42 *g* 42	1,20 1,30
8	VIII	479	10	20,2	1,14	205,8	1,04	*g* 100 *o* 105,8	1,070 1,0075	*g* 89,9 *o* 95,7	*g* 46 *o* 42,8	1,10 1,24	*g* 30,3 *o* 26,8	1,08 1,27	*g* 32 *o* 35	1,30 1,20
9	IX	488	9	18,4	1,10	198,6	1,03	*o* 99,3 *g* 99,3	1,0050 1,065	*o* 90,1 *g* 90,0	*o* 37,4 *g* 39,2	1,23 1,09	*o* 24,1 *g* 25	1,26 1,07	*o* 27 *g* 27	1,20 1,30
10	X	496	8	17,3	1,06	192,5	1,03	*g* 93,7 *o* 98,8	1,06 1,0025	*g* 85,05 *o* 90,15	*g* 34,6 *o* 32,2	1,08 1,22	*g* 22,7 *o* 20,0	1,06 1,25	*g* 21 *o* 21,5	1,30 1,20
11	XI	502,5	6,5	17	1,02	187,4	1,03	*o* 93,7 *g* 93,7	1,0 1,055	*o* 85,2 *g* 85,2	*o* 31,2 *g* 31,2	1,11 1,03	*o* 19,9 *g* 19,9	1,14 1,01	*o* 18 *g* 18	1,15 1,25

Примечание. *o* — открытая часть калибра; *g* — закрытая часть калибра.

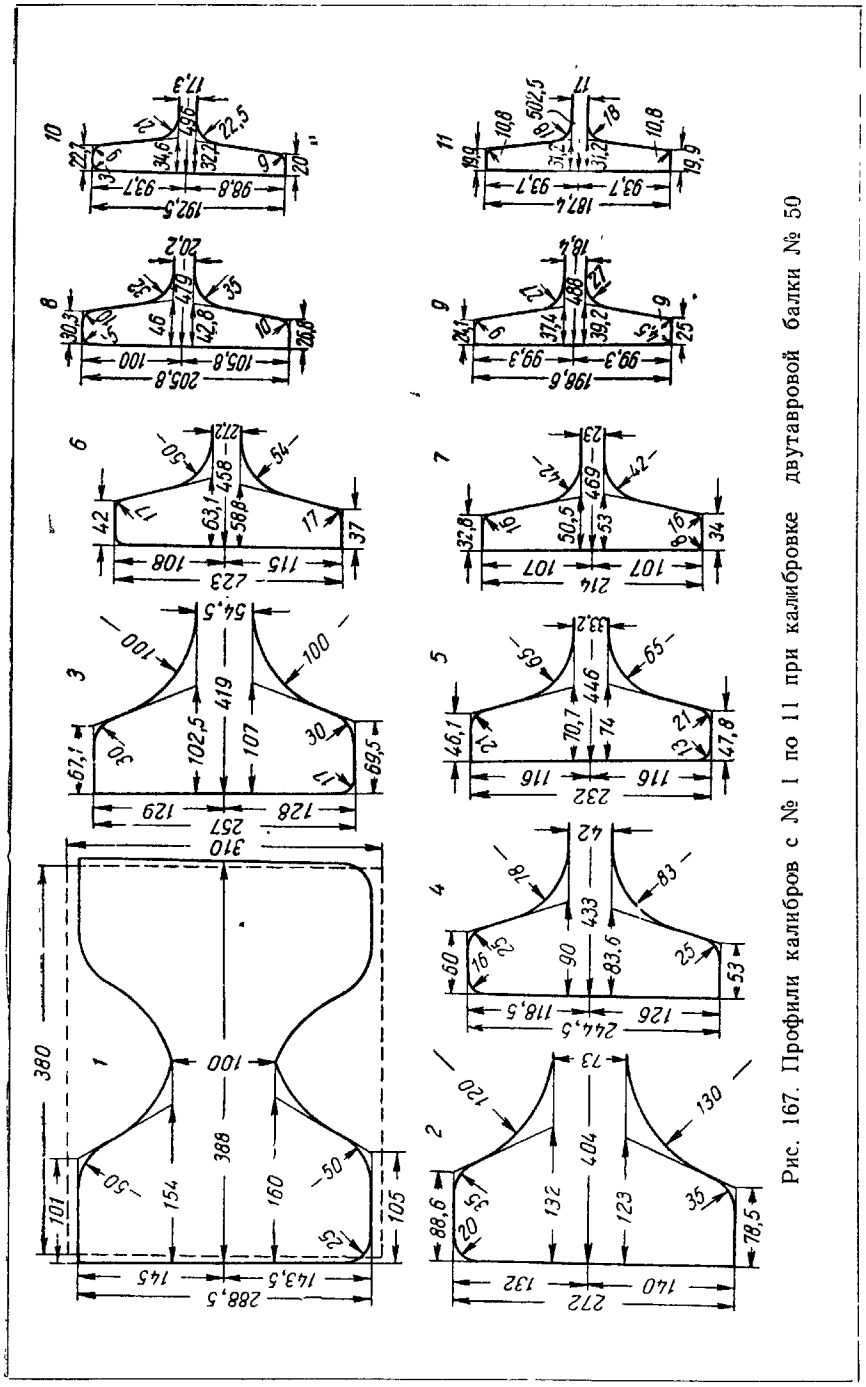


Рис. 167. Профили калибров с № 1 по 11 при калибровке двутавровой балки № 50

при минимальном числе фасонных калибров. Отсюда следует, что время прокатки на обжимной или черновой линии должно соответствовать времени прокатки на чистовой линии. При прокатке прямоугольных сечений можно применять бо́льшие обжатия, а деформация металла распространяется равномерно по всему сечению, и металл лучше прорабатывается. Это оказывает благоприятное воздействие на механические свойства металла конечного профиля.

Большое влияние на определение числа проходов имеют положения, касающиеся износа валков. Износ достигает минимальной величины для каждого данного профиля при определенном оптимальном числе проходов. При слишком малом числе проходов возникают чрезмерно большие вытяжки за каждый проход, что увеличивает износ валков. Наоборот, при слишком большом числе проходов износ валков возрастает вследствие снижения температуры металла.

Изменение коэффициента обжатия и вытяжки по проходам при прокатке двутавровых балок

Из сказанного выше следует, что коэффициенты обжатия меняются от прохода к проходу. Ниже показано, каковы закономерности этого изменения при калибровке балки № 12, согласно табл. 46.

Из рис. 168 видно, что величина коэффициентов обжатия для шейки и фланцев по ходу прокатки уменьшается. Особенно сильно уменьшается коэффициент обжатия для шейки. Для фланцев это снижение значительно меньше, и, наконец, еще меньше оно в открытых частях калибра. Зависимость коэффициента Z, начиная со второго прохода, является прямолинейной; в первом проходе коэффициент Z для шейки должен быть особенно большим, так как в нем производится клиновидный надрез прокатываемой заготовки, однако общая вытяжка остается малой, поскольку фланцы не обжимаются. На рис. 169 показано изменение коэффициентов частного обжатия Z фланцев по толщине в зависимости от числа проходов. Кривые снижаются равномерно и прямолинейно по мере хода прокатки и понижения температуры металла. Только в последнем проходе прямолинейный характер кривых нарушается, и обжатие резко снижается, что необходимо для уменьшения износа в чистовом калибре и получения профиля точных размеров. Коэффициенты обжатия по толщине в открытых частях калибра значительно выше, чем в закрытых. Большее обжатие по толщине в открытых частях калибра возникает вследствие деформации металла между поверхностями двух валков.

Для сопоставления величины коэффициентов обжатия шейки и фланцев на рис. 170 показаны отношения между соответствую-

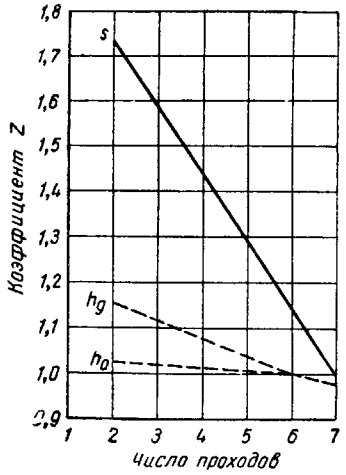


Рис. 168. Изменение коэффициентов обжатия шейки по толщине и фланцев по высоте по проходам

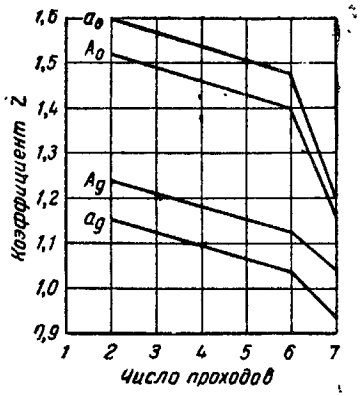


Рис. 169. Изменение коэффициентов обжатия фланцев по толщине по проходам (A_0, a_0, A_g, a_g)

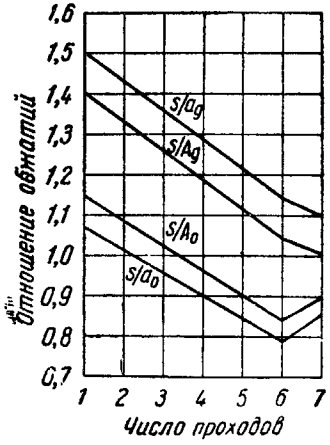


Рис. 170. Соотношения обжатий по толщине шейки и фланцев:
1 — отношение обжатий; 2 — число проходов

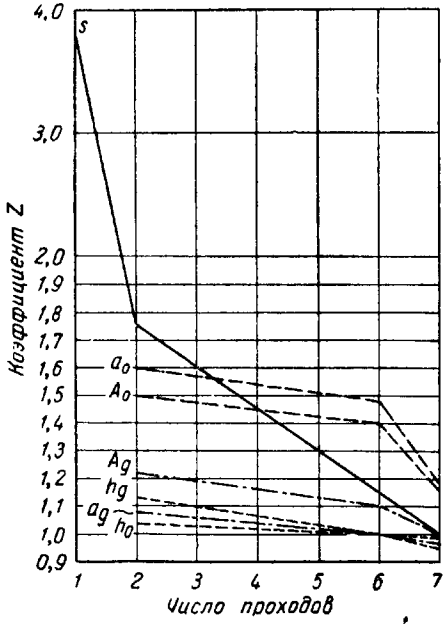


Рис. 171. Изменение величины коэффициента Z для различных частей профиля в зависимости от числа проходов

щими величинами в графическом виде. Величины всех коэффициентов по ходу прокатки снижаются равномерно до последнего прохода по упомянутой выше причине. Для значений, бо́льших единицы, обжатие шейки больше, чем обжатие в сравниваемой части калибра. Для значений, меньших единицы, имеется обратная картина. Из этого следует, что в первых проходах (считая от начала прокатки) деформация шейки больше, чем деформация фланцев, а в последних проходах наоборот — больше деформация фланцев. Такое положение объясняется тем, что если при прокатке двутавровых балок (в особенности балок с тонкой шейкой и высокими фланцами) в последних проходах шейка будет подвергаться большему обжатию по сравнению с фланцами, то она окажется в направленном сжатом состоянии, так как она не может тянуть за собой бо́льшие по сечению фланцы. В результате на шейке могут возникнуть волны. Поэтому рекомендуется при калибровке балок с тонкой шейкой и высокими фланцами в двух последних калибрах, в особенности в последнем калибре, не иметь обжатия шейки. Однако вследствие того, что в предыдущем проходе за счет пружинения клети толщина шейки получалась большей, чем рассчитано по калибровке, в последнем проходе все же возникает вытяжка, соответствующая вытяжке фланцев. При этом напряжения в металле шейки уменьшаются либо совершенно исчезают, для чего в первых проходах шейка должна прокатываться с большими обжатиями, нежели фланцы. В первых проходах также облегчаются температурные напряжения вследствие более высоких температур и наличия больших и равномерно распределенных масс в сечении профиля.

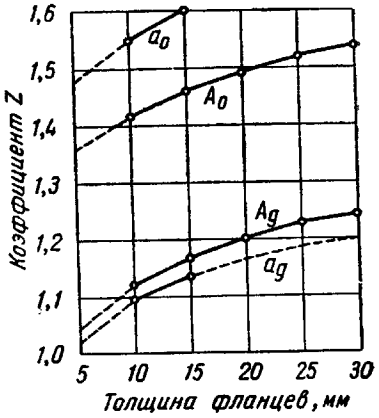


Рис. 172. Коэффициенты Z для толщины фланцев при калибровке двутавровой балки № 12

На рис. 171 приведены кривые коэффициента обжатия в различных частях профиля в зависимости от числа проходов. При прокатке двутавровых балок наиболее важными являются обжатие шейки по толщине и уменьшение толщины фланцев. Из рис. 171 видно, что по мере хода прокатки величина всех коэффициентов Z постепенно снижается. Это закономерное изменение коэффициентов влечет за собой изменение размеров всех частей калибра (рис. 172).

Для кривых, изображенных на рис. 169—171, можно соста-

вить простые уравнения и таким образом представить изменение коэффициентов Z с ходом прокатки в аналитической форме. В формулах x обозначает число проходов, причем счет проходов соответственно калибровке начинается от чистового калибра.

Для калибровки двутавровой балки № 12 уравнения имеют следующий вид:

$$s_x = 1{,}03 + (x - 1)\,0{,}14;$$
$$h_{g_x} = 1{,}16 + (x - 1)\,0{,}01;$$
$$h_{o_x} = 1{,}00 + (x - 1)\,0{,}03;$$
$$A_{o_x} = 1{,}40 + (x - 2)\,0{,}93;$$
$$A_{g_x} = 1{,}12 + (x - 2)\,0{,}03;$$
$$a_{o_x} = 1{,}48 + (x - 2)\,0{,}03;$$
$$a_{g_x} = 1{,}03 + (x - 2)\,0{,}03.$$

Для калибровки двутавровой балки № 50 уравнения имеют следующий вид:

$$s_x = 1{,}02 + (x - 1)\,0{,}04;$$
$$h_{g_x} = 1{,}055 + (x - 1)\,0{,}005;$$
$$h_{o_x} = 1{,}00 + (x - 1)\,0{,}0025;$$
$$A_{o_x} = 1{,}22 + (x - 2)\,0{,}01;$$
$$A_{g_x} = 1{,}08 + (x - 2)\,0{,}01;$$
$$a_{o_x} = 1{,}25 + (x - 2)\,0{,}01;$$
$$a_{g_x} = 1{,}06 + (x - 2)\,0{,}01.$$

Приведенные выражения показывают, что для проведения калибровки двутавровой балки необходимо соблюдение строгих правил. Однако практикой доказано, что правильный профиль может быть также прокатан по калибровке, построенной без соблюдения приведенных выше правил, так как при некоторых обстоятельствах отступления от правил становится неизбежными.

Не следует отступать от указанных правил без необходимости.

Из приведенных выше уравнений для калибровки двутавровых балок № 12 и 50 следует, что малые профили подвергаются большей деформации, чем крупные профили: иначе при прокатке малых профилей будет иметь место слишком быстрое охлаждение, повышенные деформации крупных профилей в некоторых случаях могут вызвать перегрузку двигателя.

