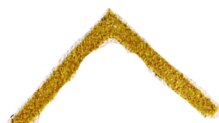


В. Т. ЖАДАН
В. Е. СТЕФАНОВ

**ЭФФЕКТИВНЫЙ
СПОСОБ
ПРОКАТКИ
ФАСОННЫХ
ПРОФИЛЕЙ**



В. Т. ЖАДАН, В. Е. СТЕФАНОВ

ЭФФЕКТИВНЫЙ СПОСОБ ПРОКАТКИ ФАСОННЫХ ПРОФИЛЕЙ

Под научной редакцией
проф. докт. техн. наук П. И. Полухина



ИЗДАТЕЛЬСТВО «МЕТАЛЛУРГИЯ»
Москва 1970

Эффективный способ прокатки фасонных профилей. Жадан В. Т., Стефанов В. Е.
Изд-во «Металлургия», 1970, 216 с.

В книге рассмотрены способы прокатки и методы расчета калибровки угловой стали, швеллеров и других фланцевых фасонных профилей, а также прокатка этих профилей способом постепенного сгибания полок, внедренная на заводе «Азовсталь». Приведены результаты исследования прокатки швеллеров на рельсобалочном стане. Показана экономическая эффективность перехода с обычной прокатки на прокатку профилей способом постепенного сгибания полок.

Книга предназначена для инженерно-технических и научных работников металлургических заводов и институтов, а также может быть полезна студентам металлургических вузов. Илл. 70. Табл. 23. Библ. 51 назв.

ЖАДАН Василий Тимофеевич,
СТЕФАНОВ Валентин Ефимович

ЭФФЕКТИВНЫЙ СПОСОБ ПРОКАТКИ ФАСОННЫХ ПРОФИЛЕЙ

Редактор издательства А. Л. Озерецкая
Технический редактор Т. С. Пронченкова
Обложка художника В. Ю. Марковского

Сдано в производство 20/XI 1969 г.
Подписано в печать 1/VI 1970 г.
Бумага типографская № 2. 84×108¹/₃₂. 3,38 бум. л.
11,34 печ. л. (усл.). Уч.-изд. л. 10,65.
Заказ 1219. Изд. № 5514.
Т-08837 Тираж 1700 экз. Цена 53 коп.

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

Московская типография № 21 Главполиграфпрома
Комитета по печати при Совете Министров СССР.
Москва, 88, Угрешская, 12.

3-12-3

60-70

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	5
Глава I. Способы прокатки и методы калибровки угловой стали, швеллеров и других фасонных профилей	7
1. Способы прокатки угловой стали, швеллеров и боковин шахтного конвейера	7
2. Скоростные условия в калибрах при существующих способах прокатки уголков, швеллеров и боковин шахтного конвейера	14
3. Методы расчета калибровки уголков, швеллеров и боковин шахтного конвейера	25
Глава II. Особенности деформации металла и методы расчета калибровки валков при постепенном сгибании полок профиля	40
1. Сущность развернутого способа прокатки при постепенном сгибании полок профиля	40
2. Метод расчета калибровки уголков, швеллеров и других фасонных профилей способом постепенного сгибания полок	52
3. Скоростные условия и распределение сил трения в калибрах по развернутой калибровке способом постепенного сгибания полок	118
Глава III. Результаты исследования прокатки швеллеров по прямополочной и развернутой калибровке способом постепенного сгибания полок	132
1. Исследование энергоскоростных параметров прокатки швеллера № 30	132
2. Опытное определение опережения и отставания в калибрах при прокатке швеллера № 30	151
3. Исследование износа валков при прокатке швеллера № 30	169

4. Исследование неравномерности деформации и формоизменения металла в швеллерных калибрах.	15
Глава IV. Опытнo-промышленная прокатка швеллеров, уголков и других фасонных профилей способом постепенного сгибания полок.	19
1. Прокатка швеллеров.	19
2. Прокатка угловой стали.	20
3. Прокатка боковины шахтного конвейера	20
4. Экономическая эффективность прокатки швеллеров и других профилей способом постепенного сгибания полок	21
Литература.	21

ВВЕДЕНИЕ

Основой интенсификации металлургического, в том числе прокатного, производства являются оптимальные технологические режимы, обеспечивающие рост объема производства, повышение качества продукции и улучшение других технико-экономических показателей.

При прокатке швеллеров и других фасонных профилей интенсификация режимов обжатий и улучшение основных технико-экономических показателей может быть достигнута использованием развернутого способа прокатки. Однако несмотря на свои очевидные достоинства, этот способ прокатки для производства швеллеров больших номеров и других крупных фасонных профилей должного распространения не получил из-за неустойчивости процесса в прямополочном калибре, производящем сгибание развернутого профиля. Поэтому дальнейшее развитие и усовершенствование развернутого способа прокатки имеет актуальное значение.

Для использования преимуществ развернутой калибровки при прокатке швеллеров и других фасонных профилей предложено их выполнять способом постепенного сгибания полок, который представляет собой дальнейшее развитие и усовершенствование развернутой калибровки.

Сущность этого способа прокатки состоит в том, что переход от развернутого до горизонтали калибра к прямополочному осуществляется постепенно с применением ряда переходных кривополочных калибров, обеспечивающих плавное формоизменение профиля.

В настоящей работе изложены способы прокатки и методы расчета калибровок уголков, швеллеров и боковин шахтного конвейера постепенным сгибанием их полок. Предлагаемые методы расчета основаны на равенстве коэффициентов вытяжки по элементам профиля, что способствует уменьшению перемещения металла из одной части калибра в другую в процессе деформации, сокращает износ валков и расход энергии.

Определение элементов переходных сечений профиля по средним линиям дает возможность постепенно разворачивать профиль по ходу калибровки и находить наиболее благоприятные формы переходных кривополючных калибров, обеспечивающих должную устойчивость процесса прокатки.

Разработанный метод расчета калибровки уголков, швеллеров и профиля боковины шахтного конвейера позволяет выбирать наиболее оптимальное формоизменение металла по калибрам.

Глава I

СПОСОБЫ ПРОКАТКИ И МЕТОДЫ КАЛИБРОВКИ УГЛОВОЙ СТАЛИ, ШВЕЛЛЕРОВ И ДРУГИХ ФАСОННЫХ ПРОФИЛЕЙ

1. СПОСОБЫ ПРОКАТКИ УГЛОВОЙ СТАЛИ, ШВЕЛЛЕРОВ И БОКОВИН ШАХТНОГО КОНВЕЙЕРА

Способ прокатки угловой стали

Из профилей, рассматриваемых в данной работе, уголок является самым простым. Некоторые авторы считают, что прокатка фасонных профилей началась с производства уголков примерно в период между 1800 и 1819 гг. В настоящее время угловая сталь широко используется для изготовления элементов различных конструкций.

Рассматривая различные способы прокатки уголков, можно выделить из них два основных: прямополючный и развернутый.

Прокатка угловой стали по прямополючному способу (рис. 1, а) состоит в том, что исходную заготовку последовательно обжимают в системе закрытых калибров, угол между полками которых изменяется от 120—145° в первом фасонном до 90° в чистовом калибрах; этот способ наиболее старый и в настоящее время на отечественных заводах мало применяется вследствие многих недостатков. Один из существенных недостатков прямополючной калибровки уголков состоит в том, что необходимо иметь сравнительно глубокие врезы в валках, что ослабляет бочку валка и для обеспечения требуемой их прочности приходится увеличивать исходные диаметры бочек валков.

Применение прямополючных закрытых калибров затрудняет прокатку нескольких уголков разных толщин в одних калибрах ввиду значительных изменений ширины полки вместе с изменением толщины профиля при подъеме или опускании верхнего валка. Кроме того, при прокатке уголков по прямополючной калибровке наблюдается зна-

чительная разница в рабочих диаметрах, обрабатывающих различные части профиля. Это обуславливает различие окружных скоростей валков по периметру калибра и приводит к увеличению скольжения и сил трения между по-

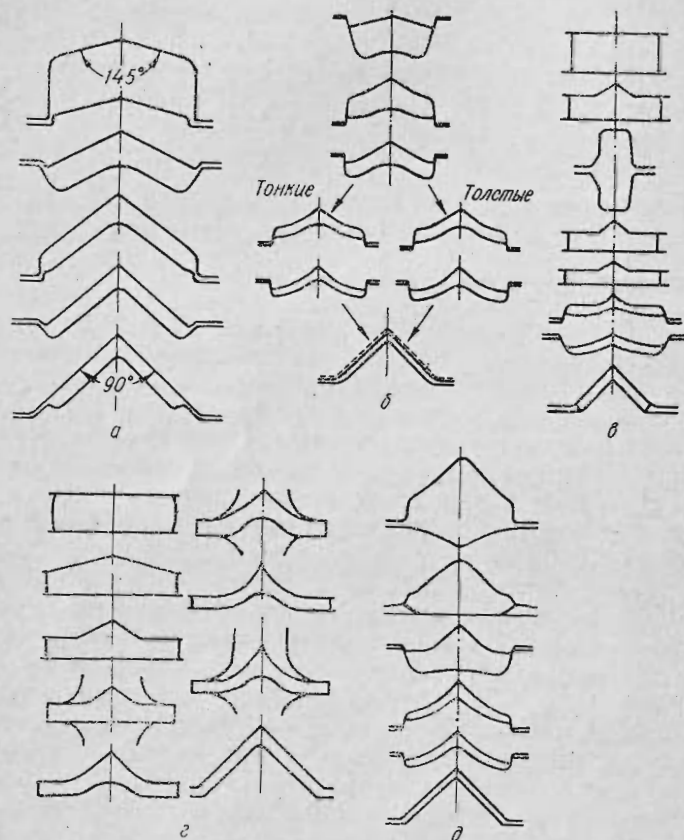


Рис. 1. Способы прокатки уголков

лосой и валками, а последнее — к росту расхода энергии и износа валков, а также к ухудшению поверхности профиля [2].

Прокатка угловой стали по развернутому способу (рис. 1,б) также известна давно; впервые она отмечена в патенте США в 1875 г. [1]. Профиль прокатывают в систе-

ме закрытых калибров с развернутыми (изогнутыми) до горизонтали полками. При развороте полок врез в валки значительно меньше, чем в ранее рассматриваемом способе, вследствие этого разность рабочих диаметров по ширине калибра сокращается, что уменьшает скольжение металла относительно валков, износ калибров и расход энергии. Однако резкое формоизменение в чистовом калибре профиля уголка с отворотом полок до горизонтали, особенно в случае прокатки уголков с толстыми полками и неравнобоких уголков, вызывает неустойчивость процесса, разнотолщинность полок и в ряде случаев является причиной поперечных трещин на наружных границах полок.

В настоящее время всеобщее распространение получила система калибров с развернутыми полками для прокатки уголков.

Одна из разновидностей развернутой калибровки — это так называемая универсальная калибровка (рис. 1,в), представляющая собой систему развернутых открытых черновых и закрытых предчистовых калибров. Основное достоинство этой калибровки состоит в том, что в черновых калибрах прокатку можно вести без ограничения уширения, благодаря чему их используют для получения угловых профилей различных размеров. Другая разновидность развернутого способа производства угловой стали — это прокатка в системе открытых развернутых калибров (рис. 1,г), применяемая на непрерывных мелкосортных станах, имеющих клетки с горизонтальными и вертикальными валками. Эта калибровка позволяет упростить настройку стана и повысить стойкость валков. Следующей разновидностью развернутого способа прокатки уголков служит диагональная калибровка (рис. 1,д), обеспечивающая надежное выполнение элементов профиля.

Способ прокатки швеллеров

Существующие способы прокатки швеллеров можно разделить на две группы: с прямыми полками и с разворотом полок (рис. 2). К первой группе относятся балочный, с увеличенным до 15—20% выпуском полок и способ со сгибанием прямых полок, ко второй группе — прокатка в системе калибров с разворотом полок по радиусу. Последний способ также имеет ряд разновидностей, различающихся формой калибров и методами расчета.

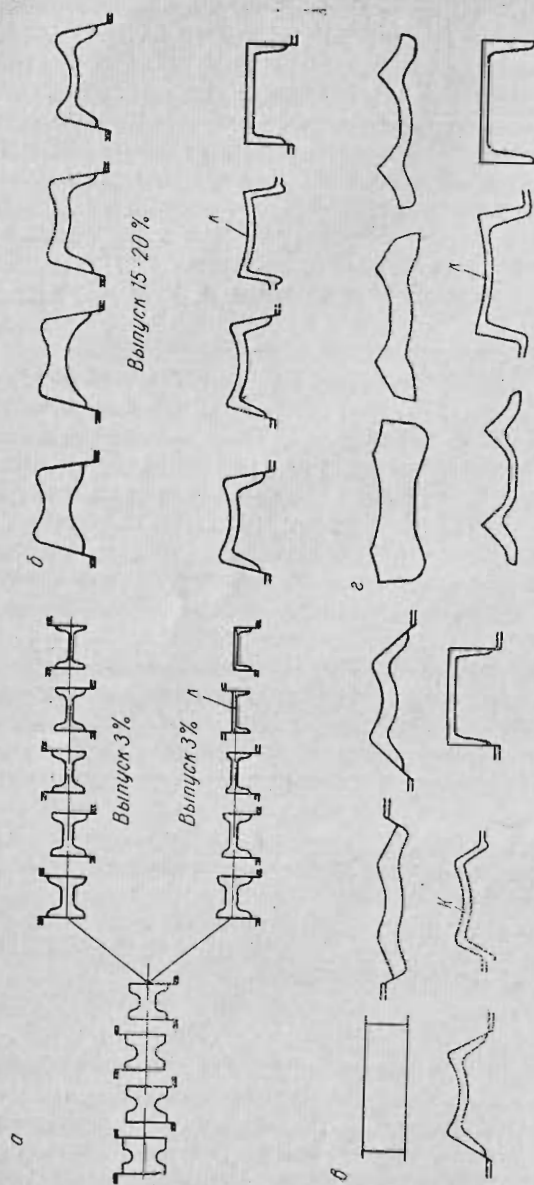


Рис. 2. Способы прокатки швеллеров:

а — балочный; б — с увеличением до 15—20% выпуска полок и изогнутой стенки; в — сгибание прямых полок; г — сгибание прямых полок; д — сгибание прямых полок; е — сгибание прямых полок; ж — сгибание прямых полок; з — сгибание прямых полок; и — сгибание прямых полок; к — сгибание прямых полок

На отечественных заводах до 50-х годов швеллеры прокатывали в основном балочным способом (рис. 2,а). Этот способ получил в свое время широкое распространение благодаря возможности использовать одни и те же валки черновых клетей при прокатке балок и швеллеров одних и тех же номеров, заменяя валки только чистовой линии, что сокращало парк валков и время на перевалку [3,5]. Формирование швеллерного профиля осуществлялось в системе калибров с открытыми фланцами; для получения полки увеличенной высоты по сравнению с балками того же номера были использованы так называемые ложные фланцы. Заданную высоту полки контролировали в предчистовом закрытом (контрольном) калибре; иногда применяли второй — черновой — контрольный калибр.

На современных высокопроизводительных прокатных станах завода «Азовсталь», Кузнецкого металлургического комбината (КМК), Нижне-Тагильского металлургического комбината (НТМК) и других, этого преимущества практически нет, так как прокатка одного номера балок и швеллеров не бывает смежной по времени. Кроме того, во время перевалки валков клетей чистовой линии можно одновременно осуществить перевалку валков и обжимной клетки, не увеличивая продолжительность перевалки. Следовательно, преимуществ прокатки швеллеров балочным способом нет, однако недостатки прокатки по этому способу весьма существенны. Например, из-за необходимости принятия сравнительно высокой заготовки увеличиваются суммарная деформация в условиях резко выраженной неравномерности деформации по ширине полосы, а также расход энергии; требуются весьма большие обжатия ложных фланцев в черновых калибрах (см. рис. 2, а), что также повышает расход энергии и износ калибров; очень сильно изнашиваются калибры за счет большой разности окружных скоростей по периметру калибра; отмечается также значительный расход валков из-за больших съемов металла при переточках.

Чтобы избежать или хотя бы свести до минимума недостатки, присущие балочному способу прокатки швеллеров, калибровщики разработали более рациональную систему калибров для прокатки швеллеров, т. е. калибровку с открытыми фланцами и с увеличенным выпуском полок (рис. 2,б). В этой системе калибров выпуск наружных граней полок увеличен до 15—20% с изгибом стенки и с

сохранением прямого угла между полкой и стенкой. Поскольку прокатку ведут в системе швеллерных калибров с открытыми фланцами, контроль заданной высоты полок обеспечивается обычно в двух (черновом и предчистовом) контрольных калибрах. Новая система калибров, начиная с 1954 г., была внедрена для прокатки швеллеров № 16, 18, 20 и 22 на стане 650 завода «Азовсталь».

Применение калибровки с увеличенным выпуском полок несколько уменьшило глубину вреза ручьев, что повысило прочность валков в опасном сечении и уменьшило исходные диаметры бочек, необходимые для изготовления новых комплектов валков [4, с. 387]. Увеличение выпуска наружных граней полок до 15—20% позволило наполовину уменьшить съем металла при переточках валков и увеличить срок их службы. Увеличенный выпуск наружных граней полок и изгиб стенки черного швеллерного профиля позволили применить более интенсивные обжатия, что оказалось очень важным при освоении облегченных швеллеров. Черновые калибры с увеличенным выпуском полок при переточках полностью восстанавливались по ширине.

Прокатка швеллеров по способу сгибания прямых полок (рис. 2, в) представляет собой дальнейшее развитие способа с увеличенным выпуском полок и известна также очень давно [1]; в этой калибровке в черновых калибрах угол между полкой и стенкой больше 90° , а стенка может быть прямой или изогнутой. Основная деформация осуществляется в первых калибрах полосового типа, когда черновой профиль находится в стадии формирования. В последних проходах происходит сгибание полок профиля и выпрямление стенки при небольших обжатиях. Такому распределению обжатий соответствует форма черновых калибров, близкая к полосе, высокая пластичность металла в первых проходах и достаточная прочность валков черновых клетей, имеющих сравнительно неглубокие врезы. Основным недостатком этого способа прокатки швеллеров — неустойчивость процесса прокатки в калибрах, производящих выпрямление стенки и сгибание полок профиля, а также колебания высоты полок.

Прокатка швеллеров с разворотом полок по радиусу (рис. 2, г) относится к наиболее прогрессивным способам их производства. Он отличается высокой интенсивностью деформации металла в развернутых калибрах, что позво-

ляет сократить количество фасонных проходов, уменьшением износа калибров за счет незначительной разности окружных скоростей, возможностью восстановления калибров при переточке валков с небольшим съемом металла, уменьшением глубины вреза в валки и исходных диаметров бочек валков и увеличением их прочности, более равномерной деформацией металла по ширине полосы, что сокращает расход энергии и уменьшает процент обреза благодаря уменьшению утяжки по высоте полок и длине «язычков» и т. д.

Основной недостаток существующих разновидностей способа прокатки швеллеров с разворотом полок по радиусу состоит в необходимости применения сложных вводных пропусков для удерживания полосы в прямополочном калибре, производящем сгибание развернутого профиля, и неустойчивости процесса при переходе от полностью развернутого к прямополочному калибру.

Способ прокатки боковины шахтного конвейера

Корытный профиль для боковины секции шахтного конвейера КСП-630 (рис. 3) относится к разряду экономичных профилей. Освоение прокатки этого профиля позволило заменить два, ранее применявшихся профиля, одним, что уменьшило расход металла на 30%. Как видно из рис. 3, калибровка профиля КСП-630 выполнена по способу прокатки швеллеров с увеличенным выпуском полок (от 3 до 10%) [6]. Этот профиль имеет полки, которые различаются на 15 мм по высоте, что вместе с некоторой его несимметричностью создавало достаточно большие трудности при прокатке.

Для восприимчивости осевых усилий на валках были выполнены двусторонние опорные конусы. Сравнительно высокая боковая полка, равная в чистовом калибре 92 мм, по ходу калибровки все время увеличивалась и в первом фасонном калибре имела уже высоту 150 мм (см. рис. 3). Это предопределило глубокие врезы в валки, что снизило их прочность и было причиной частых поломок валков и аварий. Несимметричность профиля создавала осевые усилия на прокатные валки и была причиной серпения и скручивания полосы во время прокатки.

Калибровкой предусматривалось два контрольных калибра для обжатия обеих полок по ширине (VII и II

калибры), но несмотря на это высота полок по длине полойки изменялась, превышая пределы допусков. Прокатка по этой калибровке была неустойчивой и для промышленной партии потребовалось несколько корректировок.

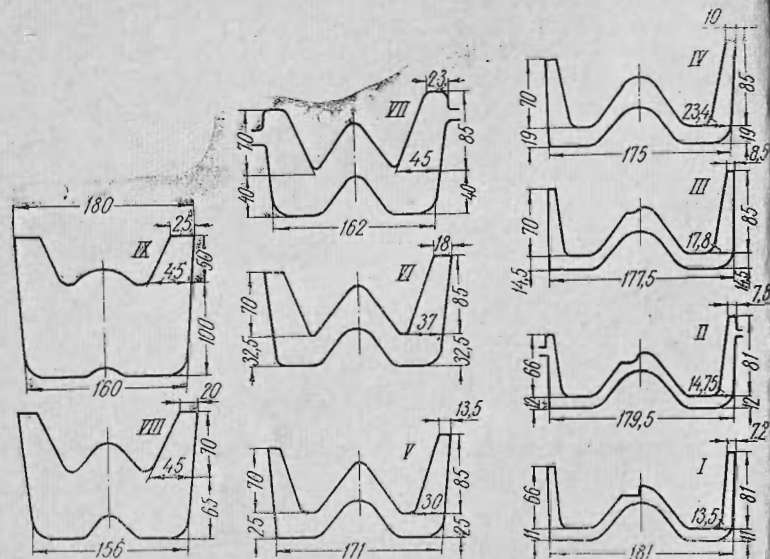


Рис. 3. Способ прокатки профиля боковины секции шахтного конвейера КСП-630 (здесь и далее I — IX — номера калибров)

Конструкция профиля также имела серьезные недостатки. Для их устранения был разработан новый профиль боковины решетки шахтного конвейера (рис. 4), у которого разница в высоте полок уже составляла 55 мм, что вызывало новые трудности при его прокатке.

2. СКОРОСТНЫЕ УСЛОВИЯ В КАЛИБРАХ ПРИ СУЩЕСТВУЮЩИХ СПОСОБАХ ПРОКАТКИ УГОЛКОВ, ШВЕЛЛЕРОВ И БОКОВИН ШАХТНОГО КОНВЕЙЕРА

Скоростные условия деформации в фасонных калибрах в значительной степени определяются рабочими диаметрами по периметру калибра.

Впервые четкое представление о скоростных условиях деформации металла с учетом разных рабочих диаметров

для фасонных профилей дано в трудах В. Е. Грум-Гржи-майло [7]. Без учета опережения можно считать, что полость выходит из валков со скоростью, соответствующей среднему рабочему диаметру.

Для практических расчетов достаточно определить средний рабочий диаметр по приведенной высоте калибра, которую находят делением площади калибра на его ши-

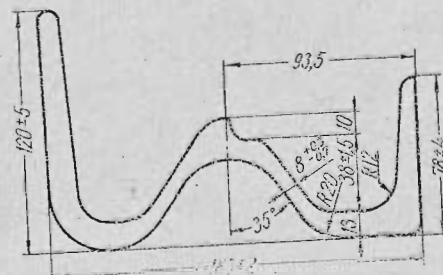


Рис. 4. Профиль боковины решетки шахтного конвейера СП-63

рину. В этом случае величину среднего рабочего диаметра D_p определяют из выражения

$$D_p = D_{cp} - \frac{F}{B}, \quad (1)$$

где D_{cp} — средний диаметр валков (расстояние между осями валков при прокатке), мм;
 F — площадь калибра, мм²;
 B — ширина калибра, мм.

Скоростные условия в уголовых калибрах

Как видно из схемы (рис. 5, а), в глубине ручья верхнего вала средняя скорость выхода металла из калибра, принятая за 100%, больше скорости вала на 22%, а на концах уголка на ту же величину скорость верхнего вала больше скорости металла. Эпюра скоростей точек калибра нижнего вала относительно прокатываемого металла качественно имеет тот же вид, но несколько отличается количественно; кроме того, опережение и отставание металла перераспределяются относительно валков, а именно: гребень калибра нижнего вала опережает скорость металла на 19%, а на концах уголка калибр отстает на 20%.

Металл вершины уголка обжимается в той части калибра, в которой поверхность верхнего валка отстает, а нижнего опережает среднюю скорость выхода полосы из валков; концы уголка обжимаются поверхностями калибра, распределение скорости которых относительно скорости полосы — противоположное выше рассмотренному. Следовательно, поверхность валков проскальзывает относительно обжимаемого металла на протяжении всего периметра калибра. Самое большое скольжение металла и на

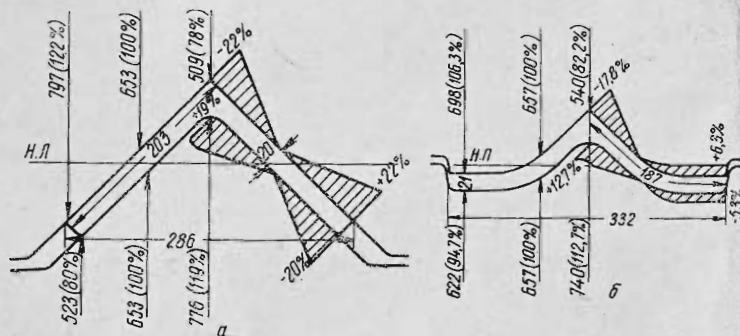


Рис. 5. Схема распределения рабочих диаметров и скоростей валков по периметру предчистового калибра уголка № 20 при прокатке на стане 650:

а — прямополочного; б — развернутого

большая работа сил трения и максимальный износ калибра должны быть в тех местах, где скорость металла в наибольшей степени отличается от скорости валка.

Максимального износа калибра с точки зрения распределения скольжения по периметру следует ожидать в глубине ручья верхнего валка, по гребню нижнего валка и у края полки уголка по верхнему и нижнему валкам. Опытные данные в общем подтверждают этот вывод [8,4, с. 199], хотя следует иметь в виду, что в этом случае калибры изнашиваются не только в результате скольжения, но и вследствие других факторов.