Величина коэффициентов обжатия изменяется, конечно, в зависимости от числа проходов и от сечения прокатываемого профиля. Отсюда возникает необходимость для каждого профиля применять коэффициенты надлежащей величины. Отправные величины приведены в табл. 48 и 49, из которых видно, что для малых профилей применяются большие коэффициенты, обжатия, чем для больших. Исключение составляют коэффициенты обжатия для конца фланца в закрытой части калибра (a_g), которая для малых профилей принимается меньшей по сравнению с крупными во избежание образования заусенца.

Таблица 48

Коэффициент обжатия в чистовом калибре при прокатке двутавровых балок (основные величины)

№ профиля	Толщина шейки	Высота калибра		Толщина фланцев				Закругление между шейкой и фланцем	
	s	h_g	h_o	A_o	A_g	a_o	a_g	R_o	R_g
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
60	1,02	1,05	1,0	1,10	1,03	1,13	1,02	1,10	1,20
50	1,02	1,06	1,0	1,10	1,03	1,14	1,01	1,15	1,25
40	1,02	1,09	1,0	1,10	1,03	1,14	1,01	1,20	1,25
30	1,03	1,10	1,0	1,11	1,03	1,15	1,00	1,20	1,30
24	1,03	1,11	1,0	1,12	1,04	1,15	1,00	1,25	1,35
20	1,03	1,14	1,0	1,13	1,04	1,16	0,95	1,25	1,40
12	1,03	1,16	1,0	1,15	1,04	1,18	0,93	1,30	1,45
10	1,05	1,20	1,0	1,18	1,06	1,20	0,91	1,35	1,50
8	1,10	1,30	1,0	1,22	1,08	1,25	0,90	1,40	1,55

В табл. 49 в скобках поставлены числа, показывающие равномерное возрастание коэффициентов обжатия от прохода к проходу. В табл. 50 и 51 даны величины вытяжек и относительного обжатия для калибровок, представленных в табл. 46 и 47.

В табл. 52 и 53 представлены размеры калибров при прокатке двутавровой балки № 50.

При вычислении этих данных уклонами и закруглениями пренебрегли. Деление профиля принято по Брово и Кирхбергу (см. рис. 174, *а*).

Изменение относительного обжатия по сечению профиля в ходе прокатки графически представлено на рис. 173. В первых проходах по описанным выше причинам обжатие шейки больше, чем обжатие фланцев. В последних проходах обжатие фланцев больше, чем обжатие шейки. Из рисунка видно также, что обжатие в открытых частях калибра неизменно больше, чем в закрытых. Поэтому целесообразно при расчете вытяжек частей профиля, которые должны обрабатываться в закрытых частях калибра, придерживаться увеличенного коэффициента устойчивости, что,

Таблица 49

Коэффициенты для калибровки двутавровой балки (основные величины)

№ профиля	Толщина шейки	Полувысота калибра			Толщина фланцев				Закругление между шейкой и фланцем	
	s_x	h_{g_x}	h_{o_x}	A_{o_x}	A_{g_x}	a_{o_x}	a_{g_x}	R_o	R_g
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
60	1,02+(0,04)	1,05+(0,004)	1,0+(0,004)	1,18+(0,01)	1,08+(0,01)	1,20+(0,01)	1,06+(0,01)	1,15	1,25
50	1,02+(0,04)	1,06+(0,004)	1,0+(0,004)	1,20+(0,01)	1,08+(0,01)	1,23+(0,01)	1,05+(0,01)	1,20	1,30
40	1,02+(0,06)	1,09+(0,005)	1,0+(0,005)	1,23+(0,01)	1,08+(0,01)	1,26+(0,01)	1,03+(0,01)	1,25	1,30
30	1,03+(0,07)	1,10+(0,005)	1,0+(0,005)	1,27+(0,02)	1,08+(0,02)	1,30+(0,02)	1,02+(0,02)	1,25	1,35
24	1,03+(0,08)	1,11+(0,008)	1,0+(0,008)	1,30+(0,02)	1,10+(0,02)	1,35+(0,02)	1,01+(0,02)	1,30	1,40
20	1,03+(0,09)	1,14+(0,01)	1,0+(0,01)	1,35+(0,03)	1,10+(0,03)	1,40+(0,03)	1,01+(0,03)	1,30	1,45
12	1,03+(0,14)	1,16+(0,01)	1,0+(0,01)	1,40+(0,03)	1,12+(0,03)	1,48+(0,03)	1,00+(0,03)	1,35	1,50
10	1,05+(0,20)	1,20+(0,01)	1,0+(0,01)	1,45+(0,04)	1,15+(0,05)	1,55+(0,05)	0,95+(0,05)	1,40	1,55
8	1,10+(0,45)	1,30+(0,02)	1,0+(0,02)	1,55+(0,06)	1,20+(0,06)	1,85+(0,06)	0,90+(0,06)	1,45	1,60
	$a+(x-1)\cdot b$ (от чистового калибра)			$a+(x-2)\,b$ (от предчистового калибра)				от предчистового калибра	

Таблица 50

Величина вытяжки при калибровке двутавровой балки № 12 в 7 проходов (ср. табл. 46) при делении профиля по Брово

№ прохода	№ калибра	Для площади шейки			Для площади двух фланцев			Для общей площади		
		площадь *мм*²	обжатие %	вытяжка	площадь *мм*²	обжатие %	вытяжка	площадь *мм*²	обжатие %	вытяжка
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0	0	—	—	—	—	—	—	10800	—	—
1	I	2815	—	—	*o*2150 *g*2340	—	—	7305	32,5	1,48
2	II	1750	37,9	1,61	*g*1610 *o*1670	*g*25,1 *o*28,5	*g*1,34 *o*1,40	5030	31	1,45
3	III	1162	33,1	1,50	*o*1120 *g*1240	*o*30,5 *g*26	*o*1,44 *g*1,35	3522	29,8	1,425
4	IV	845	27,5	1,38	*g*840 *o*845	*g*25,5 *o*32	*g*1,34 *o*1,47	2530	28	1,39
5	V	668	21,3	1,27	*o*575 *g*649	*o*31,5 *g*23	*o*1,46 *g*1,305	1892	25,2	1,34
6	VI	590	11,5	1,13	*g*456 *o*455	*g*20,6 *o*29,5	*g*1,26 *o*1,42	1501	20,5	1,26
7	VII	575	2,5	1,02	*o*394 *g*394	*o*14,0 *g*13,9	*o*1,16 *g*1,159	1363	9	1,1

Примечание. *o* — открытая часть калибра. *g* — закрытая часть калибра.

правда, увеличивает опасность заклинивания; впрочем, эти части сечения вытягиваются с прочими частями профиля, и связанная с этим утяжка противодействует возможности заклинивания металла в калибре.

Определение вытяжки отдельных частей профиля затруднено, так как неясен вопрос о разграничении упомянутых участков профиля. Брово и Кирхберг считают ширину шейки равной полной ширине профиля (рис. 174, *а*). Тафель, напротив, считает ширину шейки равной расстоянию между фланцами (рис. 174, *б*) и указывает, что распределение Брово неправильно [60], так как участки профиля, заштрихованные на рис. 175, получая такое же обжатие по высоте, как и шейка, в то же время по деформации тесно связаны с прилегающими фланцами. Однако против мнения Тафеля можно возразить, что он не учитывает влияния шейки на расположенные рядом участки профиля.

Табл. 54 дает представление о том, как относится обжатие отдельных частей профиля к общему обжатию всего профиля.

Оба метода дают, естественно, различные данные для вытяжек или относительного обжатия разных участков профиля (см. табл. 50 и 55). Наглядно это видно из рис. 173 и 176. На одном

Таблица 51

Величина вытяжки при калибровке двутавровой балки № 50 в 11 проходов (ср. табл. 47) при делении профиля по Брово

№ прохода	№ калибра	Для площади шейки			Для площади двух фланцев			Для общей площади		
		площадь мм²	обжатие %	вытяжка	площадь мм²	обжатие %	вытяжка	площадь мм²	обжатие %	вытяжка
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0	0	—	—	—	—	—	—	118 000	—	—
1	I	38 000	—	—	o24200 g24350	—	—	87 350	25	1,34
2	II	29 500	24	1,315	g21000 o20800	g13 o15	g1,15 o1,17	71 300	18	1,22
3	III	22 800	22,5	1,29	o17200 g17750	o18 g15,2	o1,22 g1,18	57 750	19	1,24
4	IV	18 200	20	1,25	g14600 o14380	g15,2 o19,2	g1,18 o1,24	47 180	18,5	1,23
5	V	14 800	18,8	1,23	o11600 g12080	o20,5 g15,5	o1,26 g1,19	38 480	18	1,22
6	VI	12 450	15,9	1,19	g9900 o9700	g15 o19,9	g1,17 o1,25	32 050	15	1,19
7	VII	10 800	13,0	1,155	o7990 g8305	o19,6 g15	o1,24 g1,17	27 095	16	1,19
8	VIII	9 700	10,2	1,115	g6760 o6690	g15 o19,6	g1,17 o1,24	23 150	14,5	1,17
9	IX	9 000	7,3	1,08	o5540 g5800	o17 g13	o1,22 g1,15	20 340	12,7	1,142
10	X	8 600	4,4	1,045	g4890 o4720	g12 o18,6	g1,14 o1,22	18 410	9,5	1,105
11	XI	8 543	0,5	1,02	o4360 g4360	o10,5 g7,5	o1,12 g1,08	17 263	6	1,065

Примечание. *o* — открытая часть калибра; *g* — закрытая часть калибра.

из них деление профиля на части произведено по Брово, на другом — по Тафелю.

Вернемся еще раз к рис. 173. Кривые изменяются вполне равномерно, как и следует ожидать при правильно построенной калибровке: падение величин коэффициентов обжатия наблюдается в последнем, седьмом проходе, который является полировочным, и отличается малыми обжатиями. Величина общего коэффициента обжатия, разумеется, является промежуточной между величинами обжатий для отдельных участков профиля. В первых

проходах при делении профиля по Брово несоразмерно снижается величина обжатия в открытых частях калибра. Объяснение этому будет дано впоследствии. Примем по рис. 177, что высота

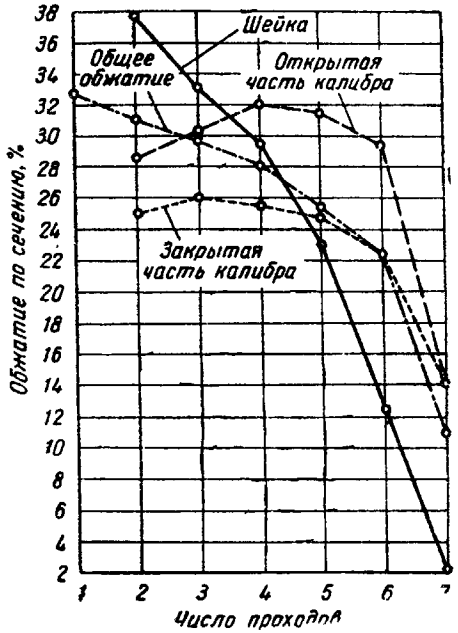


Рис. 173. Величина уменьшения сечения в % при калибровке двутавровой балки № 12 (табл. 46, деление профиля по Брово)

открытого фланца h_0 и толщина фланцев остаются без изменения, в то время как шейка становится тоньше, а выступ фланца

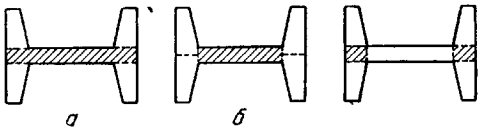


Рис. 174. Деление профиля: *а* — по Брово; *б* — по Тафелю

Рис. 175. Заштрихованные участки сечения

выше, что дает по Брово отрицательную величину для вытяжки, а по Тафелю величину, равную единице. Правильно говорит Крамер: «при делении профиля по Брово в этом случае возникают неправильные величины, для которых относительное обжатие для шейки и подошвы будет различным». Это встречается в осо-

Таблица 52

Калибровка двутавровой балки № 50 в 11 проходов. Изменение калибров с I до III по сравнению с табл. 47

№ прохода	№ калибра	Для ширины и толщины шейки					Для высоты фланцев					Для толщины фланцев				Закругление между шейкой и фланцем	
		B мм	ΔB	s мм	Z_s	H мм	Z_H	h, h_g мм	Z_h	высота мм	A_0 A_g мм²	Z_A	a_0, a_g мм²	Z_a	R_0, R_g мм	Z_R
0	0	380	—	310	—	310	—	155 155	—	—	—	—	—	—	—	—
1	I	388	8	105	2,95	288,5	1,07	o145 g143,5	1,07 1,08	o92,5 g91,0	o154 g160	—	o101 g105	—	o пар g пар	—
2	II	404	16	72	1,46	272	1,06	g132 o140	1,10 1,0225	g96 o104	g132 o123	1,16 1,30	g88,6 o78,5	1,14 1,33	g120 o130	1,30 1,20
3	III	419	15	54,5	1,32	257	1,06	o129 g128	1,020 1,095	o101,75 g100,75	o102,5 g107	1,29 1,15	o67,1 g69,5	1,32 1,13	o100 g100	1,20 1,30

Примечания: 1. *o* — открытая часть калибра; *g* — закрытая часть калибра
2. Для калибров с IV по XI размеры те же, что в табл. 47.

Таблица 53

Величина вытяжек при калибровке двутавровой балки № 50 в калибрах с 1 по III согласно табл. 52

№ прохода	№ калибра	Для площади шейки			Для площади двух фланцев			Общая площадь		
		площадь мм²	обжатие %	вытяжка	площадь мм²	обжатие %	вытяжка	площадь мм²	обжатие %	вытяжка
0	0	—	—	—	—	—	—	118 000	—	—
1	I	40 800	—	—	o23600 g24100	— —	— —	88 500	25,0	1,33
2	II	29 100	28,5	1,40	g21100 o21000	10,5 13,0	1,12 1,15	71 200	19,5	1,24
3	III	22 800	22,0	1,28	o17200 g17750	19,0 16,1	1,235 1,195	57 750	19,0	1,24

Примечание. Величины для калибров с IV по XI те же, что в табл. 51.

Таблица 54

Обжатие частей профиля в сравнении с обжатием всего профиля при калибровке по табл. 46
Деление профиля по Брово

№ калибра	Шейка	Фланцы	
		открытая часть	закрытая часть
I	—	—	—
II	1,34	0,88	0,74
III	1,17	1,02	0,81
IV	0,96	1,19	0,85
V	0,79	1,37	0,89
VI	0,51	1,64	1,0
VII	0,26	1,56	1,54

Таблица 55

Величина вытяжек при калибровке двутавровой балки № 12 (ср. табл. 46)
Деление профиля по Тафелю

№ прохода	№ калибра	Шейка			Два фланца			Общая площадь		
		площадь мм²	обжатие %	вытяжка λ	площадь мм²	обжатие %	вытяжка λ	площадь мм²	обжатие %	вытяжка λ
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0	0	—	—	—	—	—	—	10 800	—	—
1	I	481	—	—	o 3294 g 3530	— —	— —	7 20[illegible]	32,5	1,48
2	II	769	60	0,64	g 2115 o 2146	35,5 39,4	g 1,55 o 1,65	5 03[illegible]	31	1,45
3	III	703	8,3	1,09	o 1344 g 1475	36,3 31,3	o 1,57 g 1,455	3 52[illegible]	29,8	1,425
4	IV	604	14	1,162	g 964 o 962	28,4 34,9	g 1,395 o 1,535	2 53[illegible]	28	1,39
5	V	524,5	13,15	1,15	o 645 g 722,5	33,1 25,0	o 1,495 g 1,333	1 892	25,2	1,34
6	VI	491	6,4	1,07	g 507 o 503	21,5 30,4	g 1,273 o 1,436	1 501	20,5	1,26
7	VII	487,8	0,65	1,005	g 437,6 o 437,6	13,7 17,0	o 1,16 g 1,15	1 363	9	1,1

Примечание. *o* — открытая часть калибра; *g* — закрытая часть калибра.

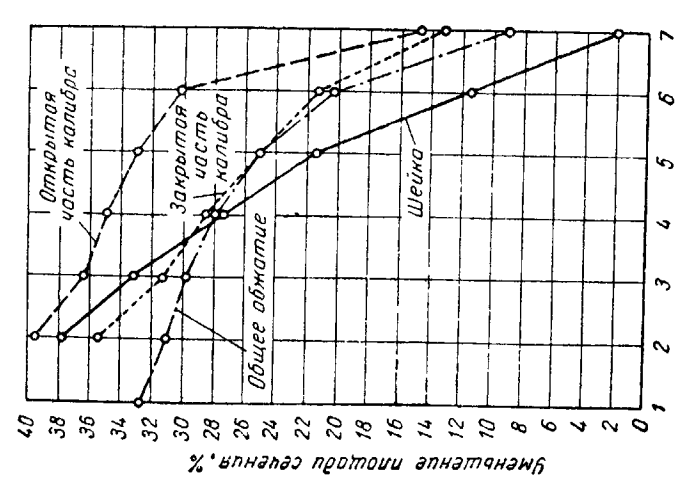


Рис. 179. Величина уменьшения сечения (в %) при калибровке двутавровой балки № 12 по табл. 46; деление профиля по Крамеру (см. табл. 56)

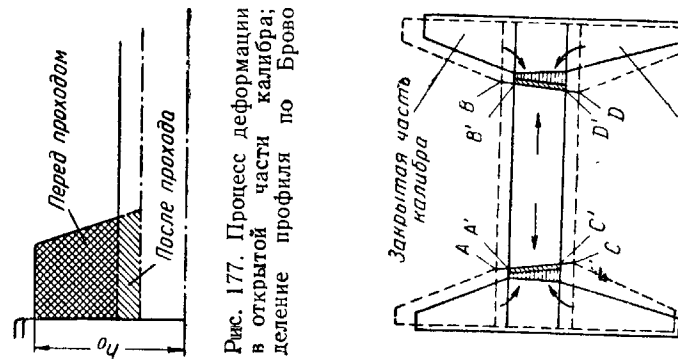


Рис. 177. Процесс деформации в открытой части калибра; деление профиля по Брово

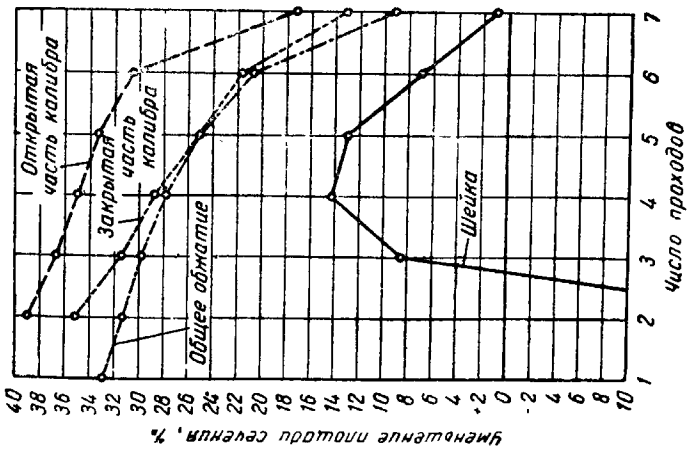


Рис. 178. Процесс деформации в двутавровом калибре

Рис. 176. Величина уменьшения сечения (в %) при калибровке двутавровой балки № 12 по табл. 46; деление профиля по Брово (см. табл. 55)

бенности для фланцев, прокатываемых в открытых частях калибра в первом проходе, считая от исходного профиля. Таким образом, по Брово получаются маленькие значения для обжатия в открытых частях калибра, особенно в первых калибрах.

Рассмотрим теперь рис. 176, на котором графически изображены обжатия частей профиля в зависимости от числа проходов (соответственно табл. 55) при делении профиля по Тафелю.

Кривые и в этом случае изменяются равномерно. Однако обжатие шейки во всех проходах получается меньшим, чем общее обжатие и обжатие фланцев, а в первом и втором проходах обжатие шейки имеет даже отрицательное значение. По Крамеру это может быть объяснено следующим образом: при деформации в калибре, как представлено на рис. 178 (деление профиля на части по Тафелю), шейка *ABCD* не только заполняет площадь *ABCD*, но и прежде всего обеспечивает возможность уширения шейки, заполняя как площади, обозначенные косой штриховкой, так и площади, отмеченные горизонтальной штриховкой. Поэтому при делении по Тафелю получается маленькое обжатие шейки. В действительности, однако, участки, отмеченные косой штриховкой, пополняются металлом не только за счет шейки, но и за счет фланцев, как показано стрелками на рис. 178. При делении профиля по Тафелю для случая, разобранного выше (калибровка двутавровой балки № 12), получается, что обжатия в открытых частях калибра больше, чем в закрытых. Из рис. 173 и 176 видно, что при делении профиля по Тафелю для обжатия шейки получаются слишком малые величины. Исходя из этого, Крамер предлагает для вычисления вытяжки фланцев применять деление профиля по Тафелю, а для определения вытяжки шейки — по Брово (рис. 179, табл. 56). Однако в этом случае площади, обозначенные на рис. 175 штриховкой, будут учитываться дважды: один раз при расчете вытяжки шейки, другой раз при расчете вытяжки фланцев. Поэтому на рис. 179 в первых проходах частные обжатия различных частей профиля получаются больше, чем общее суммарное обжатие, что, конечно, невозможно.

Из сказанного выше следует, что разделение частей профиля и определение их вытяжек или обжатий не может быть совершенно бесспорно и твердо установлено. Все же при расчете обжатий отдельных частей профилей принято деление профиля на части по Брово.

Углы наклона фланцев для открытых и закрытых частей калибра при калибровке двутавровой балки № 12 приведены в табл. 57. Из графика на рис. 180 видно, во-первых, что угол наклона уменьшается по мере хода прокатки, а во-вторых, что для открытой части калибра он меньше, чем для закрытой. Это делается для облегчения заполнения закрытых частей калибра металлом и предупреждения заклинивания металла в калибре.

Таблица 56

Величина вытяжек при калибровке двутавровой балки № 12 согласно табл. 46.

Деление профиля по Крамеру

№ прохода	Шейки		Фланцы				Общее	
			закрытый калибр		открытый калибр			
	обжатие %	вытяжка λ	обжатие %	вытяжка λ	обжатие %	вытяжка λ	обжатие %	вытяжка λ
1	—	—	—	—	—	—	32,5	1,48
2	37,9	1,61	35,5	1,55	39,4	1,65	31,0	1,45
3	33,1	1,50	31,3	1,455	36,3	1,57	29,8	1,425
4	27,5	1,38	28,3	1,395	34,9	1,535	28,0	1,39
5	21,3	1,27	25,0	1,333	33,1	1,495	25,2	1,34
6	11,5	1,13	21,5	1,273	30,4	1,436	20,5	1,26
7	2,0	1,02	13,15	1,15	14,6	1,171	9,0	1,10

Таблица 57

Величина угла наклона фланцев α при калибровке двутавровой балки № 12 согласно табл. 46

№ калибра	В закрытой части калибра				В открытой части калибра			
	$A_g - a_g$	V_g	$\operatorname{tg} \alpha_g$	α_g град — мин	$A_o - a_o$	V_o	$\operatorname{tg} \alpha_o$	α_o град.— мин.
I	18	37,8	0,475	25—25	17	37,80	0,450	24—15
II	12,45	34,75	0,358	19—40	12,6	41,55	0,303	16—50
III	9,45	36,30	0,261	14—40	8,8	36,30	0,241	13—30
V	6,70	31,30	0,214	12—05	7,0	36,70	0,190	10—45
IV	5,45	31,40	0,174	9—55	5,0	31,40	0,159	9—05
VI	4,00	26,90	0,148	8—25	4,2	31,60	0,133	7—35
VII	3,60	27,00	0,138	7—35	3,6	27,00	0,133	7—35

3. КАЛИБРОВКА ШВЕЛЛЕРА

После изложения общих соображений о калибровке фасонных профилей разберем основные правила для калибровки швеллера, причем в качестве примера выбран швеллер № 20.

Калибровка швеллера № 20 в 7 проходов

Калибровку проектируют подобно калибровке двутавровой балки, начиная с чистового профиля и кончая исходной заготовкой. Для того чтобы обеспечить получение большего количества

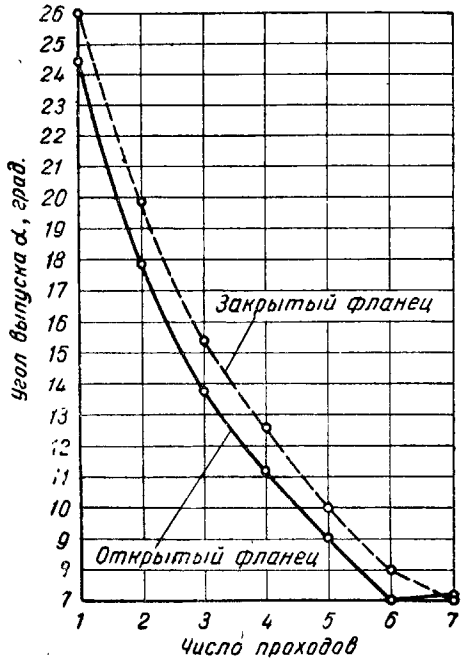


Рис. 180. Величина выпуска фланцев α при калибровке двутавровой балки № 12 по данным табл. 46 (см. табл. 57)

$$\left(\operatorname{tg} \alpha = \frac{A - a}{V}\right)$$

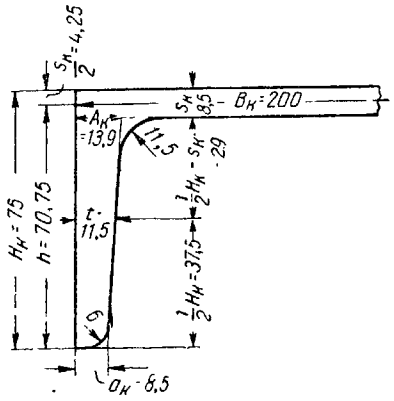


Рис. 181. Конечный профиль

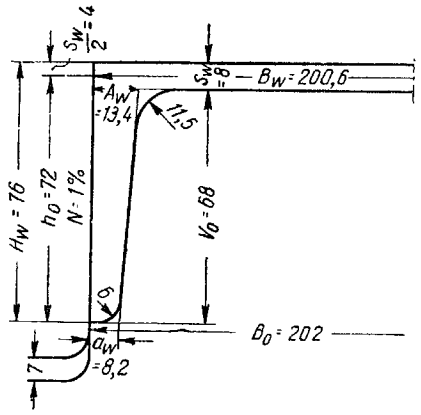


Рис. 182. Чистовой калибр для швеллера № 20

прокатанного металла между переточками валков, чистовому калибру придают следующие размеры:

$$B = 1{,}013\,B_к \text{ за вычетом допуска;}$$
$$H = 1{,}013\,H_к;$$
$$s = s_к - 6\%;$$
$$A = A_к - 3\%;$$
$$a = a_к - 3\%.$$

Конечный профиль представлен на рис. 181, а на рис. 182 — чистовой калибр. Последний проход, так же как при прокатке

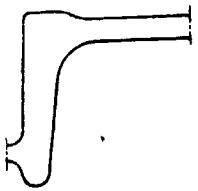


Рис. 183. Ребровой калибр для швеллера; старый метод

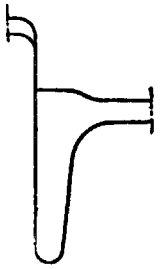


Рис. 184. Ребровой калибр для швеллера; новый метод

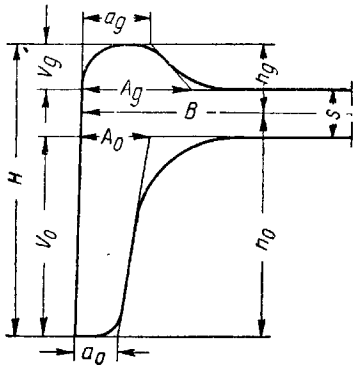


Рис. 185. Обозначение размеров калибра для швеллера: H — полная высота профиля; V_0 — высота фланца; V_g — высота фланца; B — ширина калибра по центру шейки; h_g — высота калибра; h_0 — высота калибра

двутавровой балки, является полировочным. Как правило, швеллер прокатывают с фланцами, направленными вниз, что делается для облегчения стока охлаждающей воды и удаления окалины. Чистовой калибр выполняют во всех случаях открытым, таким образом, фланцы размещаются в открытых частях калибра, что позволяет уверенно получить профиль с возможно острыми углами и не имеющий заусенцев. Для получения точной высоты профиля фланцы предварительно получают вертикальное обжатие (осадку), которая производится в калибрах подобно представленным на рис. 183 и 184. Сразу после этого прохода фланцы обрабатываются большей частью в открытом калибре. Однако после этого не должно быть больше четырех последовательных проходов. Поэтому настоятельно рекомендуется после каждых четырех проходов

иметь ребровой проход. При проведении реброваго прохода в калибре, конструкция которого изображена на рис. 184; обработка ложных фланцев в течение всей прокатки швеллера происходит исключительно в закрытых частях калибров, что позволяет проводить полное сглаживание ложных фланцев без всяких затруднений. Действительные фланцы обрабатываются главным образом в открытых частях калибра, преимущественно с обжатием по толщине; надлежащая высота фланцев обеспечивается путем прокатки в одном или двух ребровых калибрах. Эти приемы применяют при малой толщине и большой высоте фланцев. Раньше осаживание фланцев производилось преимущественно в калибрах, конструкция которых показана на рис. 183, для которых необходимы широкие двойные бурты на валках. За последнее время применяют калибры по рис. 184, для которых можно применять более узкие бурты и тем самым лучше использовать длину бочки валков. Последний ребровой проход может быть последним или пред-предпоследним. Применяя калибр, показанный на рис. 184, целесообразно делать его пред- предчистовым. Если в предыдущем калибре в замке образуется шов или валик (см. рис. 187), это повлечет за собой ускоренный нежелательный износ чистового калибра, что не наблюдается, если валик, образовавшийся в пред-предчистовом калибре, будет раскатан в предчистовом.

Размеры калибров приведены ниже (табл. 58 и рис. 185).

Ширина калибра B. В последнем проходе уширение принимается примерно равным 4 *мм*. Для каждого предшествующего калибра уширение увеличивается на 1 *мм*. Исходный профиль принимается на 7 *мм* у́же, чем ширина первого калибра. В последних проходах уширение принимается меньшим, так как необходимо получить острые углы, как показано выше для двутаврового профиля.

Толщина шейки s. При определении толщины шейки начинают с коэффициента, равного для седьмого калибра 1,05 (гр. 6 табл. 58). В предыдущих проходах величина коэффициента 7 увеличивается на 0,12 за каждый проход. В первом проходе этот коэффициент принимается особенно большим, потому что в этом проходе, так же как при прокатке двутавровой балки, производится глубокий клиновидный надрез заготовки, что необходимо для того, чтобы в последующих проходах посредством энергичного обжатия шейки добиться утяжки фланцев.