При распределении рабочих диаметров и скоростей валка по периметру развернутого уголкового калибра (рис. 5,б) в глубине ручья верхнего валка скорость металла больше скорости валка на 17,8%, а на концах уголка — меньше на 6,3%. Еще меньшее различие скоростей металла и обрабатываемых поверхностей нижнего валка. Из

этого следует, что в развернутом уголкового калибре скольжение прокатываемого металла относительно валков значительно меньше, чем в прямополочном.

Следовательно, развернутые уголкового калибры при прочих равных условиях меньше изнашиваются, чем прямополочные, и благодаря уменьшению работы сил трения требуют меньшей затраты энергии на деформацию. Эти преимущества развернутых уголкового калибров очевидно проявляются тем в большей мере, чем в большей степени

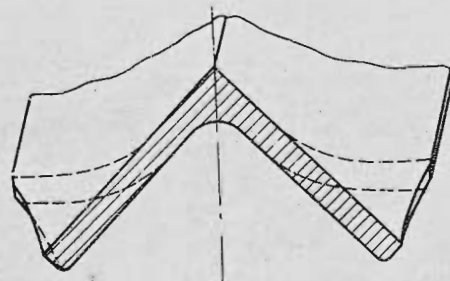


Рис. 6. Спрявление развернутых полок уголкового профиля в чистовом калибре

развернуты полки, т. е. чем меньше вертикальная проекция.

В применяемых на практике в настоящее время методах расчета развернутых уголкового профилей предусматривается отворот полок до горизонтали, начиная с предчистового развернутого калибра. Последний по ходу прокатки чистовой калибр, кроме определенной работы обжатия толщины полок, выполняет работу спрявления (выравнивания полок). Процесс спрявления отворнутых до горизонтали полок сопровождается растягиванием наружных граней краев полок (рис. 6). При прокатке толстых уголков (при толщине полки $d = 25 \div 30$ мм) профиль, задаваемый в чистовой калибр вследствие своей массивности и жесткости требует больших усилий для спрявления, что обуславливает большие напряжения растяжения в наружных гранях краев полок.

Напряжения растяжения, возникающие в наружных гранях краев полок при охлаждении, которое протекает неравномерно, еще больше возрастают и могут привести к появлению микро- и макротрещин. Кроме того, разворот

полок до горизонтали в предчистовом калибре не обеспечивает достаточно хорошего самоцентрирования полосы в чистовом калибре. Последнее при неточной задаче поло-

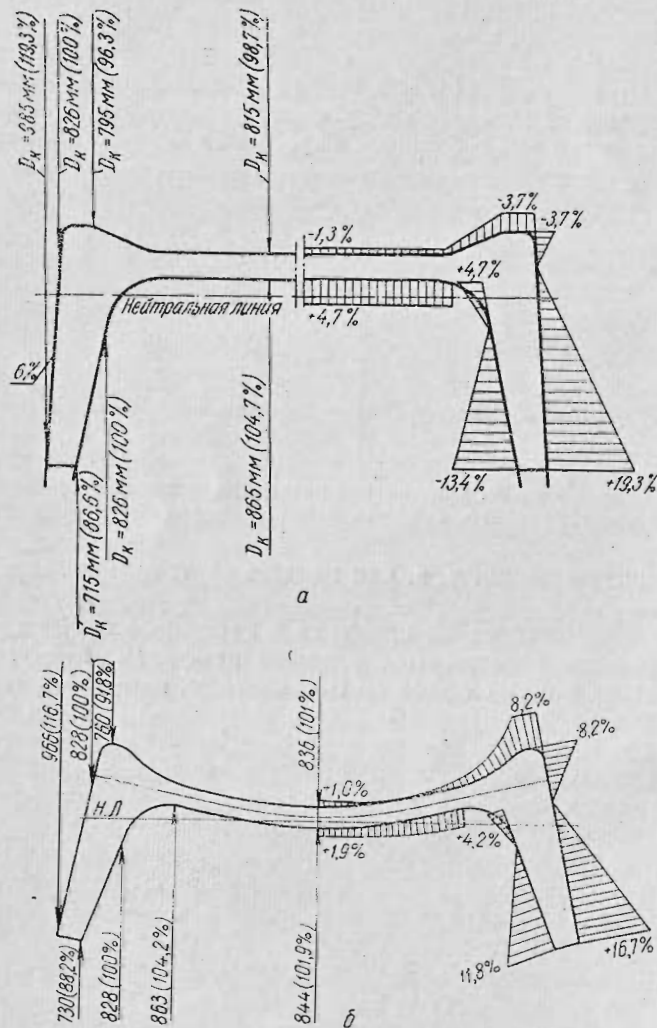


Рис. 7. Схема распределения рабочих диаметров и скоростей в балочном способе
а — по балочному способу; б — с увеличенным вылетом

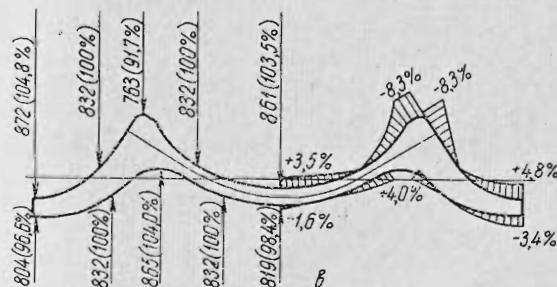
ны в калибр приводит обычно к сваливанию угла и разной ширине полок. Особо важное значение это имеет при прокатке неравнобоких угловых профилей с разной шириной полок.

Недостаток разворота полок предчистового калибра до горизонтали состоит еще в необходимости излишне глубоких презов в валках чистовой клетки. Ширина чистового калибра (горизонтальная проекция) должна быть с учетом радиусов скруглений буртов несколько больше ширины задаваемой полосы, чтобы не допустить захват полок буртами. Это увеличивает глубину вреза в валки чистовой клетки (вертикальную проекцию чистового калибра), что снижает прочность валков чистовой клетки и приводит к тому, что вершина профиля деформируется в слое валка малой твердостью. Такой калибр быстро изнашивается и ухудшает качество поверхности готового проката.

Скоростные условия в швеллерных калибрах

Балочный способ прокатки швеллеров в настоящее время почти не применяется и сохранился лишь на старых, малопроизводительных станах, где прокатывается небольшое число профилеразмеров и перевалка валков занимает много времени.

В рельсобалочном цехе завода «Азовсталь» усовершенствованная балочная калибровка швеллера № 24 [9] применялась до 1958 г. Поэтому рассмотрение скоростных и силовых условий в калибрах этой калибровки представляет некоторый интерес.



по периметру калибра при прокатке швеллера № 24 на рельсо-
стапе 850:

Рис. 7,а дает представление о распределении скольжения по периметру пятого по ходу расчета прямополочного калибра с выпуском 6% наружных граней полок. Из схемы следует, что наибольшая разность скоростей между полосой и валками наблюдается на конце наружной грани полки профиля и составляет $+19,3\%$. На конце внутренней грани полки валок отстает от полосы на $-13,4\%$. Согласно схеме распределения скольжения металла максимального износа следует ожидать на концах полок швеллерного калибра. Это же подтверждает и наблюдаемый на практике характер износа швеллерных калибров [8,4, с. 199; 10, 11].

Можно отметить значительную величину скольжения нижнего вала по стенке профиля ($+4,7\%$). Вследствие сравнительно большой протяженности стенки и меньшей, чем у остальных элементов профиля, толщины величина скольжения в $4,7\%$ может сильно влиять на расход энергии, необходимой для работы сил трения в калибре, и износ валков.

В настоящее время основным способом прокатки швеллеров можно считать прямополочный способ с увеличенным выпуском полок и изгибом стенки.

Величину среднего рабочего диаметра вала (см. рис. 7,б) определяли, как и ранее, по формуле (1). Из схемы рис. 7,б следует, что наибольшая разность скоростей между полосой и валками $+16,7\%$ (скорость вала больше скорости металла) отмечается на конце наружной грани полки профиля. На конце внутренней грани полки валок на $-11,8\%$ отстает от прокатываемого металла.

Распределение скоростей по периметру швеллерного калибра с увеличенным выпуском полок показывает, что наибольшего скольжения металла, а значит, и наибольшей работы сил трения и максимального износа калибра можно ожидать в местах, где скорость металла в наибольшей степени отличается от скорости вала, т. е. на концах полок швеллерного профиля [4, с. 199]. Износ калибров на конце полок возрастает еще и вследствие их малой толщины и самой низкой по сечению полосы температуры.

Из рис. 7,б видно также, что изгиб стенки приближает ее наиболее холодную среднюю часть к нейтральной линии калибра в зону меньших скольжений между валком и металлом, что уменьшает расход энергии на трение и износ калибров. Из сравнения эпюр распределения скорос-

ти валков в различных частях калибра относительно скорости полосы (рис. 7, а и б) следует, что изгиб стенки и увеличение выпуска прямой полки количественно мало изменяет величину скольжения в ручьях, формирующих полки профиля. В обоих случаях это скольжение остается относительно большим. Следовательно, только изгиб стенки при прямой полке еще не решает задачи существенного уменьшения скольжения металла относительно валков и на основе этого сокращения износа калибров и расхода энергии. Вместе с тем следует отметить также, что с увеличением выпуска полок уменьшается горизонтальная составляющая давления металла на бурты, что увеличивает их относительную прочность и в некоторых случаях позволяет использовать более дешевые и износостойкие чугунные валки.

Иная картина распределения по периметру калибра рабочих диаметров и скоростей валков у развернутого швеллерного калибра (рис. 7,в). При прокатке швеллера № 24 пятом (по ходу расчета) калибре максимальное скольжение металла относительно валков следует ожидать по нижним фланцам, где оно составляет $8,3\%$, а на концах полок со стороны верхнего вала $+4,8\%$ против $+19,3\%$ у балочной калибровки и $+16,7\%$ по калибровке с увеличенным выпуском полок, а со стороны нижнего вала $-3,4\%$ против соответственно $-13,4$ и $-11,8\%$. Скольжение в средней части стенки несколько больше ($+3,5\%$), чем по калибровке с увеличенным выпуском полок ($+1,9\%$). Однако по мере износа калибра по стенке заданные размеры легко восстанавливаются опусканием верхнего вала. Следует также подчеркнуть, что скольжение по полкам значительно меньше, чем по рассмотренным ранее другим способам прокатки, что создает более равномерный износ валков по периметру калибра.

Таким образом, применение развернутой калибровки швеллеров обеспечивает значительное уменьшение скольжения металла относительно валков, а следовательно, и уменьшение их износа.

Скоростные и силовые условия в калибрах профиля боковины шахтного конвейера

Профиль боковины решетки шахтного конвейера имеет довольно сложную конфигурацию (см. рис. 4). Конфигу-

рация последующих по ходу расчета калибров в зависимости от способа калибровки более или менее усложняется. Поэтому в качестве примера для определения скоростных условий в калибрах профиля боковины решетки шахтного конвейера рассматривается чистовой калибр

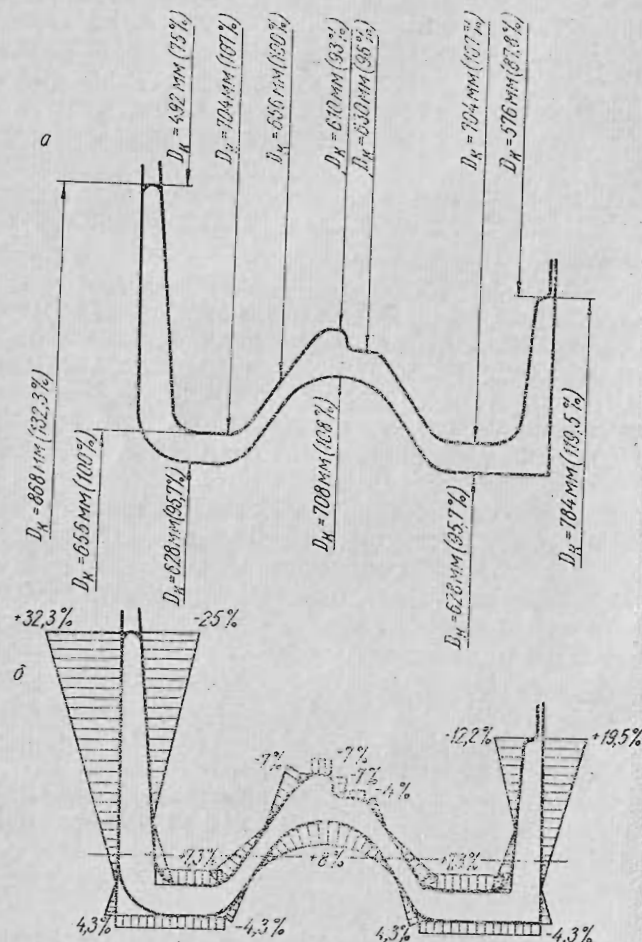


Рис. 8. Схема распределения рабочих диаметров (а) и скоростей валков (б) по периметру чистового калибра при прокатке профиля СП-63

Схема распределения рабочих диаметров и скоростей валков по периметру чистового калибра для прокатки профиля боковины шахтного конвейера СП-63 показана на рис. 8, а, б. Здесь, как и у швеллерных профилей, максимальное скольжение наблюдается на концах полок. Вследствие весьма большой высоты одной из полок ($h_1 = 120 \text{ мм}$) скорость металла на ее конце с наружной стороны на 32,3 % меньше скорости валков, а с внутренней стороны скорость металла на 25 % больше скорости верхнего вала (рис. 8, б).

Такая большая разница в скоростях между прокатываемым металлом и соответствующими точками калибров вызывает большое скольжение и большую работу сил трения в этих местах. Кроме того, профиль боковины конвейера прокатывают из относительно твердой стали марки 30Г2, что также способствует более быстрому, чем при прокатке обычных углеродистых сталей, износу прокатных валков. Опыт производства профиля СП-63 на крупнортном стане 650 завода «Азовсталь» полностью подтверждает высказанное положение о весьма быстром износе прокатных валков чистовой клетки в местах, соответствующих краю большой полки.

Разность в высоте полок профиля СП-63 составляет 120 мм, вследствие чего силовые условия относительно вертикальной оси в левой и правой частях калибра несимметричны. Это создает большие осевые усилия на прокатных валках и является причиной серпения и скручивания полосы во время прокатки. Выводная арматура в этих условиях служит непродолжительное время; тратится много времени на настройку и замену привалковой арматуры. Для восприятия осевых усилий на прокатных валках вытачивают опорные конусы, наличие которых усложняет изготовление валков и настройку стана.

Кроме того, при прокатке профиля боковины шахтного конвейера на станах трио между верхним и средним валком осевые усилия имеют одно направление, а между средним и нижним — другое. Таким образом, осевые усилия, действующие на средний валок, в каждом последующем проходе изменяют направление на противоположное. В связи с этим требуется выполнение двустороннего конуса, что намного в сравнении с обычными односторонними конусами усложняет изготовление валков и настройку стана.

Следующая отрицательная особенность профиля СП-63 состоит в том, что большая полка (которая с учетом полного допуска равна $h'_1 = 126$ мм) обуславливает весьма большую глубину вреза калибра. Валки с глубокими врезами имеют недостаточную прочность, что является причиной частых поломок и простоев стана при авариях. Указанные недостатки прямополочного способа калибровки в значительной степени затрудняют прокатку профиля боковины шахтного конвейера. Но на станах, где можно разместить все фасонные калибры в клетях чистовой линии, имеющих достаточно надежную выводную арматуру, прокатка все же возможна.

Крупносортовый стан 650 завода «Азовсталь», на котором предстояло освоить прокатку профиля СП-63, состоит из двух линий: черновой и чистовой.

На черновой линии находится обжимная реверсивная клеть 800, а чистовая линия состоит из трех клетей (две клетки трио 650 и одна дуо 650), расположенных в одной линии. Обжимная дуо-реверсивная клеть 800 черновой линии приводится электродвигателем мощностью 2940 кВт (4000 л.с) с 60—120 об/мин; длина бочки вала 2100 мм. Клеть оборудована кантователем с передней стороны манипуляторными линейками с задней стороны стана. Клетти I и II трио 650 чистовой линии приводятся от общего электродвигателя мощностью 4600 кВт с 80—180 об/мин. Средний диаметр валков 680 мм, длина бочки 1700 мм. Чистовая клеть дуо 650 приводится электродвигателем мощностью 1100 кВт при 100—220 об/мин. Средний диаметр валков 680 мм, длина бочки 1200 мм.

При разработке прямополочной калибровки профиля СП-63 с увеличенным выпуском полок оказалось, что в чистовой линии не размещается нужное число фасонных калибров, которых исходя из прочности валков должно быть не менее десяти.

Размещать фасонные калибры на обжимной дуо-реверсивной клетке 800 нельзя, так как при использовании прямополочной системы калибров большая разность в высоте полок создает осевые усилия между валками и является причиной серпения и скручивания полосы в процессе прокатки. Поскольку на обжимной клетке расстояние между осями валков от одного прохода к другому меняется, на валках нельзя выточить опорные конусы и установить арматуру. Следовательно, рассмотренная система кали-

3. МЕТОДЫ РАСЧЕТА КАЛИБРОВКИ УГОЛКОВ, ШВЕЛЛЕРОВ И БОКОВИН ШАХТНОГО КОНВЕЙЕРА

Методы расчета калибровки уголков

Поскольку прямополочный способ прокатки угловой стали в настоящее время применяется редко, то метод расчета калибровки уголков при производстве профиля по этому способу рассматривать не будем.

Прокатка угловой стали по развернутому способу позволяет приблизить условия деформации в развернутых калибрах к условиям деформации при прокатке полосы, тем значительно ослабляются или устраняются совсем недостатки прямополочного способа прокатки уголков.

Развернутая калибровка угловой стали успешно применяется в системе закрытых (см. рис. 1,б) и открытых калибров (см. рис. 1,в,г.).

Закрытые калибры используются в основном для прокатки угловой стали больших номеров, имеющей много размеров по толщине полок. Эта система калибров позволяет значительно ограничивать уширение, что облегчает прокатку стали нескольких толщин в одних калибрах.

Уголки малых размеров успешно прокатывают на непрерывных станах развернутым способом в открытых калибрах [12,13]. Особенно целесообразно использовать открытые калибры, если стан имеет в своем составе вертикальные клетки, что характерно для мелкосортных и среднесортных непрерывных станов, использование которых позволяет регулировать ширину полок. В некоторых случаях это дает возможность путем настройки прокатывать угловые профили смежных номеров в одних валках.

В настоящее время существует две системы развернутой калибровки, различающихся способом задачи заготовки первого фасонного калибра.

Первая (более старая) система предусматривает задачу и первый фасонный калибр прямоугольной заготовки. При этой калибровке угол между полками в пер-

вом фасонном калибре должен быть не менее 120—140 мм, иначе может оказаться невыполненным внешний угол профиля. Большинство методов расчета основано на постепенном разворачивании профиля уголка (увеличение угла закрытия полок) и степени обжатия.

Вторая система развернутых калибров угловых филей с отворотом полок рассчитана на диагональной задаче заготовки в первый уголкового калибр [14]. Основное преимущество диагональной задачи заготовки в уголкового фасонного калибра состоит в том, что кромки полосы выкатываются из углов заготовки, которые в меньшей степени, чем грани, поражены трещинами и волосовинами, а недостаток этой системы калибровки угловых филей — трудность задачи заготовки на диагональ и неравномерность деформации по ширине полосы в первом фасонных калибрах.

Существуют различные методы расчета угловых филей. К первой группе относятся методы Н. Меца [15], Б. П. Бахтинова [2] и Д. И. Старченко [16], которые базируются на подсчете уширения, отнесенного к горизонтальным проекциям калибров, а ко второй группе, разработанные А. П. Чекмаревым [6], И. И. Кучко [17], Б. В. Мерекиным [18], Н. В. Литовченко [13], М. М. Штеновым [19] — методы расчета, основанные на подсчете уширения, отнесенного к средней линии полок. Последние нашли более широкое применение и дают достаточно удовлетворительные результаты.

Методы расчета калибровки швеллеров

Балочный метод калибровки швеллера был разработан на основе метода расчета калибровки двутавровых балок. При этом в черновых калибрах, общих для балок и швеллеров одних номеров, сохраняется принцип чередования обработки металла в открытых и закрытых частях калибра [20, 21]. Балочный метод калибровки швеллеров вследствие наличия закрытых калибров и перегиба фланцев от одного калибра к другому в первых черновых проходах обуславливает небольшой выпуск полок, что определяет значительный сьем металла при переточках валков. Кроме того, для формирования профиля требуется большое число проходов, что значительно снижает производительность стана.

Главнейшее совершенствование балочного метода калибровки — сокращение числа балочных калибров. Так, в 1930 г. на заводе «Азовсталь» была разработана новая калибровка для прокатки швеллеров № 24 и 30 на рельсопрокатном стане. В этой калибровке балочные калибры, используемые для прокатки балок и швеллеров одних и тех же номеров, были оставлены только на обжимной и реверсивной клетях 900. Калибры чистовой линии имели выпуск полок 7—8%. Число контрольных калибров уменьшено; для швеллера № 30 оказалось достаточным двух контрольных калибров [9]. В качестве контрольных калибров (черновых и предчистовых) стали применять полузакрытые калибры с боковым разъемом в нижней части полок.

Балочный метод калибровки швеллеров характеризуется интенсивным обжатием ложных фланцев. Причем, как показали исследования Б. М. Шума [22], интенсивная деформация ложных фланцев весьма слабо влияет на приращение высоты действительных фланцев. Следовательно, при балочном методе калибровки швеллеров значительная часть энергии идет на неравномерную деформацию для получения высоких ложных фланцев, а затем на обжатие этих фланцев в швеллерных калибрах.

В настоящее время почти все отечественные заводы прокатывают швеллеры по калибровкам с увеличенным до 15—20% выпуском полок. В большинстве этих калибровок между полкой и стенкой сохраняется прямой угол. Средняя часть стенки изгибается по радиусу. Такое построение швеллерных калибров облегчает сгибание полосы в чистовом калибре и предотвращает появление морщин в местах сопряжения стенки с полками. Увеличенный выпуск полок позволяет интенсифицировать деформацию в фасонных калибрах, что особенно важно при прокатке обжатых швеллеров [4, с. 387].

В основу метода расчета калибровки швеллеров, разработанного И. И. Кучко на КМК [23], положен графический принцип изменения среднего коэффициента вытяжки, изменения коэффициентов обжатия стенки профиля по проходам и изменения отношения коэффициентов обжатия стенки и фланца в зависимости от номера профиля. Средняя величина коэффициента обжатия по стенке принимается равной среднему коэффициенту вытяжки всего профиля ($\lambda_{\phi} = \mu_{\text{ср}}$). С увеличением номера швеллера сред-

ний коэффициент вытяжки прямолинейно уменьшается 1,32 для № 18 до 1,26 для № 36; экстраполированием можно получить значения среднего коэффициента вытяжки и для остальных номеров швеллеров.

После выбора среднего коэффициента вытяжки в зависимости от номера профиля принимают график изменения коэффициентов вытяжки и коэффициентов обжатия стенок по проходам. Затем по специальному графику находят коэффициенты обжатия полок по калибрам. При этом график для определения коэффициентов обжатия полки построен так, что только швеллер № 33 имеет равные коэффициенты обжатия полки и стенки во всех калибрах. Для швеллеров меньшего размера предусмотрено превышение коэффициента обжатия стенки над коэффициентом обжатия полки, причем это превышение увеличивается к черновым проходам. Для швеллеров больших номеров (например, № 36) коэффициент обжатия стенки меньше, чем для полки, и по ходу прокатки коэффициенты обжатия постепенно сближаются.

Метод расчета швеллерных калибров, разработанный и внедренный на КМК, характеризуется стройностью системы выбора коэффициентов обжатий. Однако для разных станов величины и соотношения коэффициентов деформации полки и стенки должны иметь определенные значения, поскольку они зависят от многих факторов, например от изменения температурного и скоростного режимов прокатки, а также от прочности валков и мощности двигателей. Поэтому для каждого конкретного стана необходимо в зависимости от существующих условий построить кривые распределения коэффициентов деформации. Размер ложных фланцев по калибрам выбирают конструктивно.

Для расчета прямополочных швеллерных калибров на ММК разработан графо-аналитический метод, основанный на графическом распределении коэффициентов деформации элементов профиля по проходам [13].

Калибровочные данные рассчитывают в следующем порядке. Исходя из конкретных условий данного стана, а также формы и сечения исходной заготовки, распределяют коэффициенты деформации элементов профиля по проходам; причем величины этих коэффициентов должны соответствовать коэффициентам деформации двутавровых балок (открытые фланцы). Контрольные калибры строят главным образом конструктивно. Затем вычерчивают гра-

фик и по нему корректируют принятые коэффициенты деформации элементов для обеспечения плавности их уменьшения по ходу прокатки. После этого составляют сводную таблицу расчета калибровочных данных. Величину уширения по стенке, радиусы закруглений и выпуск калибров принимают в соответствии с общепринятыми рекомендациями. Приращение высоты действительного фланца $\Delta h_{д.ф.}$ принимается в пределах 1,0—3,0 мм, утяжку ложного фланца $\Delta h_{л.ф.}$ 1,0—7,0 мм.

Для расчета швеллерных калибров с увеличенным выпуском полки на НТМК разработан свой метод расчета [18], основанный на неравномерности деформации элементов профиля за счет превышения обжатия ложных фланцев над обжатиями действительных фланцев и стенки; в последних деформации также не одинаковы: $\lambda_c > \lambda_{д.ф.}$. Калибровку по этому методу начинают, как обычно, рассчитывать с определения размеров чистового калибра. Затем принимается число фасонных калибров и толщина стенки разрезного калибра. После этого назначают величины абсолютных обжатий и уширений стенки. Площади элементов калибров определяют с помощью так называемых коэффициентов подобия.

Метод расчета швеллерных калибров с увеличенным выпуском полки, разработанный на заводе «Азовсталь», основан на условии равенства коэффициентов вытяжки стенки и полки профиля (рис. 9) [4, с. 384].