Высоты калибра h_o и h_g (гр. 9 табл. 58). Коэффициент уменьшения высоты для h_o принимается для чистового прохода равным 1,55, для предчистового прохода 1,67. Дальше до исходного профиля коэффициент Z_h в каждом проходе снижается на 0,05. Указанное выше обжатие ложных фланцев снижается от прохода к проходу, несмотря на то, что эффективное обжатие в первых проходах значительно больше. Сглаживание ложных

Таблица 58

Калибровка швеллера № 20 в 7 проходов

№ прохода	№ калибра	Шейка					Высота фланцев					Толщина фланцев					Закругление	
		R мм	Δb мм	s мм	Z_s	H мм	Z_H	h_o, h_g мм	Z_h	высота фланцев V_o, V_g мм	A_o, A_g мм	Z_A	a_o, a_g мм	Z_a	R_o, R_g мм	Z_R
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
0	0	155	—	170	—	170	—	85 85	—	—	—	—	—	—	—	—
1	I	162	7	45	3,78	148	1,15	g59 o89	1,42 0,93	g36,5 o66,5	g58 o58	—	g40 o35	—	g60 o75	—
2	II	171	9	27,4	1,65	131	1,13	g40 o91	1,47 0,98	g26,3 o77,3	g49 o38,5	1,18 1,50	g31,9 o23	1,25 1,52	g45 o53	1,30 1,40
3	III	179	8	18	1,53	118,4	1,105	g26,4 o92,0	1,52 0,99	g17,4 o85,0	g42,1 o27,5	1,16 1,40	g25,9 o16,2	1,23 1,42	g34 o38	1,30 1,40
4	IV	186	7	12,7	1,41	108,8	1,085	g16,8 o92,0	1,57 1,00	g10,45 o85,65	g37 o21,2	1,14 1,30	g21,4 o12,3	1,21 1,32	g26 o27	1,30 1,40
5	V	192	6	9,8	1,29	85,9	1,27	g10,4 o75,5	1,62 1,22	g5,5 o70,6	g33 o17,6	1,12 1,20	g18 o11,2	1,19 1,10	g20 o19	1,30 1,40
6	VI	197	5	8,4	1,17	80,2	1,065	g6,2 o74,0	1,67 1,02	g2,0 o69,8	g30,0 o14,7	1,10 1,20	—	1,22	—	1,40
7	VII	200,6	3,6	8,0	1,05	76,0	1,060	g4,0 o72	1,55 1,03	—	—	—	—	—	—	—
										o68,0	o13,4	1,10	o8,2	1,12	o11,5	1,25

Примечание. o — открытая часть калибра; g — закрытая часть калибра.

фланцев происходит главным образом в первых проходах. Коэффициент для h_o в последнем проходе составляет 1,03 и снижается в направлении к началу прокатки на 0,01 в каждом проходе. В четвертом калибре он равен 1,0, в первом, втором и третьем калибрах — меньше единицы, так как в первых проходах производится весьма энергичное обжатие ложных фланцев. Поэтому необходимо в открытых частях калибров для того, чтобы избегнуть образования заусенца, допустить уменьшение высоты фланцев. Равномерность изменения коэффициента для h_o в пятом

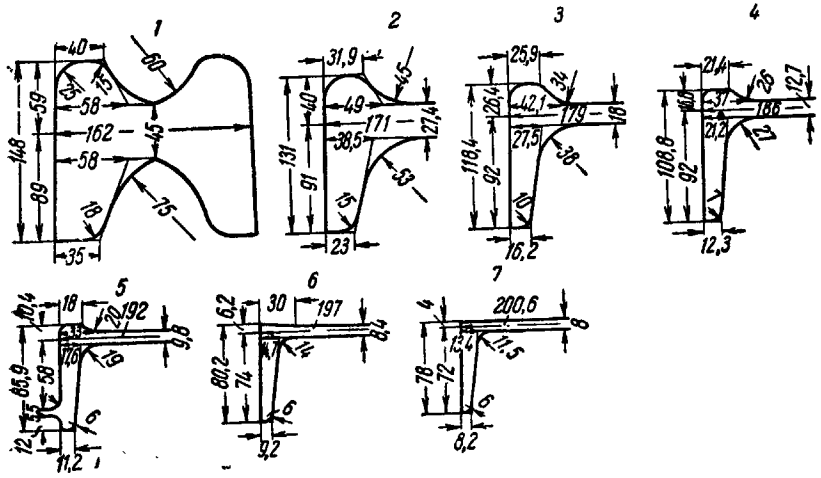


Рис. 186. Профили калибров с № 1 по 7 при калибровке швеллера № 20 в 7 проходов

калибре нарушается, так как в нем производится осадка фланцев.

Высота фланцев V_o и V_g. Эти высоты фланцев равны высотам h_o или h_g, уменьшенным на половину толщины шейки, или $V = h - \frac{s}{2}$ (см. гр. 11 табл. 58). Высота ложных фланцев, которые подвергаются деформации только в закрытых частях калибра, уменьшается от первого к чистовому калибру, в котором они равны нулю. Как было сказано выше, с первого по четвертый проход обжатия фланцев по высоте в открытых частях калибра не производится. Особенно важно, чтобы высота фланцев в первом калибре была достаточно велика, они должны быть приблизительно равны по величине фланцам в чистовом калибре. Высота для каждого фланца должна быть наполовину меньше, чем высота для действительного фланца. Следовательно, толщина шейки в первом калибре должна быть невелика, другими словами, клиновидный разрез в первом калибре должен быть глубоким. Из

рис. 186 видно, что при прокатке швеллера происходит значительное перемещение шейки. При прокатке необходимо следить, чтобы шейка имела заранее предусмотренную по калибровке толщину, иначе может возникнуть случай, изображенный на рис. 187, когда ложный фланец перемещается и образует рубец или закат на поверхности шейки. Этот рубец может быть раскатан в последующих проходах, причем на поверхности готового профиля также останется видимый след. Если же металл подвергнется изгибу, могут возникнуть отрывы фланцев. Этот дефект может возникнуть не только вследствие неправильной калибровки, он может также быть следствием неправильной установки валков.

Общая высота калибра H. Эта величина равна сумме $h_o + h_g$. Величина коэффициента деформации увеличивается по ходу прокатки (гр. 8, табл. 58). В ребровом калибре эта закономерность нарушается, так как в этом калибре происходит особенно большое обжатие по высоте.

Размеры фланцев A и a. Размеры A и a (графы 12 и 15, табл. 58) определяются на основании приведенных выше положений относительно обжатия фланцев по толщине. Величина коэффициента деформации для A_0 в чистовом калибре принимается равной 1,10 и увеличивается в каждом калибре на 0,10. Для реброваго калибра (№ 5) эта закономерность нарушается. Коэффициенты для A_g (ложного фланца) следующие: в чистовом калибре он равен 1,20 с дальнейшим равномерным увеличением на 0,02. До реброваго калибра коэффициенты деформации для a_0 на 0,02 больше, чем для A_0 в соответствующем калибре; в ребровом, пятом калибре свободные концы фланцев находятся не в открытой, а в закрытой части калибра и должны прокатываться с малым обжатием по толщине во избежание заклинивания в калибрах. Для a_g коэффициент деформации следующий: в калибрах 7 и 6 он равен нулю, в калибре 5 $Z_{a_g} = 1{,}19$; дальше коэффициент Z равномерно увеличивается на 0,02 в каждом проходе.

Закругления. После того как определены основные геометрические формы калибра, приступают к определению радиусов закруглений. Согласно размерам чистового профиля, радиус закругления между шейкой и фланцами равен средней толщине фланца, а радиус закругления внутренних краев фланцев — половине средней толщины фланца. Радиус закругления между шейкой и фланцем в последующих калибрах определяется по гр. 17 табл. 58. При этом нужно обеспечить, как уже говорилось выше, при описании калибровки двутаврового профиля, чтобы в закрытых частях калибров закругления имели достаточную величину. Это необходимо для предупреждения образования складок при осадке в закрытых частях калибров.

Величина вытяжки. Величины вытяжек и уменьшения сечения профиля, вычисленные без учета закруглений и уклонов калибра, приводятся в табл. 59. Деление профиля на части при этом принято по Брово и Кирхбергу (рис. 188).

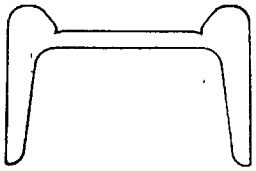


Рис. 187. Образование шва и складки при прокатке швеллера

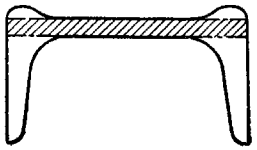


Рис. 188. Деление сечения швеллера по Брово и Кирхбергу

Таблица 59

Величина вытяжек при калибровке швеллера № 20 в 7 проходов по табл. 58

Деление профиля по Брово

№ прохода	№ калибра	Шейка: площадь мм²	Шейка: обжатие %	Шейка: вытяжка λ	Два фланца: площадь мм²	Два фланца: обжатие %	Два фланца: вытяжка λ	Общие: площадь мм²	Общие: обжатие %	Общие: вытяжка λ
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0	0	—	—	—	—	—	—	26 400	—	—
1	I	7300	—	—	g3560 o6190	—	—	17 050	35,5	1,55
2	II	4690	35,8	1,56	g2130 o4750	40,5 23	1,68 1,30	11 570	32,2	1,48
3	III	3210	31,5	1,46	g1180 o3640	44,5 23,5	1,80 1,305	8 030	30,5	1,44
4	IV	2360	26,5	1,36	g612 o2960	48 21,4	1,92 1,27	5 832	27,5	1,38
5	V	1880	20,5	1,26	g280 o2030	54,4 29	2,19 1,41	4 190	28	1,39
6	VI	1660	11,5	1,135	g60 o1660	78,5 18	4,66 1,22	3 380	19,2	1,24
7	VII	1605	3,5	1,035	— o1470	100 11,5	∞ 1,13	3 075	9,0	1,1

Примечания: 1. Пятый проход — в ребровом калибре
2. *o* — открытая часть калибра; *g* — закрытая часть калибра.

Величины, приведенные в табл. 59, графически представлены на рис. 189. Для сопоставления на этом же рисунке приведены данные калибровки двутавровой балки № 20 в 7 проходов. Для швеллера ход кривых является равномерным до реброваго калибра. Так же, как при прокатке двутавровой балки, в первых про-

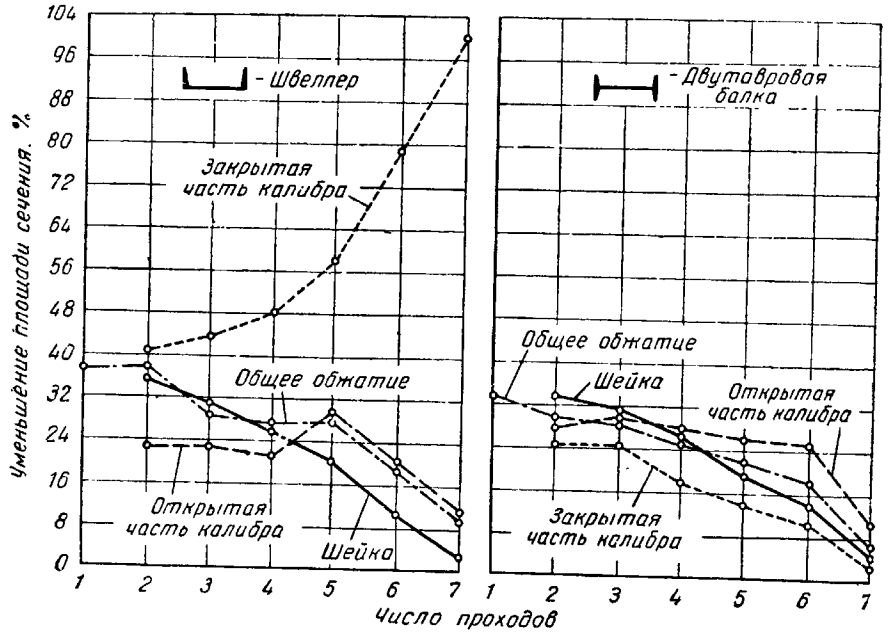


Рис. 189. Уменьшение сечения площади (в %) при калибровке швеллера и двутавровой балки № 20 в 7 проходах

ходах вытяжка шейки больше, чем вытяжка фланцев, а в последних проходах наоборот — вытяжка фланцев больше, чем вытяжка шейки. Это необходимо, как уже отмечалось выше, для предупреждения образования волны на шейке. При прокатке швеллера обжатия в закрытых частях калибров особенно велики. При этом отсутствует опасность защемления металла в калибре, так как ширина ложного фланца больше, чем его высота. Иначе говоря, он имеет очень малый «коэффициент устойчивости».

Калибровка швеллера № 20 в 5 проходов

Данные по этой калибровке приведены в табл. 60.

Ширина калибра B. Принятое уширение (гр. 4 табл. 60) в чистовом проходе составляет 5 *мм*, и в остальных калибрах, начиная с чистового, оно увеличивается на 2 *мм* в каждом калибре. Очер-

тания калибров с № 1 по 5 при калибровке швеллера в 5 проходов представлены на рис. 190.

Толщина шейки s. В приведенных выше примерах калибровок для балки и швеллера принято равномерное возрастание коэффициента деформации для толщины шейки. Для данной калибровки вследствие малого числа проходов обжатия в первых проходах должны быть приняты бо́льшими. Исходя из этого, калибровка должна быть построена не на основе равномерного возрастания обжатий, а на основе равномерного возрастания коэффициентов деформации. Для последнего (пятого) прохода коэффи-

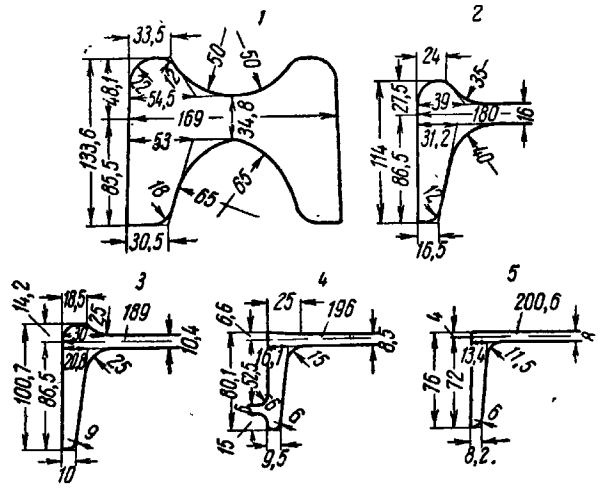


Рис. 190. Профили калибров с № 1 по 5 при калибровке швеллера № 20 в 5 проходов

циент деформации принимается равным 1,06. Для предыдущих проходов принимаются следующие повышения коэффициентов обжатия: в четвертом проходе он увеличивается на 0,16 до величины 1,22, в третьем проходе на 0,32 до величины 1,54, во втором проходе на 0,64 до величины 2,18. В первом проходе коэффициент деформации достигает 4,3. Такое значительное увеличение коэффициента деформации часто требуется при прокатке малых профилей при небольшом числе проходов. Большой коэффициент деформации в первом проходе при всех условиях необходим потому, что в нем производится глубокий клиновидный разрез исходной заготовки.