Для определения коэффициентов вытяжки по элементам профиля и по калибрам устанавливают обжатие и уширение по стенке. Затем рассчитывают коэффициент вытяжки по стенке, который принимают и для вытяжки полки. Одинаковые коэффициенты вытяжки по элементам профиля способствуют уменьшению или даже исключению перетекания металла из одного элемента калибра в другой в процессе деформации, что сокращает расход энергии и износ валков. При определении обжатия по стенке следует учитывать потерю пластичности металла от одного прохода к другому, положение калибра в валках и наличие дублирующих калибров.

Для лучшего выполнения углов и сохранения в них высокой температуры, а также для достаточной устойчивости полосы в валках во всех калибрах, начиная с предчистового, делают ложные фланцы. Во избежание лишнего перетекания металла внутри калибра размеры лож-

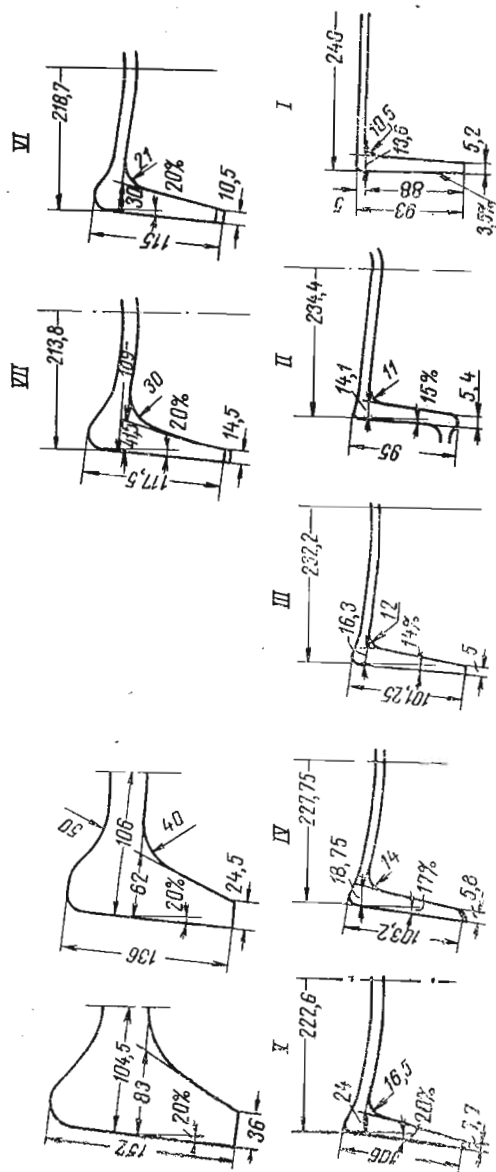


Рис. 9. Шаблоны калибров облегченного швеллера № 24 («Азовсталь»)

ных фланцев делают меньшими. Приращение высоты полки в швеллерных калибрах принимают в пределах $\Delta h = 0,5 \div 3$ мм в зависимости от номера швеллера и калибра. Меньшие значения принимают для меньших номеров швеллеров и для калибров ближе к чистовым. Зная

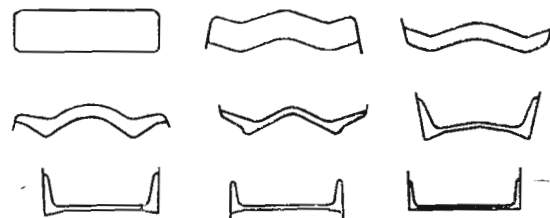


Рис. 10. Схема развернутой калибровки швеллеров, применяемая на заводах США

площадь F_n и высоту h полки, находят среднюю толщину полки

$$t = \frac{F_n}{h}.$$

Затем по известной толщине полки на конце a_n и коэффициенте вытяжки μ_n находят толщину полки на конце искомого калибра

$$a_{n+1} = \mu_n \cdot a_n.$$

Толщину полки у основания определяют из выражения

$$b_n = 2t - a_n.$$

Радиусы закруглений и выпуск калибров выбирают в соответствии с общепринятыми рекомендациями.

Развернутая калибровка швеллеров известна давно [1], однако несмотря на свои очевидные достоинства, она толкового распространения не получила. В поисках путей улучшения технологии прокатки швеллерных профилей прокатчики в Советском Союзе и за рубежом продолжают работу по совершенствованию развернутой калибровки с отвернутыми полками по радиусу и изогнутой стенкой в черновых и подготовительных калибрах. Так, кроме данных, содержащихся в работе [1], в 1945 г. сообщались результаты опробования прокатки швеллеров из прямоугольной заготовки по развернутой калибровке на

заводах США [24]. Отмечалось достигнутое при этом снижение расхода металла на тонну годного проката вследствие уменьшения длины концевой обрезки полосы, а также повышение износостойкости калибров и снижения расхода валков. В американских калибровках этого типа применяли закрытый по полкам предчистовой калибр с обжатием по высоте полок. Наряду с кривополочными черновыми развернутыми калибрами были предусмотрены,

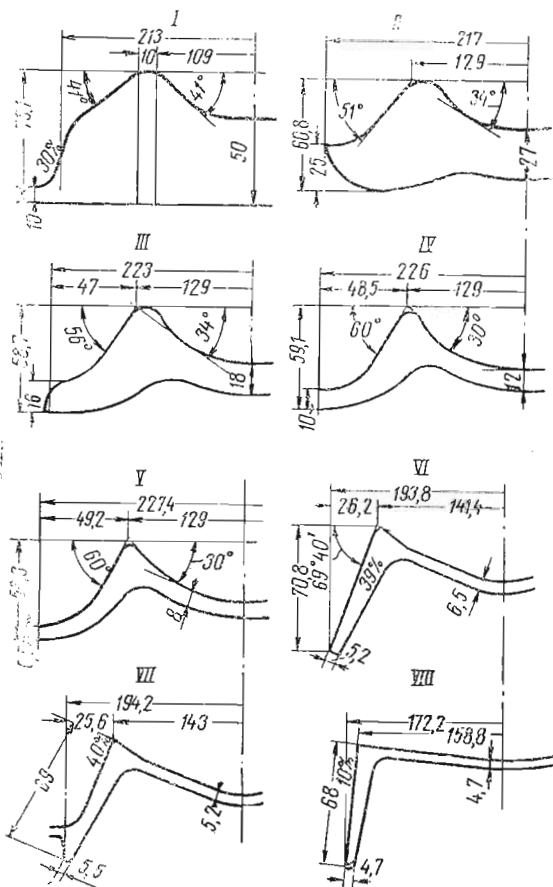


Рис. 11. Шаблоны развернутой калибровки швеллера № 16 (Д. И. Старченко)

кроме предчистового и чистового, еще два переходных прямополочных калибра (рис. 10), т. е. четыре прямополочных калибра [25].

Несмотря на то, что способ прокатки швеллеров по развернутой калибровке известен давно, методы расчета долгое время не были разработаны. В 1952 г. Д. И. Старченко [16, 26] опубликовал стройный метод расчета швеллеров по развернутой калибровке, учитывающий уширение швеллерных калибров по горизонтальным проекциям и разворачивание полок профиля до горизонтали с двумя (см. рис. 2, а), а позже — с тремя прямополочными калибрами (рис. 11) [6].

В последующие годы проводилась работа по внедрению развернутой калибровки на заводах.

Так, в 1958 г. были опубликованы результаты применения развернутой калибровки швеллера № 12 на Верхне-Салдинском заводе [27].

Данная развернутая калибровка характеризуется сгибанием профиля в одном чистовом калибре. Во всех остальных калибрах (кроме чистового) полки профиля развернуты до горизонтали. В черновых и подготовительных калибрах, начиная от первого фасонного калибра (по ходу прокатки) и кончая предчистовым, полоса калибруется по методу уголков.

При опробованиях этой калибровки выявились недостатки, связанные с колебанием размеров полок и невыполнением вершины внешних углов швеллера в местах соединения полок со стенкой. Эти дефекты были устранены ограничением уширения полки в чистовом калибре (закрывание калибра в этой части) и добавлением ложных фланцев в предчистовом калибре. В процессе работы по развернутой калибровке был опробован отделочный калибр с выпуском полок 10%, вместо обычных 1,5%. Доправку профиля производили на роликовой правильной машине.

Глубина врезов калибров в валки при данном способе калибровки примерно в два раза меньше по сравнению с балочной калибровкой, что дает возможность применять повышенные обжатия в развернутых калибрах без риска подломки валков. Так, при прокатке швеллера № 12 на Верхне-Салдинском заводе было сокращено два прохода, что позволило закончить прокатку при более высокой температуре. Это, кроме повышения производительности ста-

на, увеличило стойкость калибров за закладку и способствовало уменьшению расхода валков.

Одно из основных преимуществ развернутой калибровки швеллеров состоит в значительном сокращении расхода валков за счет уменьшения съема металла по диаметру при переточках. Это полностью подтвердилось опытом производства швеллера № 12 по развернутой калибровке. Съем металла по диаметру за одну переточку по балочно-калибровке швеллера № 12 составил 25—30 мм, а по развернутой калибровке уменьшился до 5—6 мм. При этом валки с развернутой калибровкой по износу обеспечивали удовлетворительную по поверхности прокатку в два-три раза большего количества металла между перевалками валков.

При переточках первоначальные размеры калибров в валках восстанавливаются полностью. Поэтому при перевалках не требуется комплектовать валки отделочной и подготовительной клетей в зависимости от степени выработки калибров по ширине. Опыт Верхне-Салдинского завода показывает также, что размещение развернутых калибров по длине бочки не вызывает затруднений, так как нет необходимости в сравнительно широких переходных буртах, к тому же сокращается число фасонных проходов. В работе [27] приведен также метод расчета для прокатки швеллера № 12 по развернутой калибровке.

По этому методу расчета была разработана калибровка швеллера № 16 для стана 650 НТМК (рис. 12) [18]. При прокатке в 1960 г. по этой калибровке были проведены сравнительные исследования с прямополочной калибровкой с выпуском полок 12—15%. Общее число проходов и схема прокатки в обеих системах калибровки были одинаковы (3-3-1).

При прокатке по развернутой калибровке профиль деформировался более интенсивно. Температура прокатываемого металла в развернутых калибрах понижалась медленнее, чем при прокатке по прямополочной калибровке с увеличенным выпуском полок. Так, перед второй клетью температура стенки на развернутом профиле 1000 °С и на прямополочном 925 °С.

При развернутой калибровке наблюдалось более равномерное остывание полок и стенки. Разница температур металла полок и стенки перед чистовой клетью при прокатке в развернутых калибрах составила всего 10 град,

а при прокатке по прямополочной калибровке температурный перепад достигал 60 град.

Момент прокатки, ток якоря и удельный расход энергии при развернутой калибровке были выше, чем при прямополочной. Увеличение расхода энергии при прокатке в развернутых калибрах объясняется тем, что прямоугольная заготовка, поступающая на чистовую линию

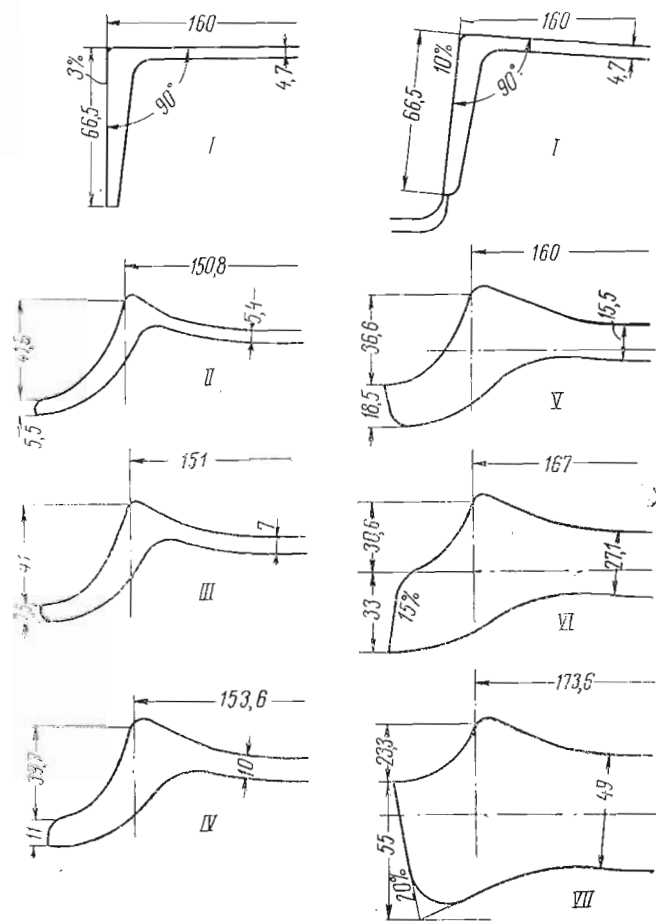


Рис. 12. Шаблоны развернутой калибровки облегченного швеллера № 16 (НТМК)

стана, имела площадь поперечного сечения примерно в два раза больше, чем фасонная заготовка для прямополочной калибровки.

При прокатке по развернутой калибровке задача развернутого профиля в чистовой прямополочный калибр осуществлялась с помощью специальной коробки с пропусками. Как показывает опыт НТМК, при прокатке швеллеров средних номеров (в данном случае № 16) применение вводной коробки с пропусками для задачи и удер-

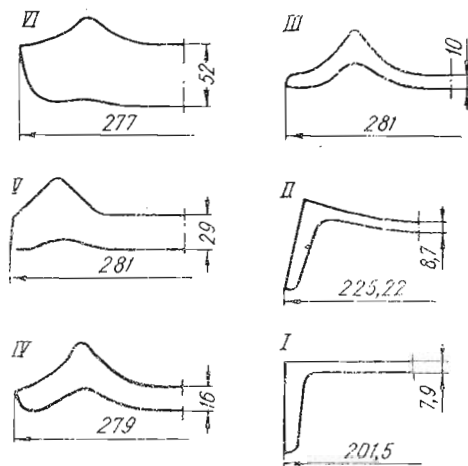


Рис. 13. Схема развернутой калибровки швеллера, применяемая на заводе в г. Ризе (ГДР)

живания развернутого профиля в прямополочном калибре вызывает большие трудности. Вводные пропуска в этих условиях быстро изнашиваются и расстраиваются, что приводит к большим затратам времени на их настройку и замену, а также увеличивает количество брака и недокатов. Поэтому опробованная на НТМК развернутая калибровка швеллера № 16 с применением сложных вводных пропусков не была внедрена в производство.

В 1960 г. освоена прокатка швеллера № 20 по развернутой калибровке (рис. 13) на стане 850 металлургического завода в г. Риза (ГДР), выполненной по методу Д. И. Старченко [28, с. 177; 29]. Опробование этой калибровки подтвердило все положительные стороны развернутой систе-

мы калибров. Наряду с этим выявились также некоторые недостатки, связанные в основном с незаполнением полок длинными полосами, которые были устранены после соответствующей корректировки калибровки.

Развернутую калибровку швеллера № 10 (рис. 14) применяли также на Чусовском металлургическом заводе при переходе на прокатку облегченного швеллера по новому стандарту ГОСТ 8240—56* [30,31].

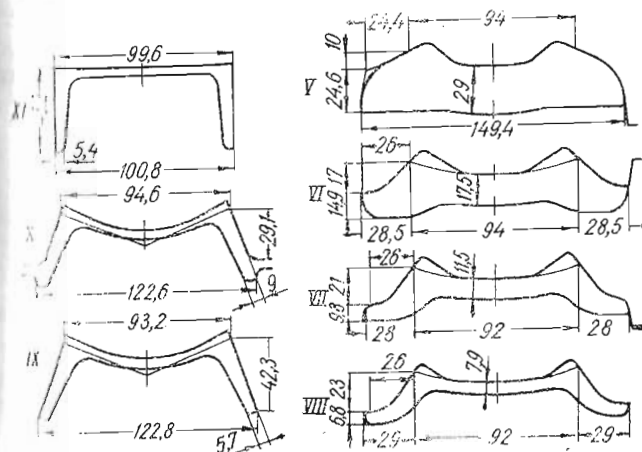


Рис. 14. Шаблоны развернутой калибровки облегченного швеллера № 10 (Чусовской металлургический завод)

Таким образом, применение развернутой калибровки швеллеров с использованием системы развернутых калибров, описанной в литературе (полки изогнуты по радиусу, развернуты до горизонтали с 1—2 прямополочными калибрами, кроме чистового), показало, что при прокатке средних и средних номеров швеллеров получение профиля по принципу возможно. При этом необходима сложная привалковая арматура, выполняющая работу формоизменения полок (подгибание развернутых полок) при задаче в прямополочный калибр. И здесь, однако, встречаются определенные трудности.

При прокатке швеллеров крупных номеров эти трудности могут оказаться непреодолимыми, так как ввиду жесткости профиля потребуются значительные усилия для предварительного подгибания развернутых полок, компенсируемого в вводных пропусках.

Метод расчета калибровки профиля боковины шахтного конвейера

Корытный профиль КСП-630 прокатывали на стане 620 Краматорского металлургического завода [6] по швейцарской калибровке с увеличенным выпуском полок (рис. 3).

Предчистовой калибр данной калибровки был выполнен прямополочным с полузакрытыми полками, что позволило контролировать высоту полок.

В основу расчета переходных сечений положены коэффициенты обжатия по элементам профиля, выбранные в соответствии с практическим опытом, при этом в первых двух калибрах по ходу прокатки коэффициенты обжатия по элементам профиля почти равны. Начиная с третьего калибра по ходу прокатки обжатия на конце полок несколько выше коэффициентов обжатия других элементов. Это предотвращает уменьшение высоты полок и способствует их хорошему выполнению. После определения размеров чистового калибра по обычной методике размеры элементов профиля в последующих калибрах определяют уменьшением значений соответствующих элементов на принятые коэффициенты обжатия.

Как видно из рис. 3, черновые калибры IX и VI выполнены симметричными относительно вертикальной оси и построены конструктивно. Недостаток их состоит в большой вертикальной проекции, что обуславливает глубокие врезы в валки и ослабление бочек валков.

В рассматриваемой калибровке калибр VII выполнен контрольным полузакрытым. Здесь происходит довольно значительное и разное (по величине) обжатие полок по высоте: большая полка обжимается на 10 мм, а малая — на 25 мм. Таким образом, разная высота полок готового профиля, равная 15 мм, создается в полузакрытом калибре VII.

Большое обжатие по высоте будущей малой полки, равное 25 мм, приводит к выходу металла в разъем полузакрытого контрольного калибра. Из-за образовавшегося наплыва (утолщение конца полки) при раскатке его в последующем открытом калибре узкая полка уширяется, и разница между высотой малой и большой полок снова значительно сокращается. Это предопределяет большое обжатие по высоте малой полки в предчистовом контрольном

калндре, что также способствует выходу металла в разъем калибра и образованию наплыва. Прокатка профиля с утолщением на конце малой полки в чистовом калибре вследствие вынужденного уширения обуславливает колебания высоты малой полки по длине полосы, выходящие за пределы плюсового допуска. Кроме того, наличие утолщения на конце малой полки из-за низкой температуры конца прокатки приводит к быстрому износу чистового калибра в этом месте.

Исходя из анализа существующих способов прокатки, скоростных условий в калибрах и методов расчета калибровки при производстве уголков, швеллеров и боковин шахтного конвейера представляется целесообразным разработать способы прокатки указанных профилей, обеспечивающие плавное формоизменение чернового профиля от одного калибра к другому на основе развернутой калибровки. Такая калибровка должна позволить вести прокатку толстых уголков, швеллеров больших номеров и боковин шахтного конвейера без применения сложной продольной арматуры в калибрах, производящих спрямление полок, повысить устойчивость процесса прокатки и внедрить эти калибровки на современных высокопроизводительных станах.

ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМАЦИИ МЕТАЛЛА И МЕТОДЫ РАСЧЕТА КАЛИБРОВКИ ВАЛКОВ ПРИ ПОСТЕПЕННОМ СГИБАНИИ ПОЛОК ПРОФИЛЯ

1. СУЩНОСТЬ РАЗВЕРНУТОГО СПОСОБА ПРОКАТКИ ПРИ ПОСТЕПЕННОМ СГИБАНИИ ПОЛОК ПРОФИЛЯ

Изыскание эффективных способов прокатки фланцевых профилей для обеспечения должной технологичности при их получении на современном высокопроизводительном оборудовании — важная инженерная задача. Развернутая калибровка, применяемая при прокатке швеллеров и других фланцевых профилей, обладает целым рядом достоинств, хорошо освещенных в технической литературе [1, 6, 13, 16, 18, 23, 24, 28, с. 177; 29—31]. Здесь имеется система развернутых до горизонтали кривополючных калибров, а также предчистовой и чистовой прямополючные калибры с определенным выпуском полок; при этом в зависимости от номера профиля число прямополючных калибров (кроме чистового) может быть различным (от одного до трех).

Переход от кривополючного развернутого к прямополючному калибру с соответствующим выпуском полок характеризуется значительным формоизменением, что приводит в ряде случаев к затруднениям при захвате полок валками. Однако такая система калибров позволяла вести прокатку фланцевых профилей малых и средних размеров на станах со сравнительно малой скоростью прокатки и ручным обслуживанием станов.

Опыт применения развернутой калибровки некоторыми заводами на современных высокопроизводительных высокомеханизированных станах при прокатке, в частности малых и средних номеров швеллеров, показал недостаточную ее технологичность, заключающуюся в затруднении

захвата полосы при переходе от кривополючного развернутого к прямополючному калибру, вследствие большой разности горизонтальных проекций этих калибров. Для этого требуется дополнительная выводная и вводная прижимная арматура, которая должна частично выполнять работу формоизменения развернутой полосы (сгибание полок), чтобы обеспечить ее захват последующим прямополючным калибром [13]; в этих условиях такая арматура быстро изнашивается и расстраивается, что приводит к снижению производительности стана.

С увеличением разности горизонтальных проекций развернутого и прямополючного профиля необходимо увеличить предварительное подгибание развернутых полок при переходе к прямополючным калибрам. Кроме того, увеличением номера швеллера увеличивается толщина развернутых полок, на подгибание которых при задаче прямополючный калибр необходимо затратить значительно большие усилия. Поэтому от величины предварительного подгибания развернутых полок зависит устойчивость захвата полосы валками.

Разность в величине горизонтальных проекций развернутого и прямополючного профилей при прочих равных условиях растет с увеличением номера прокатываемого по развернутой калибровке швеллера (табл. 1).

Таблица 1

Завод	Номер		Разность, мм, в горизонтальной проекции развернутого и прямополючного калибров
	швеллера	калибра	
Чусовской	10	VIII и IX	150—122,8=27,2
	24*	—	349—286,4=62,6
НТМК	16	II и I	228,4—164=64
УИ* (г. Риза)	20	IV и V	281—225,22=55,78

* Для швеллеров больших номеров эта разность еще больше [16].

Прокатка на НТМК швеллера № 16 сопровождалась определенными трудностями, в частности, из-за большой разности горизонтальных проекций развернутого и прямополючного калибров. Поэтому в калибровке швеллера № 16, выполненной в 1964 г. (см. рис. 11), разность между

развернутым V и прямополочным VI калибрами уже сведена до 33,6 мм.

Большая разница в величине горизонтальных проекций смежных калибров (рис. 15, а) и существенное формо-

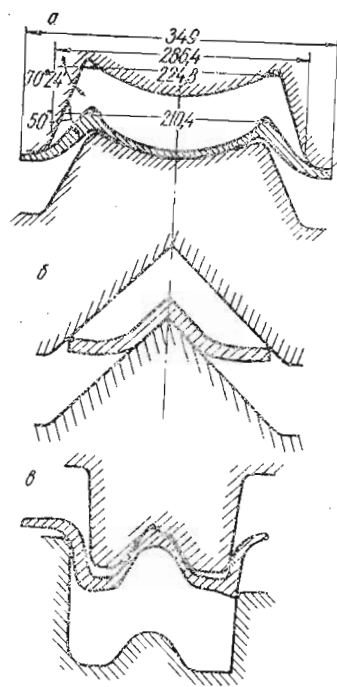


Рис. 15. Захват развернутого профиля в прямополочном калибре:

а — швеллера; б — уголка; в — боковины шахтного конвейера

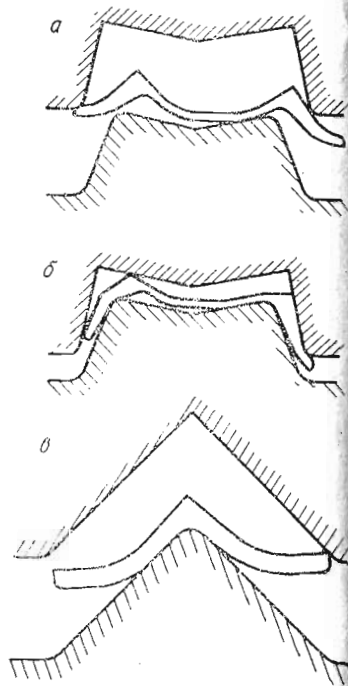


Рис. 16. Момент захвата полосы:

а — положение неточно заданного развернутого швеллерного профиля в момент встречи с прямополочным калибром; б — деформация неточно заданного развернутого швеллерного профиля в прямополочном калибре; в — момент захвата неточно заданного развернутого углового профиля в прямополочном калибре

изменение (подгибка) полосы при переходе к прямополочному калибру не позволяют вести прокатку без применения сложной вводной арматуры. Кроме того, blooms после нагрева в методической печи нередко имеют разную температуру по сечению. При прокатке такого металла в первом фасонном калибре полки профиля в ряде случаев

прокатываются неодинаково. Небольшая разность температур и высоты полок сохраняется до первого по ходу прокатки прямополочного калибра, что вместе с неточной подачей полосы приводит к неправильному захвату — «защипу угла» и разной высоте полок (рис. 16, а, б), выходящую за пределы допусков. Второй причиной неправильного захвата может быть искривление полосы, которое получается в результате неправильной настройки выводной арматуры и искривления от усилия шлеппера.