Высота калибра h_o *и* h_g Для данного примера ребровой калибр предусмотрен в предпоследнем проходе. Коэффициент деформации Z для h_g принимается в чистовом калибре равным 1,65, в предпоследнем калибре — 2,15; дальше он равномерно снижа-

Таблица 60

Калибровка швеллера № 20 в 5 проходов

№ прохода	№ калибра	Шейка					Высота фланцев						Толщина фланцев					Закругления	
		B, мм	Δb, мм	s, мм	Z_s	H, мм	Z_H	h_o, h_g мм	Z_h	высота фланцев V, мм	A_o, A_g мм	Z_A	a_o, a_g мм	Z_a	R_o, R_g мм	Z_R
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
0	0	165	—	150	—	150	—	75 75	—	—	—	—	—	—	—	—
1	I	169	4	34,8	4,3	133,6	1,12	g 48,1 o 85,5	1,55 0,86	g 30,7 o 68,1	g 54,5 o 53	—	g 33,5 o 30,5	—	g 50 o 65	—
2	II	180	11	16	2,18	114	1,17	g 27,5 o 86,5	1,75 0,99	g 19,5 o 78,5	g 39 o 31,2	1,40 1,70	g 24 o 16,5	1,40 1,85	g 35 o 40	1,40 1,60
3	III	189	9	10,4	1,54	100,7	1,13	g 14,2 o 86,5	1,95 1,0	g 9 o 81,3	g 30 o 20,8	1,30 1,50	g 18,5 o 10	1,30 1,65	g 25 o 25	1,40 1,60
4	IV	196	7	8,5	1,22	80,1	1,255	g 6,6 o 73,5	2,15 1,175	g 2,35 o 69,25	g 25 g 16,1	1,20 1,30	g — o 9,5	— 1,05	g — o 15	— 1,65
5	V	200,6	4,6	8,0	1,06	76	1,055	g 4 o 72	1,55 1,02	g — o 68	g — o 13,4	— 1,20	g — o 8,2	— 1,16	g — o 11,5	— 1,30

Примечание. o — открытая часть калибра; g — закрытая часть калибра

ется на 0,2 в каждом калибре. Для h_o коэффициент деформации снижается равномерно от 1,02 в чистовом калибре на 0,01 в каждом проходе и, следовательно, в первом калибре он меньше единицы. Эта закономерность нарушается только в ребровом калибре.

Высота фланцев V_o и V_g Эти величины подсчитываются по условиям:

$$V_o = h_o - \frac{s}{2};$$

$$V_g = h_g - \frac{s}{2}.$$

Закономерность изменения подобна случаю калибровки по табл. 46.

Общая высота калибра H. Величина H определяется по условию

$$H = h_o + h_g.$$

Коэффициент деформации для H в ребровом калибре, естественно, особенно велик.

Размеры фланцев A и a. Коэффициенты деформации возрастают для предыдущей открытой части калибра соответственно на 0,2; для предыдущей закрытой части калибра — на 0,1. Исключение делается только для реброваго калибра, чтобы избежать заклинивания длинных и тонких фланцев.

Закругления. Закругления вычисляются с помощью коэффициентов деформации, приведенных в гр. 17, табл. 60. Из опасения образования складок в закрытой части калибра выбран особенно большой коэффициент Z, равный 1,65.

Величина вытяжки в отдельных частях профиля. Величина вытяжек в отдельных частях профиля получена путем деления профиля на части по Брово и Кирхбергу и приведена в табл. 61. Следует еще раз указать на большую вытяжку ложных фланцев.

Общие положения калибровки швеллеров

При калибровке швеллеров необходимо обеспечить, чтобы программа прокатки была выполнена на минимальном парке валков и с наименьшим количеством перевалок. Поэтому не следует для каждого профиля предусматривать отдельные независящие друг от друга валки. Разные профили следует прокатывать на одних черновых валках, что позволяет уменьшить стоимость парка валков, уменьшить время перевалок, повысить производительность и снизить себестоимость. Подобное положение может быть достигнуто, если для наиболее широких профилей в данной группе принимать возможно большее уширение в фасонных калибрах и де-

Таблица 61

Величина вытяжек при калибровке швеллера № 20 в 5 проходов по табл. 60

Деление профиля на части по Брово

№ прохода	№ калибра	Шейка			Два фланца			Общие		
		площадь *мм*²	обжатие %	вытяжка λ	площадь *мм*²	обжатие %	вытяжка λ	площадь *мм*²	обжатие %	вытяжка λ
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0	0	—	—	—	—	—	—	24 750	—	—
1	I	5900	—	—	*g* 2710 *o* 5700	— —	— —	14 310	42	1,73
2	II	2880	51,2	2,05	*g* 1230 *o* 3750	55 34	2,21 1,52	7 860	45	1,82
3	III	1970	31,5	1,46	*g* 436 *o* 2510	64,5 33	2,81 1,49	4 916	37,5	1,60
4	IV	1670	15,1	1,18	*g* 58,8 *o* 1780	86,6 29	7,45 1,41	3 509	28,8	1,40
5	V	1605	4	1,04	*g* — *o* 1470	100 17	∞ 1,21	3 075	12	1,14

Примечание. *o* — открытая часть калибра; *g* — закрытая часть калибра

лать калибры в черновых валках настолько узкими, чтобы они были пригодны для малых профилей, прокатываемых при небольшом уширении. При этом нужно отметить, что при прокатке швеллеров нельзя применять столь же большого уширения, как при прокатке балок. Форма калибра при прокатке двутавровых балок допускает применение чрезвычайно большого уширения, так как металл в валках устойчив за счет двусторонних фланцев и подвергается боковому растяжению. Если при прокатке швеллера уширение в последних калибрах, в которых ложные фланцы почти или полностью сглажены, принято слишком большим, то фланцы могут быть частично утянуты в шейку. В этом случае профиль остается слишком узким либо углы окажутся не острыми, а закругленными. Можно избегнуть этого недостатка, если толщину шейки *s* сделать возрастающей от середины к краям калибра (рис. 191), что определяет неравномерное обжатие отдельных участков шейки. Участки, подвергающиеся более сильному обжатию, однако, не могут удлиняться в направлении прокатки, так как значительная площадь сравнительно слабо обжимаемых участков сечения удерживает их, и металл течет в сторону, увеличивая уширение.

Из сказанного вытекает также то, что профиль, представленный на рис. 191, имеет некоторый уклон горизонтальной обжимающей плоскости калибра, который пропорционально увеличению расстояния между обжимающими поверхностями валков облегчает истечение металла в сторону уширения.

Швеллеры разделяются на пять основных групп:

1. Нормальные профили от № 8 до 40. Ширина профиля (длина шейки) от № 8 до 32 возрастает по 20 *мм* на номер. Затем следуют № 35, 38 и 40. Швеллер № 38 соответствует английскому швеллеру BSC 27 с уклоном внутренних поверхностей фланца, равным 2%. Сюда же относятся малые профили № 3; 4, 5 и 6 1/2.

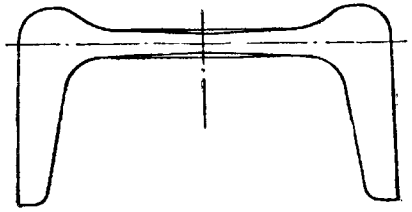


Рис. 191. Калибр швеллера с уменьшенной толщиной шейки в середине

2. Швеллеры с шириной менее 80 *мм*.

3. Швеллеры, применяемые в вагоностроении.

4. Швеллеры, применяемые в кораблестроении.

5. Швеллеры с параллельными плоскостями фланцев.

При прокатке швеллеров обычно применяют два различных метода. В описанных выше калибровках первому калибру придается форма двутаврового профиля («балочный метод»). Это дает возможность при прокатке швеллеров и балок одинаковой ширины применять одни и те же черновые валки. Однако это положение не является решающим, что вытекает хотя бы из того, что подобный метод применяется даже в том случае, когда на стане балки не прокатываются. Двутавровая форма калибра дает, кроме того, то преимущество, что раскат хорошо поступает в калибр и что металл из ложных фланцев постепенно вытесняется в действительные фланцы, что обеспечивает хорошее заполнение калибра и получение острых углов готового профиля.

Второй метод — калибровка по способу сгибания — состоит в том, что прокатка в первых проходах производится, как при прокатке полосы, с загибанием фланцев для образования швеллера в последующих проходах.

Преимущества и недостатки обоих методов будут разобраны ниже. Для профилей от № 8 до 40 последний метод едва ли применим; однако малые профили (№ 3, 4, 5 и 6 1/2) прокатываются методом сгибания, так как благодаря малой ширине профиля выступ, обрабатывающий внутреннюю поверхность профиля, уже в чистовом калибре получается весьма слабым, а в предчистовых калибрах благодаря возрастающей толщине фланцев ослабляется еще более. Такие тонкие выступы при прокатке слишком быстро

нагреваются и охлаждаются и из-за возникающих термических напряжений покрываются трещинами и выкрошиваются. Методом сгибания прокатываются также кораблестроительные швеллеры с высокими фланцами и швеллеры с параллельными фланцами, так как в противном случае вырезы на валках получаются чересчур глубокими.

Сопоставление калибровок двутавровых балок и швеллеров

Для оценки калибровок этих важных фасонных профилей полезно провести сравнение между обоими процессами, основанными на различных принципах. Для этого возьмем за основу калибровку нормального профиля № 20 по таблицам 58 и 62.

Фланцы швеллера значительно тоньше, чем фланцы балки того же номера и имеют, кроме того, меньший уклон внутренних поверхностей фланцев. Уклон для швеллера составляет 8%, для балки — 14%.

Из этого можно сделать вывод, что при прокатке швеллера нельзя допустить или применить столь же большую величину уширения, как для балки. Поэтому при калибровке швеллера № 20 нужно начинать с более широкого исходного профиля, чем при калибровке балки того же номера.

Коэффициенты деформации для толщины шейки s при прокатке больше, чем для швеллера, так как толщина шейки в первом случае меньше, чем во втором. При одинаковой высоте исходного профиля необходимо также большее обжатие для балки. Характер изменения коэффициентов деформации является одинаковым, как видно из рис. 192.

Существенное различие наблюдается, однако, в характере изменения коэффициентов деформации для высоты фланцев h_o и h_g При прокатке балки они равномерно возрастают, начиная с исходного прохода, у швеллера они снижаются. Коэффициенты деформации для ложных фланцев у швеллера значительно выше вследствие необходимости применения одностороннего обжатия.

Высоты фланцев V для швеллера значительно больше, чем для балки. Однако в то время как для балки в первом калибре они должны быть по крайней мере на 10 *мм* больше, чем в чистовом, для швеллера они в первом и чистовом калибрах практически одинаковы. Это объясняется тем, что фланцы швеллера по высоте обжимаются один или два раза за все время прокатки, в то время как фланцы балки — через каждый проход.

Высота исходной заготовки для обоих профилей принимается в среднем в 1,6—2 раза больше высоты готового профиля.

Коэффициенты деформации для величин A_o, A_g, a_o, a_g не обнаруживают значительных расхождений. Некоторое различие дает для швеллера перелом кривых в ребровом проходе. Сравне-

Таблица 62

Калибровка двутавровой балки в 7 проходов

№ прохода	№ калибра	Шейка					Высота фланцев					Толщина фланцев					Закругления	
		B, *мм*	Δb, *мм*	s, *мм*	Z_s	H, *мм*	s_H	h_o, h_g *мм*	Z_h	высота фланцев V, *мм*	A_o, A_g *мм*	Z_A	a_o, a_g *мм*	Z_a	R_o, R_g *мм*	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
0	0	140	—	170	—	170	—	85 85	—	—	—	—	—	—	—	—
1	1	147	7	43,5	3,9	152	1,119	o 76 g 76	1,118 1,118	o 54,25 g 54,25	o 44 g 49	—	o 25 g 26	—	o параллельн- g параллельн-	
2	II	161	14	26	1,67	136,5	1,113	g 64,1 o 72,4	1,18 1,05	g 51,1 o 51,1	g 35 o 32,5	1,25 1,50	g 20,7 o 16,6	1,20 1,55	g 33 o 37	— —
3	III	173	12	16,7	1,55	123	1,110	o 61,5 g 61,5	1,04 1,17	o 53,15 g 53,15	o 24,1 g 27	1,45 1,20	o 13,8 g 14,4	1,50 1,15	o 25 25	1,30 1,45
4	IV	183	10	11,7	1,43	113	1,090	g 53 o 60	1,16 1,03	g 47,15 o 54,15	g 21 o 19,3	1,15 1,40	12,6 o 9,9	1,10 1,45	g 17 o 19	1,45 1,30
5	V	191	8	8,9	1,31	104	1,085	o 52 g 52	1,02 1,15	o 47,55 g 47,55	o 15,6 g 17,6	1,35 1,10	o 9,0 g 9,4	1,40 1,05	o 13 g 13	1,30 1,45
6	VI	197	6	7,5	1,19	97,2	1,070	g 45,6 o 51,6	1,14 1,01	g 41,85 o 47,85	g 14,8 o 13,5	1,05 1,30	g 9,0 o 7,9	1,0 1,35	g 10 o 10	1,45 1,30
7	VII	200,6	3,6	7,0	1,07	91,2	1,065	o 45,6 g 45,6	1,0 1,13	o 42,1 g 42,1	o 13,5 g 13,5	1,10 1,0	o 7,9 g 7,9	1,14 0,89	o 7 g 7	1,25 1,40

Примечание. o — открытая часть калибра; g — закрытая часть калибра.

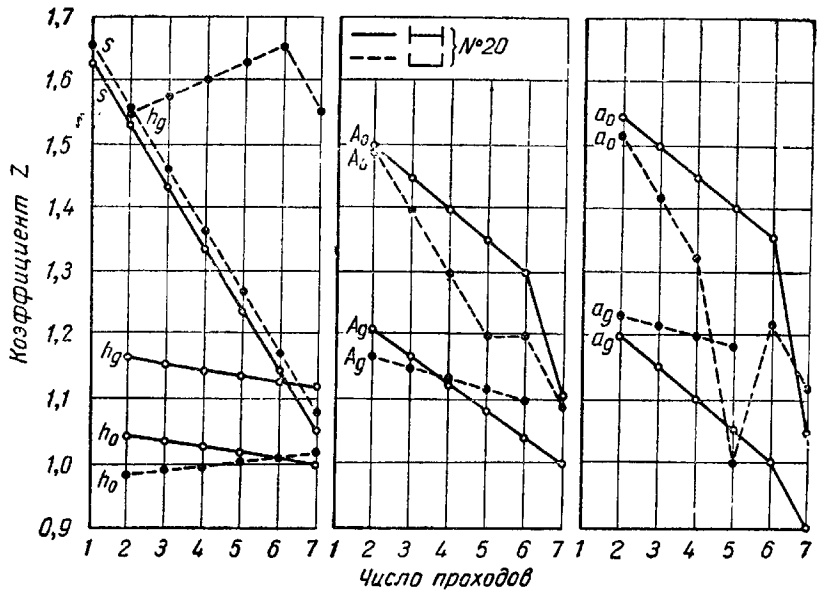


Рис. 192. Величина коэффициента Z при калибровке двутавровой балки и швеллера № 20

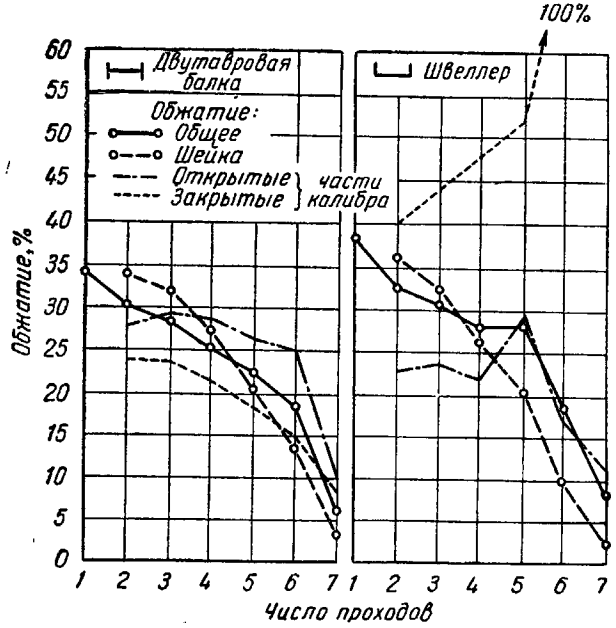


Рис. 193. Уменьшение площади поперечного сечения (в %) при калибровке двутавровой балки и швеллера № 20

ние упомянутых коэффициентов для отдельных частей профиля представлено на рис. 193.