Для использования преимуществ развернутой калибровки при прокатке швеллеров, уголков, боковин шахтного конвейера и других фасонных профилей на современном оборудовании предложена развернутая калибровка способом постепенного сгибания, у которой переход от развернутого до горизонтали кривополочного калибра к прямополочному осуществляется постепенно с применением ряда переходных кривополочных калибров (рис. 17). При этом в зависимости от размера и формы сечения профиля может быть от одного до трех переходных кривополочных калибров.

При прокатке швеллеров по предложенной схеме процесс формоизменения прямоугольной исходной заготовки сначала осуществляется в ряде черновых калибров (в данном случае в калибрах VIII — VI, рис. 17, б), стенки которых выполнены с изгибом, а массивные полки отвернуты по радиусу до горизонтального положения. Если продолжить вести прокатку в таких же полностью развернутых калибрах, как это описано в литературе [1, 6, 13, 16, 18, 24, 28, с. 177; 29—31], то следующий переход от полностью (до горизонтали) развернутого калибра к прямополочному с определенным выпуском полок будет затруднен, особенно при прокатке швеллеров больших номеров, ввиду существенного различия проекции ширины смежных калибров. Захват полностью развернутой полосы в следующем прямополочном калибре будет сопряжен с необходимостью выполнения в вводных пропусках значительного формоизменения, что неизбежно приведет к снижению устойчивости процесса прокатки.

При использовании системы переходных кривополочных калибров (в нашем случае калибров V — IV) с отворотом полок на определенный угол достигается более плавное формоизменение профиля в результате постепенного подгиба и выравнивания полок, приближения их выпуска

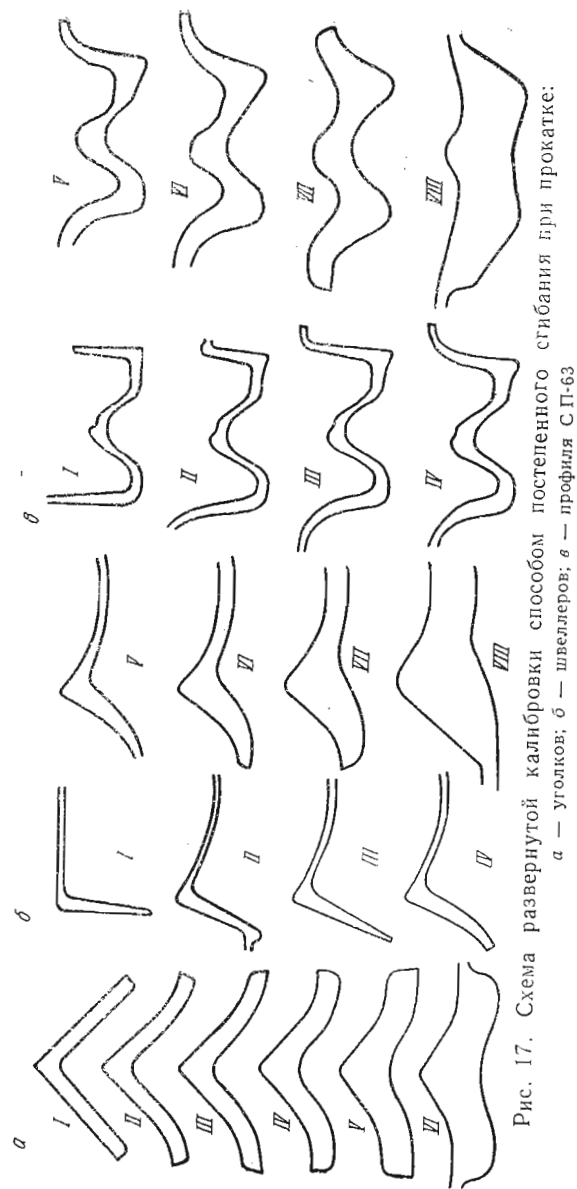


Рис. 17. Схема развернутой калибровки способом постепенного сгибания при прокатке:
а — уголков; б — швеллеров; в — профиля СП-63

и в последнем переходном (IV) калибре к следующему прямополочному (III). В этих условиях захват неполностью развернутой кривополочной полосы следующим прямополочным калибром (рис. 18,а) будет значительно облегчен благодаря уменьшению до минимума разности горизонтальных проекций смежных калибров. Все это обеспечивает достаточную устойчивость технологического процесса.

Условия захвата полосы валками

Сказанное выше относится также к условиям захвата и формоизменения угловых профилей, особенно неравнобоких уголков. При прокатке угловых профилей в развернутой калибровке задача развернутой полосы в прямополочный калибр (см. рис. 15,б) ввиду значительной разницы горизонтальной проекции предчистового и чистового прямополочного профилей ($164,5 - 137 = 27,5$ для равнобокого уголка $100 \times 100 > 6,5$; $176 - 141,8 = 34,2$ мм для неравнобокого $125 \times 80 > 10$ мм и $329 - 282 = 47$ мм для уголка $200 \times 200 \times 25$ мм), в ряде случаев не обеспечивается достаточно хорошее сцентрирование полосы, что часто приводит к свалу угла (см. рис. 16,в). Кроме того, при прокатке уголков больших номеров с толстыми полками, как отмечалось выше, при выпрессовании развернутых полок в наружных их гранях возникают значительные растягивающие напряжения. В то же время развернутая калибровка угловых профилей с постепенным сгибанием полок благодаря при-

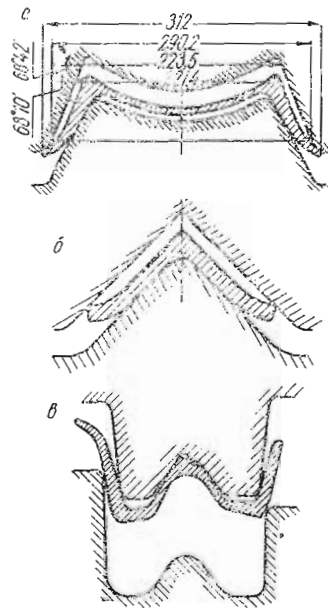


Рис. 18. Схема захвата кривополочного профиля в прямополочном калибре развернутой калибровки способом постепенного сгибания:

а — швеллера (№ 24); б — уголка; в — профиля СП-63

менению системы кривополючных переходных калибров (см. рис. 17,а, калибры II — III) создает условия правильного захвата полосы в чистовом калибре (рис. 18,б) и уменьшение растягивающих напряжений во внешних гранях полки. Тем самым достигается необходимая устойчивость процесса прокатки и повышается качество получаемого профиля.

Следует отметить, что прокатка боковины решетки шахтного конвейера с использованием обычной развернутой калибровки с отворотом полок до горизонтали (см. рис. 15,б) и задача такого профиля в прямополючный калибр даже с помощью сложной вводной арматуры весьма затруднительна. Еще более сложным может оказаться надежное удерживание развернутого профиля в прямополючном калибре в течение всего периода прокатки.

При прокатке профиля СП-63 по развернутой калибровке способом постепенного сгибания с тремя переходными калибрами (V — III, см. рис. 17,б) возможен отворот полок на любой угол, что позволяет выбирать наиболее рациональные формы переходных калибров. Выпуск наружных граней и углы отворота полок выбирают конструктивно, исходя из возможности задачи полосы в калибр при помощи обычных плоских вводных линеек. Если разместить первый фасонный калибр на валках обжимной клетки, то благодаря отвороту полок представляется возможным выравнять вертикальные проекции большой и малой полок в VII — V калибрах и тем самым избежать необходимости иметь опорные конусы на валках первой черновой клетки трио, а во второй клетки трио, где размещены IV — II калибры, эту разность можно свести до минимума. Благодаря использованию системы кривополючных переходных калибров достигается устойчивый захват предчистового профиля в чистовом калибре (рис. 18,б) с применением обычных вводных линеек.

Следовательно, способ постепенного сгибания полок, являясь дальнейшим развитием и совершенствованием развернутого способа прокатки, позволяет выбрать нужное число переходных кривополючных калибров, даже при прокатке таких сложных и несимметричных профилей, каким является профиль СП-63, и тем самым обеспечить высокую устойчивость процесса прокатки на совре-

менных высокопроизводительных станах. Кроме того, применение развернутой калибровки способом постепенного сгибания полок позволяет прокатывать швеллеры больших размеров и другие сложные фасонные профили.

Для успешной прокатки и правильного формирования черного фасонного профиля при использовании развернутой калибровки способом постепенного сгибания полок, как и любой другой калибровки, необходимо добиться самоцентрирования исходной заготовки в первом профильном калибре.

Первый фасонный швеллерный калибр развернутой калибровки способом постепенного сгибания, расположенный на обжимной дуо-реверсивной клетке, имеет трапециевидную форму с наклонными наружными гранями полок примерно 45° (рис. 19,а). Такая форма калибра обеспечивает надежное самоцентрирование полосы прямоугольного поперечного сечения без помощи вводной арматуры, чем достигается симметричность получаемого в обжимной клетке дуо чернового швеллерного профиля.

При прокатке уголков в первый фасонный калибр попадает прямоугольная полоса (рис. 19,б). Этот калибр также обеспечивает хорошее самоцентрирование полосы без вводной арматуры. Кроме того, в этом калибре начинается формирование угла чернового профиля и улучшается заполнение его вершины в последующих калибрах, уменьшается неравномерность деформации по ширине полосы в черновых калибрах.

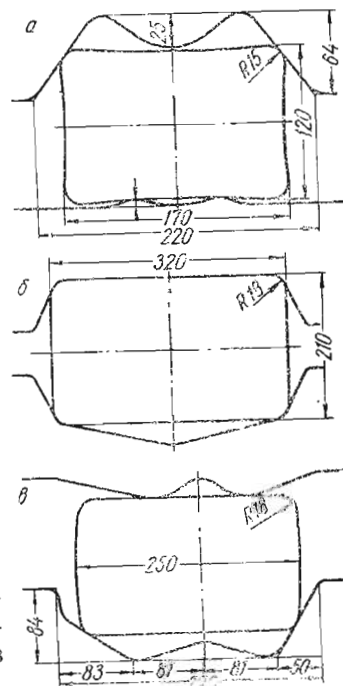


Рис. 19. Самоцентрирование исходной заготовки в первом профильном калибре при прокатке по развернутой калибровке способом постепенного сгибания;

а — швеллеров; б — уголков; в — профиля СП-63

Весьма ответственна роль первого фасонного калибра для получения профиля СП-63 ввиду его несимметричности. Этот калибр нужно построить так, чтобы в последующих калибрах происходило формирование профиля с неодинаковыми по высоте полками. Достичь этого можно различным наклоном боковых стенок (рис. 19, в), которые к тому же обеспечивают самоцентрирование исходной прямоугольной заготовки.

Таким образом, используемые первые профильные калибры при получении фасонного проката по развернутой калибровке способом постепенного сгибания создают надежные условия захвата и самоцентрирование исходной заготовки в калибре.

Стадии прокатки

При прокатке швеллеров по калибровке с увеличенным выпуском полок характерно, что отдельные элементы профиля (полки и стенка) обжимаются валками неодновременно. Это явление становится ясным, если расчленим процесс обжатия профиля в очаге деформации на ряд последовательных стадий. Для этого плоскостями, параллельными осям валков, проведем несколько сечений по длине дуги захвата и установим положение профиля по отношению к калибру во всех этих сечениях.

Из рис. 20, а видно, что полный цикл обработки профиля в данном калибре состоит из бокового обжатия полок, высотного обжатия ложных фланцев и высотного обжатия стенки. На первой стадии происходит преимущественное боковое обжатие полок профиля (сечение I — I). При дальнейшем продвижении профиля в очаге деформации на второй стадии обработки наряду с боковым обжатием полок начинается высотное обжатие ложных фланцев (сечение II — II). На следующей третьей стадии (сечение III — III) продолжается обжатие полок и ложных фланцев, но в конце этой стадии наступает контакт (без обжатия) стенки с валками. В заключительной, четвертой стадии, происходит преимущественное обжатие стенки (сечение IV — IV). В это время полки получают весьма малое обжатие, так как они были почти полностью обжаты на предыдущих стадиях.

Таким образом, процесс прокатки в прямополочных швеллерных калибрах с выпуском полок до 15—20% ха-

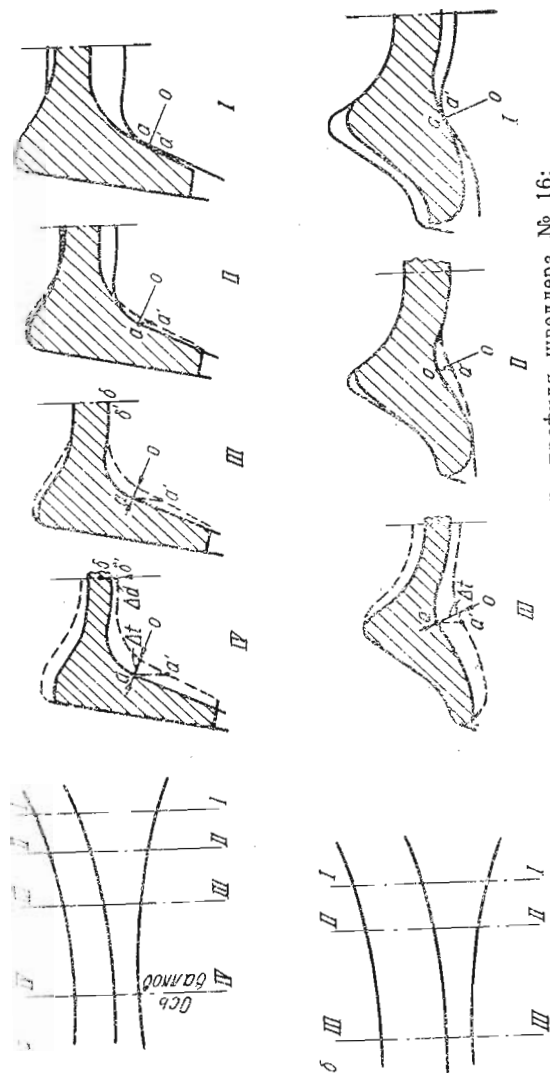


Рис. 20. Стадии прокатки черного профиля швеллера № 16:
а — по калибровке с увеличенным выпуском полок 20%; б — по развернутой калибровке способом постепенного сгибания полок

рактируется разновременностью обжатий полок и стенки профиля. Это приводит к перетеканию металла из полки в стенку на первых стадиях прокатки, и из стенки полки на последней стадии прокатки, что обуславливает повышенный износ калибров и увеличение расхода энергии.