В табл. 63 приведены величины вытяжек для отдельных частей профиля при калибровке двутавровой балки № 20 в 7 проходов, исходя из деления профиля на части по Брово.

Таблица 63

Величина вытяжек при калибровке двутавровой балки № 20 в 7 проходов согласно табл. 62

Деление профиля по Брово

№ прохода	№ калибра	Шейка: площадь мм²	Шейка: обжатие %	Шейка: вытяжка λ	Два фланца: площадь мм²	Два фланца: обжатие %	Два фланца: вытяжка λ	Общие значение: площадь мм²	Общие значение: обжатие %	Общие значение: вытяжка λ
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0	0	—	—	—	—	—	—	23 800	—	—
1	I	6400	—	—	*o* 3750 *g* 4060	— —	— —	14 210	40,5	1,68
2	II	4200	34,2	1,52	*g* 2850 *o* 2920	24 28	1,32 1,39	9 970	30	1,43
3	III	2890	31,2	1,46	*o* 2010 *g* 2210	29,5 24,3	1,41 1,32	7 110	28,5	1,40
4	IV	2140	26,0	1,35	*g* 1585 *o* 1590	21 28	1,27 1,39	5 315	25	1,33
5	V	1700	20,5	1,26	*o* 1175 *g* 1290	26 18,9	1,35 1,23	4 165	22	1,26
6	VI	1479	13,0	1,15	*g* 1000 *o* 980	15 24	1,18 1,32	3 459	16,9	1,20
7	VII	1404	5,0	1,05	*o* 900 *g* 902	10 7,8	1,11 1,08	3 206	7,3	1,08

Примечание. *o* — открытая часть калибра; *g* — закрытая часть калибра

4. ПРОКАТКА ФАСОННЫХ ПРОФИЛЕЙ НА СУЩЕСТВУЮЩИХ СТАНАХ

Фасонные профили прокатываются на станах дуо и трио. В Англии главным образом применяют станы дуо, в Америке — станы трио. В Германии и остальных европейских странах используют станы обоих типов. В настоящее время устанавливают только реверсивные станы дуо.

Преимущество реверсивного стана дуо перед станом трио, имеющим неизменное направление вращения, состоит в том, что

механическое оборудование первого стана значительно проще, так как отпадают сложные и дорогие подъемные или качающиеся столы, поскольку движение металла происходит все время на одном уровне. Раскат передвигают при помощи простых и надежных рольгангов, прочно установленных на фундаментах. Рольганги с индивидуальным приводом в Европе применяют в единичных случаях, но в Америке за последние годы они снова начинают получать широкое распространение. Новые американские рельсобалочные станы оборудованы почти сплошь индивидуальными приводами рольгангов. Станы дуо имеют рабочие клети меньшей высоты. Настройка валков на этих станах значительно проще и точнее, поскольку необходимо только установить верхний валок точно над нижним, в то время как в станах трио нужно настраивать два валка — верхний и нижний. В станах дуо подушки можно применять более мощные, так как их размер не ограничивается. Поэтому настройка валков производится более надежно и продольная регулировка получается более точной. На станах дуо работают исключительно с верхним давлением, что позволяет применять более простые нижние проводки. На станах трио необходимо иметь вдвое большее число арматурных брусьев и проводок, а также следует устанавливать подвесные проводки, что определяет большую длительность перевалки и настройки. Однако следует указать, что на станах дуо нужно сменять большее число валков. При одинаковом диаметре валков для стана дуо требуется большее число рабочих клетей, и начальная стоимость парка валков будет выше. Разница в пользу стана трио будет тем больше, чем меньше диаметр его валков при одном и том же сортаменте проката. Расход энергии на холостой ход для реверсивных станов дуо меньше, так как валки во время пауз не вращаются. Однако это преимущество частично теряется вследствие расхода энергии на разгон вращающихся частей при каждом реверсе двигателя. В то же время преимуществом реверсивного стана дуо является возможность регулировки скорости прокатки при приспосабливании ее к отдельному прокатываемому профилю. Конечно, это преимущество теряется, если стан трио оборудовать также регулируемым приводом.

Твердо установленных правил, когда нужно применять станы дуо или трио, не существует. Для нормальных профилей от № 22 до 40 и других профилей соответствующих размеров большей частью применяют станы дуо с диаметром валков 800—950 *мм*. Первая клеть такого, большей частью трехклетьевого, стана имеет механизм для установки верхнего валка, что позволяет производить несколько проходов в одном калибре. Нормальные профили от № 16 до 30 прокатывают в основном на станах трио с диаметром валков от 400 до 750 *мм*. В них прокатка производится иногда в калибрах, расположенных один над другим по вертикали, что позволяет уменьшить число калибров и лучше использовать бочку валков. Последние проходы производятся в калибрах, не зависящих один от другого, так как в этом случае деформация более равномерна и более надежно заполнение калибров. Нормальные профили от № 8 до 18 также прокатывают на станах трио с диаметром валков от 400 до 750 *мм*. Вследствие малой ширины калибров для этих профилей на бочках валков остается достаточно места, и прокатку можно производить накрест. При этом калибровка получается в точности такая же, как на станах дуо.

Опыт европейских заводов показывает, что схема расположения оборудования подобных крупносортных и среднесортных станов с конца прошлого столетия приобрела постоянную форму. Станы, построенные в те времена, находятся до сих пор в эксплуатации без существенных изменений и переделок. Дуо-реверсивный стан для прокатки фасонных профилей, построенный в 1890 г. на заводе «Хердер Ферейн», состоит из трех клетей с диаметром валков 900 *мм*. Двигателем служит трехцилиндровая паровая машина. Верхние валки имеют гидравлическое уравновешивание. Первая клеть снабжена механизмом для установки верхнего валка с гидравлическим приводом. Металл от клетей передается при помощи шести шлепперов. За рабочими рольгангами второй и третьей клетей установлены рольганги длиной по 74 *м*, при помощи которых прокатанная полоса передается на отделку. Между этими рольгангами имеются маятниковые пилы для резки проката. Рольганги, шлепперы и вспомогательное оборудование приводятся от малых двухцилиндровых паровых машин. Аналогичный стан, установленный несколькими годами позднее на заводе «Унион» в Дортмунде, не имеет существенного отличия от описанного выше, за исключением того, что рольганги и шлепперы приводились в действие от электродвигателей. Крупносортный стан в Пайне (Германия), построенный примерно в то же время, также состоял из одной линии 850 и одной линии трио 750. Первые клети линий были оборудованы подъемными столами с приводом от парового цилиндра через рычажную систему. В 1912 г. этот стан был переоборудован для прокатки широкополочных балок. Все паровые машины были заменены электродвигателями с питанием от установки Ильгнера.

Современный крупносортный стан европейского типа, изображенный на рис. 194, служит также для прокатки заготовки из слитков. Первая клеть является обжимной и оборудована электрифицированным механизмом для установки верхнего валка и манипуляторами для передвижения и кантования слитков, расположенных на рабочих рольгангах. На этой клети прокатывают слитки томасовской стали сечением 500 × 500 *мм* и высотой 2 *м*, из которых на второй и третьей клети прокатывают фасонные

профили. Готовый профиль выходит из третьей клети и после обрезки концов и разрезки на части поступает на холодильник. Крупная заготовка после прокатки на первой клети передается на непрерывный заготовочный стан. Четвертая клеть служит для черновой прокатки легированной стали.

Дуо-реверсивный пятиклетьевой стан 950, установленный в 1926 г. на заводе «Август Тиссен» в Гамборне, изображен на рис. 195. Это наиболее мощный стан подобного типа; его производительность не превзойдена даже американскими станами. Гибкость и разносторонность стана по сортаменту выгодно отличают его от других станов. Более подробное описание стана см. «Справочник металлурга», т. II., стр. 205 [7].

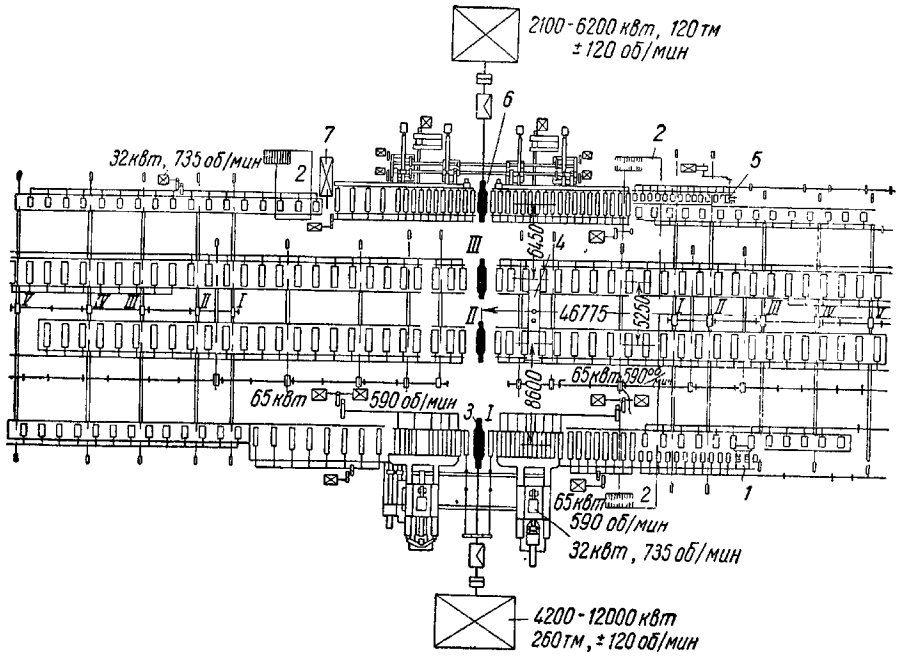


Рис. 194. Четырехклетьевой дуо-реверсивный стан 750 для прокатки фасонных профилей и крупной заготовки:
1 — опрокидыватель; 2 — пост управления; 3 — обжимная клеть I; 4 — кантователь; 5 — опрокидыватель; 6 — опрокидыватель II; 7 — ножницы

Для производства средних по величине сортов профильного металла (рельсы, балки и швеллеры) в США разработаны конструкции станов, в которых клети расположены не по линейной схеме, а в две и более линии. Расположение одного из ранее построенных станов этой конструкции, получивших название станов «кросс-коунтри», показано на рис. 196. Прокатываемая полоса передается от клети к клети не шлепперами, а косыми рольгангами, направление движения роликов которых находится под некоторым углом к направлению прокатки. В отличие от непрерывных станов полоса между клетями находится некоторое время в свободном состоянии. Среднее число оборотов клетей этой установки равно 125 в минуту. Станы, устанавливаемые в последующее время, имеют возрастающую от клети к клети скорость. Примером таких установок является рельсобалочный стан формы Иллинойс Стил в Чикаго, изображенный на рис. 197. Восьмиклетьевой стан состоит из шести клетей дуо и двух клетей трио, между которыми раскат свободно проходит по рольгангам. Скорость прокатки в этих клетях постепенно возрастает: в первой клети она равна 0,85 *м/сек;* а в восьмой — 3,8 *м/сек.* Так как пятая и шестая клети являются клетями трио, то скорость прокатки в пятом и шестом проходах одинакова; также одинакова скорость прокатки в седьмом и восьмом проходах. Первые пять клетей и последние три клети составляют две последовательные непрерывные группы, расположенные параллельно. Металл одной линии на другую передается при помощи рольганга, расположенного под углом к направлению прокатки между пятой и шестой клетями.

Для прокатки рельсов широкой колеи и сортовых профилей в Америке построены станы специальной конструкции. На рис. 198 представлен рельсовый стан производительностью до 100 тыс. *т* в месяц, установленный на заводе фирмы Индиана Стил в Гэри. На этом стане прокатывают рельсы весом 42,4 *кг/пог. м* из слитка весом 3,7 *т,* сечением 500 × 610 *мм* в 18 проходов без промежуточного подогрева. Схема прокатки изображена на рис. 199. На рис. 200 изображен современный американский стан для прокатки крупных и средних профилей. Этот стан Россом Бейноном приведен в качестве наиболее совершенного современного крупносортного стана [65]. Между обжимной дуо-реверсивной линией и черновой дуо-реверсивной линией расположена промежуточная подогревательная печь. За черновой линией расположена чистовая, состоящая из двух клетей дуо и одной чистовой клети дуо с отдельным приводом. Другим примером стана типа кросс-коунтри является представленный на рис. 201. В этом стане клети расположены таким образом, что полоса может, смотря по обстоятельствам, обрабатываться в каждой клети. В стане может одновременно находиться от 6 до 7 раскатов. Так как скорость прокатки в станах кросс-коунтри от клети к клети возрастает, эти станы имеют высокую производительность. По Бейнону, такой стан может прокатать 1800 заготовок за восьмичасовую смену. Однако на подобном стане нельзя получить таких больших длин раската, как на стане, представленном на рис. 200, что несколько уменьшает распространение станов кросс-коунтри. Кроме того, на этих

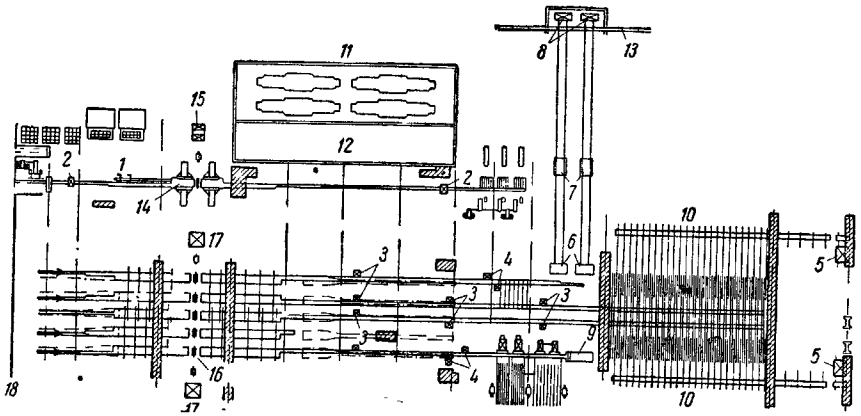


Рис. 195. Пятиклетьевой дуо-реверсивный стан 950 для прокатки крупносортных профилей и рельсов:

1 — опрокидыватель для слитков; *2* — ножницы для блумов; *3* — пилы; *4* — ножницы; *5* — роликоправильная машина с подающим рольгангом; *6* — обрезные прессы для шпал; *7* — охлаждающее устройство; *8* — карманы для шпал; *9* — сборный карман; *10* — сдвоенный холодильник; *11* — установки Ильгнера; *12* — панели управления; *13* — распределительный или канатный рольганг; *14* — обжимная клеть 1150 × 2800; *15* — двигатель 320 *тм*, ±120 об/мин; *16* — линия диам. 950 × 2500; *17* — двигатель 230 *тм*, ± 180 об/мин; 18 — подводящие рольганги

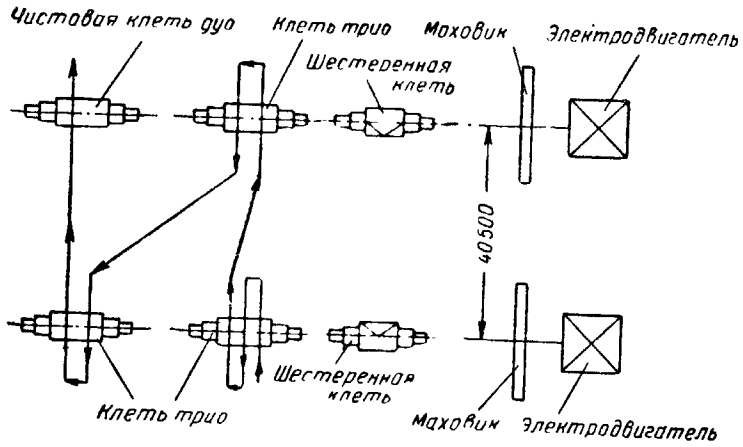


Рис. 196. Рельсовый стан типа кросс-коунтри фирмы Карнеджи Стил, установленный на заводе Эдгар Томсон

станах длительность прокатки сравнительно велика, и охлаждение полосы при этом значительно.

Непрерывные прокатные станы, в которых полоса одновременно прокатывается в нескольких клетях, для крупных и средних

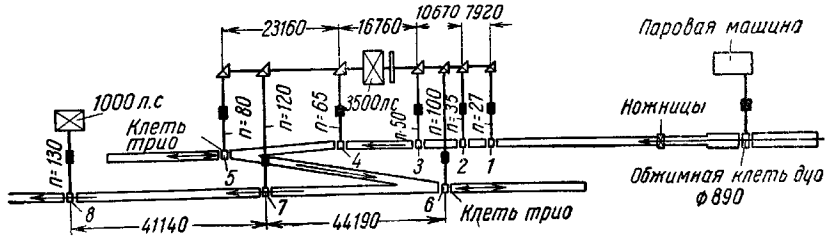


Рис. 197. Рельсобалочный стан типа кросс-коунтри фирмы Иллинойс Стил в Чикаго (США)

сортовых профилей не строят. На прокатном стане, изображенном на рис. 202, кроме полосовой стали, прокатывают также легкие фасонные профили. Преимущество непрерывных станов состоит в том, что длина профилей может быть весьма большой при высокой

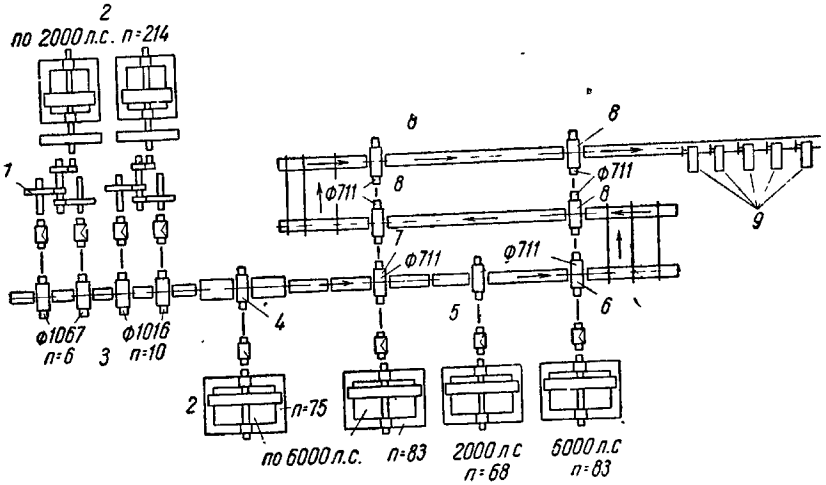


Рис. 198. Рельсовый стан завода Гэри фирмы Индиана Стил (США):

1 — редукторы; *2* — электродвигатели; *3* — обжимная линия; *4* — обжимная клеть дуо; *5* — формовочная клеть дуо; *6* — ребровая клеть дуо; *7*—предчистовая клеть трио; *8*—чистовая клеть дуо; *9* — горячие пилы

температуре конца прокатки, что обеспечивает высокую степень равномерности механических и физических свойств. Балки с параллельными фланцами прокатывают на станах с универсальными клетями.

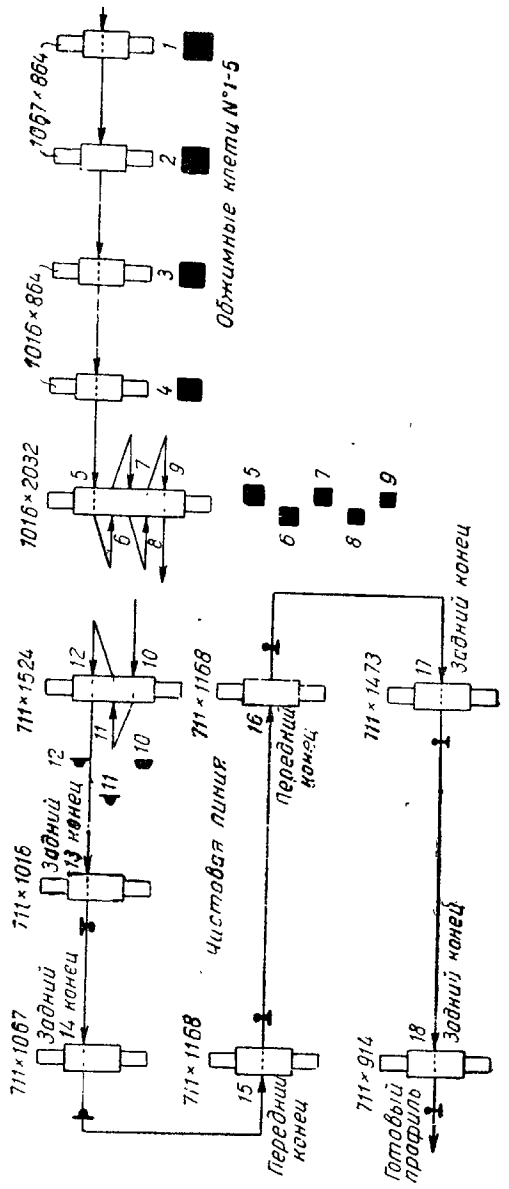


Рис. 199. Схема прокатки на рельсовом стане Гэрри фирмы Индиана Стил

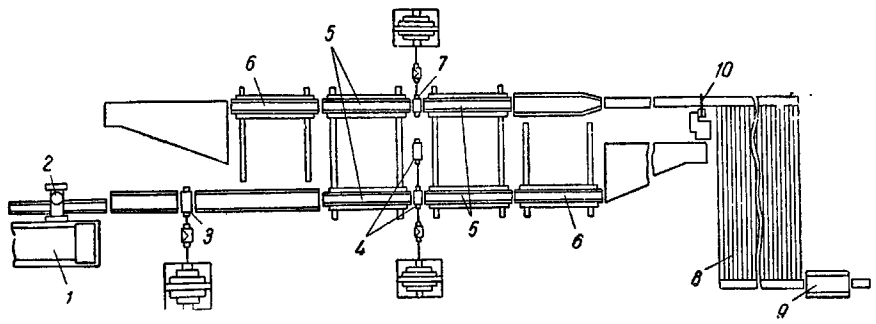


Рис. 200. Современный американский сортовой стан для крупных и средних профилей:

1 — подогревательная печь; *2* — кран для выдачи металла, *3* — дуо-реверсивная клеть; *4* — клети трио, *5* — передвижной качающийся стол; *6* — передвижной стол; *7* — чистовая клеть дуо; *8* — холодильник, *9* — правильная машина, *10* — пила горячей резки

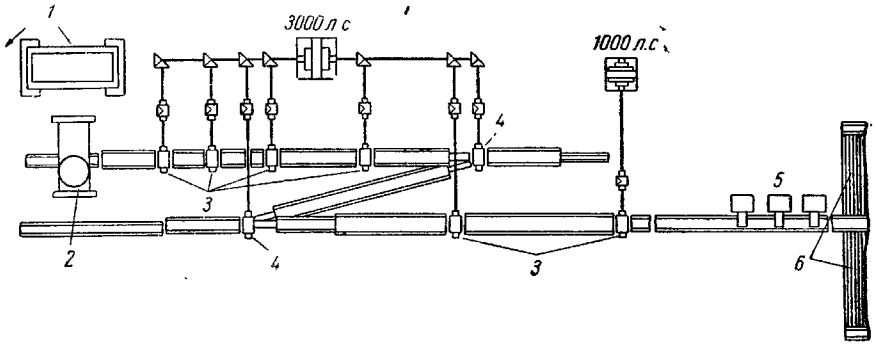


Рис. 201. Сортовой стан кросс-коунтри:

1 — две печи; *2* — кран для выдачи металла; *3* — дуо-реверсивные клети; *4* — клеть трио, *5* — пилы горячей резки; *6* — холодильник

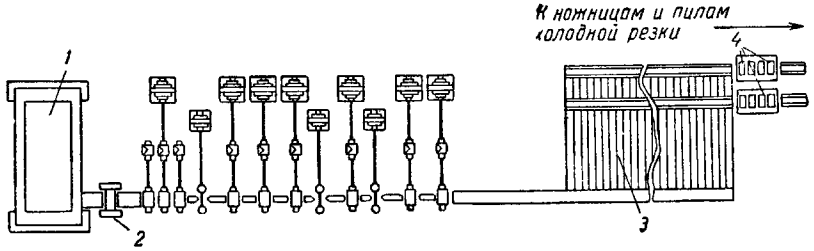


Рис. 202. Полностью непрерывный стан для прокатки сорта и мелких профилей:

1 — подогревательная печь; *2* — ножницы для отрезки переднего конца, *3* — холодильник; *4* — правильная машина

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обычно перед калибровщиком стоит задача построить калибровку таким образом, чтобы из известного исходного профиля при числе проходов, определенном на основании практически принятых коэффициентов, получить заданный конечный профиль. При этом на выполнение этой задачи могут влиять различные факторы: конструкция и расположение прокатного стана, мощность двигателя, свойства прокатываемого металла и, наконец, требования потребителей по допускам и качеству поверхности. Чем меньше число проходов, тем меньше длительность прокатки; однако при меньшем числе проходов требуются повышенные обжатия. Для величины обжатий существует предел, который определяется способностью металла к деформации, зависящей в свою очередь от сопротивления деформации. Последнее зависит как от температуры металла, так и от его химического состава. Если на стане прокатывается металл с различными свойствами и различного химического состава, то калибровка должна быть рассчитана таким образом, чтобы допустимые пределы не были превышены.

Если производится калибровка нового стана, то нужно принимать во внимание опыт работающих станов. В основу должно быть положено стремление получить готовый профиль в минимально возможное число проходов, что определяет простоту и экономичность работы на прокатном стане. При этом, конечно, необходимо не переходить границ, в которых возможна безаварийная и устойчивая работа.

Насколько высоко качество работы прокатчика, могут судить исключительно заказчики — представители отраслей промышленности, потребляющих металл. Требования потребителей в части качества, точности и чистоты поверхности проката за последнее время непрерывно повышаются, с тем чтобы металл без какой-либо предварительной обработки можно было передавать для работы на станки-автоматы.

На получение продукции, удовлетворяющей этим требованиям, оказывает большое влияние не только установка современных прокатных станов, но и методы калибровки. Особенно настойчиво следует добиваться уменьшения напряжений металла при прокатке. Пришли к выводу, что для этого целесообразно повышать число проходов, насколько это допускает число клетей, особенно при прокатке круглого, квадратного и полосового железа. В качестве типичного примера можно привести практику одного большого европейского металлургического завода. На заводе работал проволочный стан старого типа, на котором катанку толщиной 5 *мм* из заготовки 45 × 45 *мм* прокатывали в 16 проходов. На новом проволочном стане этот процесс осуществляют в 20 проходов на 20 клетях. На других европейских и американских заводах проводятся аналогичные мероприятия.

Значительное повышение числа проходов для такого тонкого профиля, который прокатывается на проволочных станах, сопряжено с опасностью чрезмерного понижения температуры прокатываемого металла. Для предупреждения этого увеличивается скорость прокатки, что становится возможным вследствие применения подшипников качения для рабочих клетей. При этом длина образующихся между клетями петель за счет регулирования скорости приводных двигателей может быть значительно уменьшена. С той же целью в качестве исходного профиля применяют не слиток, а заготовку меньшего сечения, а первую клеть располагают возможно ближе к нагревательной печи.

Повышение качества полосового проката происходит путем применения аналогичных методов. В связи с этим следует указать на мероприятия по повышению точности прокатки круглых и квадратных профилей, описанные в IV главе.

Тенденция к увеличению числа проходов в отдельных случаях проявляется и на сортовых станах. Причиной этого является обычно повышенный износ валков при прокатке отдельных профилей. Прежде чем принимать столь радикальные меры для повышения качества профилей, необходимо подвергнуть калибровку критическому анализу. Основное правило калибровки фасонных профилей гласит, что деформация металла во всех частях профиля должна совершаться закономерно и проводиться по возможности непрерывно. Следствием уклонения от этого правила является возникновение перенапряжений в прокатываемом металле и повышение износа валков. Во многих случаях, однако, можно путем разумного изменения калибровки иногда даже отдельных калибров или частей калибров с небольшими затратами устранить эти дефекты. Надеемся, что показанные в настоящей книге примеры и размеры калибров, приведенные в таблицах, окажутся для этой цели достаточно наглядными. Перекалибровка может быть проведена без большой затраты времени.

Большие изменения в технологии листопрокатного производства произошли в связи с распространением непрерывных листовых станов. В будущем тонкий и средний лист будут получать полностью из широкой полосы вместо сутунки. Также предстоит приложить усилия к тому, чтобы в потребляющих отраслях промышленности внедрить тонкий лист в виде рулонов взамен листа в пачках.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Tunner, P. von. Über die Walzenkalibrierung für die Eisenfabrikation. Leipzig 1867.
2. Daelen, R., Hollenberg, A. u. Diekmann. Die Kalibrierung der Eisenwalzen. Neudruck. Berlin 1874.
3. Brovot, A. Das Kalibrieren der Walzen. Leipzig 1903.
4. Kirchberg, E. Grundzüge der Walzenkalibrierung. Dortmund 1905.
5. Tafel, W. Walzen und Walzenkalibrieren. Dortmund 1923.
6. Geuze, L Traité théorique et pratique du laminage de fer et de l'acier. Texte. Atlas. 2. éd. Paris/Liége 1921.
7. Handbuch des Eisenhüttenwesens Walzwerkwesen. Hrsg. im Auftrage des Vereins deutscher Eisenhüttenleute von J. Puppe u. G Stauber. Bd 1. Düsseldorf u. Berlin 1929.
8. Dehez, J. Walzenkalibrierungen. Düsseldorf 1919.
9. Hoff, H., u. Th. Dahl. Grundlagen des Walzverfahrens. Düsseldorf 1950. (Stahleisen—Bücher. Bd 9).
10. Trinks, W. Roll pass design Cleveland (Ohio). Vol. 1. 1933. Vol. 2. 1934. Supplement. 1937.

I. Основы прокатки

11. Dahl, W. Beitrag zur Bestimmung der neutralen Linie eines Kalibers. Stahl u. Eisen 51 (1931) S. 633/35.
12. Cramer, H. Das Vierwalzensystem für Triowalzwerke. Stahl u. Eisen 44 (1924) S. 1170/72 (Walzw.— Aussch. 34).
13. Dahl, Th. Über Anordnung von Kalibern auf festliegenden Trio-Blockwalzen. Stahl u. Eisen 51 (1931) S. 1228/32.
14. Dahl, Th.. Vorwalzenkalibrierungen und Kaliberanordnungen auf festliegenden Triowalzen. Stahl u. Eisen 52 (1932) S. 779/83.
15. Hoff, H., u. Th. Dahl. Untersuchungen über den Arbeitsaufwand beim Blockwalzen. Stahl u. Eisen 55 (1935) S. 1182/88 (Walzw.— Aussch. 123).
16. Elms, C.. Iron Steel Engr. 18 (1941) S. 68/71: vgl. Stahl u. Eisen 64 (1944) S. 807—08.
17. Trinks, W. Roll pass design. Supplement to Vol. I u. II. Cleveland (Ohio) 1937. S. 25.
18. Dahl, Th. Erkenntnisstand auf dem Gebiete der Warmverformung. Stahl u. Eisen 68 (1948) S. 333 45 (Walzw — Aussch. 184); s. bes. S. 338/40.
19. Siebel, E. Über das Breiten beim Walzen. Stahl u. Eisen 57(1937) S. 413/19.
20. Tafel, W., u. H. Sedlaczek. Das Breiten beim Walzen. Stahl u. Eisen 45(1925) S. 190/93.
21. Emicke, O., u. E. Pachaly. Das Breiten beim Walzen in Abhängigkeit von Walzgeschwindigkeit, Walzendurchmesser und Stahlzusammensetzung. Stahl u. Eisen 56(1936) S. 589/99. (Walzw.— Aussch. 125).
22. Lueg, W. Die Ermittelung der Breitenzunahme beim Warmwalzen von Stahl auf glatter Walzbahn. Arch. Eisenhüttenw. 20(1949) S. 59/68
23. Ekelund, S. Einige dynamische Erscheinungen beim Walzen. Jernkont. Ann. III(1927) S. 39/97.
24. Lendl, A. E. Größere Walzenhaltbarkeit infolge sachlicher und praktischer Kalibrierungsüberlegung. I/VII. Iron Steel 14(1941) S. 146/50, 352/55 u. 365; 16(1942) S. 5/9, 14, 37/40 u. 45; 16(1943) S. 460/64 u. 532/36; 17(1943) S. 173/79; 17(1944) S. 313/18; vgl. Stahl u Eisen 63(1943) S. 480/81 u. 540/41; 64(1944) S. 206/09.

25. Cramer, H. Oberflächenfehler auf Walzgut. Stahl u. Eisen 53(1933) S. 973/84 (Walzw.— Aussch. 103 u. Stahlw.— Aussch. 263).
26. Cramer, H.. Der Einfluß einiger. Kalibrierungsarten auf das Entstehen von Druckfaltungsrissen bei Walzstäben. Stahl u. Eisen 55(1935) S. 797/805 (Walzw. — Aussch. 121).
27. Pomp, A., u. W. Lueg. Über die Ausbildung von Druckfaltungen beim freibreitenden Walzen von Stahl. Arch. Eisenhüttenw. 14(1940/41) S. 589/600 (Walzw. Aussch. 163);vgl. Stahl u. Eisen 61(1941) S. 613/14.
28. Oertel, W., u. L. A. Richter. Der Einfluß der Desoxydation auf die Warmverarbeitbarkeit und die Eigenschaften eines Chromnickel-Baustahl. Stahl u. Eisen 44(1924), S. 169/171.
29. Wusatowski, Z., u. Wusatowski R. Der Einfluß der Walzgeschwindigkeit, der Temperatur und der Walzenart auf Breitung und Verlängerung beim Warmwalzen. Prace Badawcze Glown. Inst. Metal. i Odlewn. I (1949) Nr. 1, S. 27/58; vgl. Stahl u. Eisen 72(1952) S. 954.
30. Puppe, J.. Versuche zur Ermittelung des Kraftbedarfs an Walzwerken. Düsseldorf 1909.

II. Прокатка блумов и слабов

31. Russel, G. A. V. Gesichtspunkte für den Bau von Umkehrblockwalzwerken. Mech. Engng. 49(1927) S. 1331/34; vgl. Stahl u. Eisen 48 (1928) S. 375/76.
32. Kiesselbach, C. Über das Blockwalzen. Stahl u. Eisen 40(1920) S. 80/85.
33. Emicke, O., u. H. Allhausen. Bestimmung der Stichfolge beim Walzen. Stahl u. Eisen 54(1934) S. 492/500.
34. Сидельковский М. П., Усиенко А. М., Бахтинов Б. П. Улучшение калибровки Магнитогорского блуминга. Металлург, 1940, № 11/12, с. 49/60.
35. Holzweiler, M. Das Blockwalzen. Stahl u. Eisen 66/67(1947) S. 315/18 (Walzw.— Aussch. 182).
36. Rademacher, O., Neuzeitliche Walzenschärfung. Stahl u. Eisen 63(1943) S. 446/47.
37. Russel, G. A. V., u. G. W. Fox. Neue Umkehr-Blockstraße der United Steel Co., Ltd., Sheffield. J. Iron Steel Inst. 152(1945) S. 319/32; vgl. Stahl u. Eisen 69(1949) S. 962/63.
38. Spenlé, E. A.. Die Blockstraße in Edelstahlwerken. Stahl u. Eisen 69(1949) S. 443/50 u. 958/59 (Walzw.— Aussch. 186).
39. Hammond, C. P., u. A. M. Cameron. Das neue Edelstahlwerk der Atlas Steel Ltd., Canada. Iron Steel Engr. 21 (1944) Nr. 41, S. 66/73, vgl. Stahl u. Eisen 69 (1949) S. 454/56.
40. Beynon, R. E., Das Walzen von Halbzeug in Amerika. Iron Steel Engr. 21.(1944) Nr. 8, S. 37/54; vgl. Stahl u. Eisen 69 (1949) S. 844/48.

III. Прокатка заготовки, сутунки и полос

41. Dahl, Th. Vorwalzenkalibrierungen und Kaliberanordnungen auf festliegenden Triowalzen. Stahl u. Eisen 52(1932) S. 779/83.
42. Emicke, O. Graphische Ermittelung und Nachprüfung von Vor und Streckkaliberreihen. Stahl u. Eisen 52 (1932) S. 505/11 (Walzw.— Aussch. 94).
43. Emicke, O. Stand und Fortentwicklung der Walzenkalibrierung Techn. Mitt. 30 (1937) S. 94/110.
44. Mercader, E. Berechnung der Streckkaliber. Stahl u. Eisen 44 (1924) S. 361/63.
45. Nöll, A. Genauigkeitswalzungen. Stahl u. Eisen 54 (1934) S. 893/98 (Walzw.— Aussch. 109).

46. Cramer, H. Oberflächenfehler auf Walzgut. Stahl u. Eisen 53 (1933) S. 973/84 (Walzw.— Aussch. 103 u. Stahlw.— Aussch. 263).
47. Cramer, H., Der Einfluß einiger Kalibrierungsarten auf das Entstehen von Druckfaltungsrissen bei Walzstäben. Stahl u. Eisen 55 (1935) S. 797/805 (Walzw.— Aussch. 121).— Erörterungsbeitrag von Th. Dahl u. A Spenlè. Das Breiten beim Walzen bei verschiedenen Walzgeschwindigkeiten und Stahlzusammensetzungen. Stahl u Eisen 56 (1936) S. 544/49 (Walzw.— Aussch. 124); s. bes. S. 548.
48. Rohn, W. Kontinuierliche Walzenstraße für Werkstoff mit hoher Festigkeit. Stahl u. Eisen 49 (1929) S. 1757/60 u. 1793/97.
49. Iron Steel Engr. 26 (1950) № 8, S. 100/07.

IV. Прокатка прутковой стали

50. Cramer, H. Das Walzen von Rundstahl aus freier Hand. Stahl u. Eisen 56 (1936) S. 1338/42.
51. Trinks, W. Roll pass design. Vol. 2. Cleveland (Ohio). S 83, Taf. 22.
52. Sedlaczek, H. Führungskasten zum Walzen von Rundeisen. Stahl u. Eisen 55 (1935) S. 466/67.
53. Stewartson, R. Das Walzen von genauen Rundabmessungen in den Vereinigten Staaten von Amerika. J. Iron Steel Inst. 172 (1952) S. 419/26; vgl. Stahl u. Eisen 73 (1953) S. 1236/38.
54. Nöll, A. Genauigkeitswalzung. Stahl u. Eisen 55 (1935) S. 893/98 (Walzw.— Aussch. 109).
55. Körber, F., u. W. Asbeck. Die Verzunderung von Stahldraht und deren Einfluß auf die Weiterverarbeitung. Stahl u. Eisen 57 (1937) S. 1189/95, 1216/25 u. 1249/55 (Walzw.— Aussch 142).
56. Wiesecke, H. Das Warmwalzen von Draht und Bandstahl. Stahl u. Eisen 63 (1943) S. 953/61.

V. Прокатка и калибровка сортовой стали

57. Vollmacher, H. Verformungsverhältnisse bei der Thyssenschen Scheinenkalibrierung. Stahl u. Eisen 72 (1952) S. 611/16 (Werkstoffaussch. 786).
58. Puppe, H. Die Notwendigkeit des seitlichen Bruches in geschlossenen Kalibern. Stahl u. Eisen 50 (1930) S. 1750.
59a. Metz, N. Experimentelle Untersuchungen über das Warmwalzen des Eisens. Rev. Metall., Mém., 22 (1925) S. 1/20 u. 60/87; vgl. Stahl u. Eisen 43 (1923) S. 994.
59b. Metz, N. Experimentelle Untersuchungen über den Materialfluß beim Walzen. Arch. Eisenhüttenw. I (1927/28) S. 193/204 (Walzw.— Aussch. 51). vgl. Stahl u. Eisen 47 (1927) S. 1872/74.
60. Zuschriftenwechsel zwischen W. Tafel und H. Cramer zur Arbeit von H. Cramer. Zur Berechnung von Schienenkalibrierungen. Stahl u. Eisen 45 (1925) S. 799/802.
61. Cramer, H. Zur Berechnung von Schienenkalibrierungen. Stahl u. Eisen 44 (1924) S. 1012/15.
62. Holzweiler, C. u. Th Dahl. Über das Kalibrieren von Formstahl. Stahl u. Eisen 55 (1935) S. 1081/86; 56 (1936) S. 57/68, 1227/36 u. 1252/56; 57 (1937) S. 625/32; 59 (1939) S. 725/31, 1313/18 u. 1336/43.
63. Holzweiler, C. Das Walzen von ⊢⊣ und ⊔⊓—Stahl mit gemeinsamer Vorwalze. Stahl u. Eisen 61 (1941) S. 617/24.
64. Holzweiler, C. u. A. Keil. Kalibrieren eines Rillenschienprofils mit Verhältniszahlen. Stahl u. Eisen 67 (1947) S. 223/26
65. Beynon, R. E. Iron Steel Engr. 22 (1945) Nr. 2, S. 35/52; vgl. Stahl u. Eisen 69 (1949) S. 409/14.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Стр.

Предисловие 5

Глава I. **Основы теории прокатки и калибровки валков** 7

1. Основы технологии прокатки 7
Форма сечения исходного материала 7
Деформация металла на гладких цилиндрических валках 7
Прокатка в калибрах 8
Построение калибров 12
Направление прокатки 13
Деформация деталей стана при прокатке (пружинение) 13
Изготовление калиброванных валков 14
Обжатие заготовки по высоте и ширине 14
Рабочий диаметр валков, верхнее и нижнее давление в клети дуо 16
Расположение калибров по отношению к линии прокатки в стане дуо 18
Верхнее и нижнее давление, расположение калибров и нейтральной линии в стане трио 22
2. Основы расчета 30
3. Процесс прокатки 35

Глава II. **Прокатка плоских и квадратных слитков и калибровка обжимных валков** 44

Общие понятия 44
Основы прокатки слитков 44
Типы обжимных станов 45
Валки обжимных станов 58
Калибровка валков обжимных станов 61
Способы увеличения захватывающей способности валков блумингов 63
Блуминги для прокатки специальной стали 67
Блуминги с фасонными калибрами 69
Непрерывные блуминги 71

Глава III. **Прокатка заготовки, сутунки и полосы** 74

Общие положения 74
Обжимные (черновые) клети заготовочных станов 74
Основы расчета 75
Типы заготовочных станов и калибровок 99
Типы сутуночных станов и калибровок 109

Глава IV. **Прокатка квадратной и круглой стали** 127

1. Прокатка квадратной стали 127
   Прокатка квадратной стали без проводок (ручной способ) .. 127
   Прокатка квадрата из ромба в проводках 130
2. Прокатка круглой стали 133
   Прокатка круглой стали без проводок (ручной способ) 133
   Прокатка круга из овала в проводках 136
3. Скручивание полосы при прокатке сортового металла 142
4. Точная прокатка круглой и квадратной стали 146
5. Типы сортовых и проволочных станов 150

Глава V. **Прокатка и калибровка фасонных профилей** 160

1. Общие понятия о калибровке фасонных профилей 160
2. Калибровка валков для прокатки двутавровых балок 171
   Калибровка двутавровой балки № 12 171
   Калибровка двутавровой балки № 50 178
   Определение числа проходов при прокатке двутавровых профилей 179
   Изменение коэффициента обжатия и вытяжки по проходам при прокатке двутавровых балок 183
3. Калибровка швеллера 196
   Калибровка швеллера № 20 в 7 проходов 196
   Калибровка швеллера № 20 в 5 проходов 204
   Общие положения калибровки швеллеров 207
   Сопоставление калибровок двутавровых балок и швеллеров .. 210
4. Прокатка фасонных профилей на существующих станах 213

Заключение 222

Библиография 224

ЗАМЕЧЕННЫЕ ОПЕЧАТКИ

Стр.	Строка	Напечатано	Должно быть	По чьей вине
47	13 сн.	ниж-	сред-	Перев.
64	Подпись под рис. 52, 2 сн.	12-м	13-м	»
82	10 сн.	равна J	J равна	»
86	11 св.	$\frac{1}{2\alpha}$	$\frac{1}{\sin 2\alpha}$	»
99	7 и 8 св.	Калибровка	Калибровка квадрат—овал	»
48	3 сн.	Подробное	Подобное	»
70	Подпись под рис. 158, 5 сн.	— высота	V_g — высота	Тип

Заказ 1237