При боковом обжатии полок в сравнении с той же величиной высотного обжатия значительно увеличивается время контакта металла с валками, что также приводит к увеличению износа калибров.

На рис. 20,а показана вертикальная проекция движения точки a вала по поверхности полосы на различных стадиях процесса прокатки. Линия $a'a$ представляет собой вертикальную составляющую обжатия полки Δt по толщине. Величина отрезка $a'a$ пропорциональна времени контакта точки a вала с прокатываемым металлом для случая обжатия в направлении oa . В то же время величина на отрезка $a'a$ пропорциональна времени контакта точки a вала с прокатываемым металлом для действительных условий деформации. Отношение $a'a/\Delta t$ показывает, во сколько раз при данном способе прокатки действительное время контакта точки a вала с прокатываемым металлом больше необходимого для деформации на величину Δt .

Точка b вала, которая расположена на калибре в месте обжатия стенки, находится в гораздо лучших условиях, так как имеет минимальное время контакта с прокатываемым металлом. Это обусловлено тем, что вертикальная проекция движения точки b по поверхности прокатываемого металла совпадает с направлением обжатия и $bb' = \Delta d$, вертикальная проекция движения точки a полки не совпадает с направлением обжатия и $a'a > \Delta t$. Износ точек калибра при прочих равных условиях будет тем больше, чем продолжительней контакт данной точки с прокатываемым металлом.

Следовательно, для уменьшения износа элементов калибра необходимо по возможности сократить время контакта этих элементов с полосой. Этому условию отвечает такое расположение элементов профиля, когда вертикальная проекция движения точки калибра по поверхности прокатываемого металла совпадает с направлением обжатия. Наименьшее время контакта металла с поверхностью калибров будет в том случае, если направление обжатия

этих элементов профиля будет перпендикулярно оси валков, что происходит при деформации стенки.

Для создания благоприятных условий работы частей калибра, обжимающих полки, необходимо совместить или приблизить вертикальную проекцию движения точки a к поверхности прокатываемого металла (линия $a'a$) к направлению обжатия Δt (линия oa). Этому условию отвечает отворот полок профиля до горизонтали. На рис. 20,б показаны стадии прокатки черного профиля швеллера № 16 при прокатке способом постепенного сгибания полок.

На рис. 20,б видно, что полный цикл обработки профиля в развернутом калибре состоит из сравнительно небольшого обжатия полок и основного обжатия полок вместе с высотным обжатием стенки. На первой стадии (сечение I — I) происходит контакт основания отвернутой полки с гребнем нижнего вала и стенки профиля с верхним валком без их обжатия. На второй стадии (сечение II — II) происходит некоторое обжатие полок и ложных фланцев и в конце этой стадии наступает контакт (без обжатия) стенки с обоими валками.

В заключительной, третьей стадии (сечение III — III), происходит обжатие стенки и большая часть обжатия полок.

Следовательно, процесс прокатки в развернутых швеллерных калибрах в отличие от процесса прокатки в швеллерных калибрах с выпуском полок 15—20% характеризуется почти одновременным обжатием полок и стенки профиля. Это предотвращает перетекание металла из полки в стенку на второй стадии прокатки и из стенки в полку на последней стадии. Уменьшение до минимума перетекания металла из одного элемента профиля в другой уменьшает износ калибров и сокращает расход энергии.

На рис. 20,б показана вертикальная проекция движения точки a вала по поверхности полосы на второй и третьей стадиях прокатки (сечения II — II и III — III). Отношение размеров $a'a/\Delta t$ позволяет сделать вывод, что при развернутой калибровке действительное время контакта точки a вала с металлом (отрезок $a'a$) не намного превышает время, необходимое для деформации на величину Δt , которое пропорционально линейному размеру Δt .

Таким образом, в развернутых калибрах при обжатии полок на величину Δt в сравнении с обжатием на ту же величину в прямополочном калибре с выпуском полок 15—20% значительно сокращается время контакта валков с металлом, что способствует уменьшению износа развернутых калибров.

2. МЕТОД РАСЧЕТА КАЛИБРОВКИ УГОЛКОВ, ШВЕЛЛЕРОВ И ДРУГИХ ФАСОННЫХ ПРОФИЛЕЙ СПОСОБОМ ПОСТЕПЕННОГО СГИБАНИЯ ПОЛОК

Метод расчета развернутой калибровки фасонных профилей способом постепенного сгибания предусматривает два основных исходных положения: 1) равенство коэффициентов вытяжки по элементам профиля; 2) расчет элементов профиля (полки и стенки) по средним линиям.

Основные положения метода расчета развернутой калибровки угловых профилей способом постепенного сгибания

Расчет по средней линии, на котором основан указанный метод, дает возможность постепенно разворачивать профиль уголка и находить наиболее целесообразные формы калибров. Умножением длины средней линии на толщину полки находят площадь калибра (без учета радиусов закруглений). Число проходов и обжатия полок уголка по калибрам принимают по практическим данным.

При разработке, изучении, сравнении и описании калибровок главное внимание обычно уделяется абсолютному значению коэффициентов вытяжки и их распределению по проходам. Однако коэффициент вытяжки всего профиля только косвенно характеризует значение и распределение нагрузок по проходам (калибрам), т. е. энергосиловые параметры калибровки. При практических расчетах в случае прокатки фасонных профилей для примерной оценки распределения нагрузок по проходам (калибрам), по нашему мнению, удобнее пользоваться величиной обжимаемой площади сечения ΔF по проходам. Величину обжимаемой в калибре площади выбирают с учетом пластичности металла, определяемой понижением температуры полосы по

проходам, положения калибров на бочке вала, наличия охлаждающих калибров, а также мощности привода и возможности прокатки с перекрытием. На основе сказанного для случая прокатки крупных уголков примем график распределения обжимаемых площадей по проходам чистой линии стана (рис. 21) и определим величину обжатия по калибрам и коэффициенты обжатия.

Изменение угла закрытия полок (угол у вершины между полками) должно быть постепенным от первого фасон-

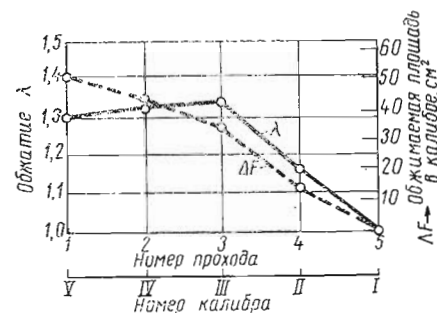


Рис. 21. График распределения обжимаемых площадей (ΔF) и коэффициентов обжатия (λ) по калибрам чистой линии стана при прокатке крупных уголков

ного калибра (для которого он принимается в пределах $120-140^\circ$) до предчистового калибра (угол закрытия полок 90°). Изменение угла закрытия полок от одного калибра к другому принимается пропорциональным обжатиям. Для этого определим изменение угла закрытия полок на 1° обжатия по формуле

$$\Delta \alpha' = \frac{\Sigma \Delta \alpha}{\Sigma \Delta d}, \quad (2)$$

где $\Sigma \Delta \alpha$ — суммарное изменение угла закрытия полок от первого фасонного до предчистового калибра;

$\Sigma \Delta d$ — суммарное обжатие по калибрам, начиная с предчистового.

Деформация полосы в уголкового калибрах всегда сопровождается изменением угла закрытия полок (изгибом при вершине). От калибра к калибру изменяется так-

же угол отворота (изгиба) полок. Наиболее значительное формоизменение полок происходит при их спрямлении в чистовом калибре.

Процесс деформации полосы в уголкового калибрах сопровождается растягиванием полок, который приближенно напоминает процесс штамповки, вследствие чего уширение в них отличается от уширения полос при прокатке на гладкой бочке.

Как показывает практика, максимальное удлинение средней линии полок происходит при наибольшем формоизменении, которое наблюдается при спрямлении полок в прямополочном (обычно чистовом) калибре. Абсолютная величина удлинения средней линии при спрямлении полок зависит от многих факторов: угла отворота полок, радиуса криволинейного участка, размера горизонтальных участков на краях полок задаваемой полосы, размеров уголка, положения вводной арматуры и ряда других факторов и может достигать 3—4 мм, что в несколько раз больше уширения, рассчитанного по формулам. Поэтому уширение в калибре, производящем спрямление полок, принимаем из опытных данных.

Уширение полок для уголкового калибров, где происходит сравнительно незначительное формоизменение, можно рассчитать по известным формулам с соответствующей поправкой. Стерженное уширение Δl_n каждой полки по средней линии рассчитываем по формуле

$$\Delta l_n = (0,15 \div 0,25) \frac{\Delta d_n}{d_{n+1}} \sqrt{R_{nk} \Delta d_n}, \quad (3)$$

где $0,15 \div 0,25$ — коэффициент, учитывающий удлинение средней линии при изгибе (меньшее значение — для малых размеров уголка);

R_{nk} — катающий радиус в n -ном калибре;
 d_{n+1} — толщина полки в следующем калибре.

Во всех известных методах расчета угловых профилей имеется одна общая характерная черта — полки предчистового и последующих калибров отворачиваются до горизонтали, т. е. на угол $\beta = 90-0,5\alpha$.

Отворот полок профиля уголка уменьшает вертикальную проекцию, а следовательно, разность рабочих диаметров, что уменьшает износ калибров, глубину вреза в валки и исходные диаметры бочек прокатных валков.

Благодаря уменьшению износа валков и исходных диаметров сокращается их расход и увеличивается прочность в опасном сечении.

Однако, как показано выше, отворот полок до горизонтали у предчистового калибра не всегда может обеспечить наиболее благоприятные условия деформации и необходимую устойчивость процесса прокатки. Для создания условий устойчивой прокатки неравнобоких угловых профилей, как правило, приходится применять вводную арматуру (пропуски). Чем больше разница в длине полок неравнобоких угловых профилей, тем менее устойчив процесс прокатки в чистовом калибре, производящем спрямление полок.

Применение способа постепенного сгибания полок для прокатки неравнобоких угловых профилей с наличием системы переходных калибров, полки которых не отвернуты до горизонтали, значительно повышает устойчивость процесса прокатки в чистовом калибре и в некоторых случаях позволяет обойтись без специальной вводной арматуры.

Для расчета размеров элементов уголкового калибра (рис. 22), кроме обжатия и уширения по средней линии, необходимо задаться величиной радиуса отворота полок по средней линии R^{cp} и углом отворота $\beta - \gamma$.

Радиус отворота полок по средней линии принимаем

$$R^{cp} = (0,5 \div 1,0) l, \quad (4)$$

где l — ширина полки по ГОСТу.

Угол γ в предчистовом калибре принимаем равным $\beta - 10^\circ$.

Из рис. 22,а видно, что размеры уголкового калибра связаны между собой следующими зависимостями:
 длина кривого участка полки $l_{cp,k}^{\sim}$ по средней линии

$$l_{cp,k}^{\sim} = \frac{\pi R^{cp} (\beta - \gamma)}{180^\circ}, \quad (5)$$

длина прямолинейного наклонного участка полки $l_{cp,n}^-$ по средней линии

$$l_{cp,n}^- = l_{cp} - l_{cp,k}^{\sim}, \quad (6)$$

где l_{cp} — длина полки по средней линии;
 расстояние между вершиной уголка и линией центра описанного криволинейного участка полок

$$X = l_{cp,n}^- \cdot \cos \beta + R^n \cdot \sin \beta, \quad (7)$$

57

Калибровка уголка $200 \times 200 \times 25$ мм способом постепенного сгибания полков выполнена применительно к крупносортовому стану 650 завода «Азовсталь», характеристика которого приведена выше.

Исходным материалом для прокатки уголков $200 \times 200 \times 25$ мм являются блюмы из углеродистых и низко-

углеродистых сталей с $\Delta d_1 = 0,4$ мм; $\Delta d_2 = 4$ мм; $\Delta d_3 = 10$ мм; $\Delta d_4 = 13$ мм; $\Delta d_5 = 16$ мм.

Для стана 650 и при данной схеме калибровки учитывается возможность одновременной прокатки во II и IV калибрах.

Суммарное обжатие полков в калибрах, начиная со II калибра, будет $\Sigma \Delta d = \Delta d_2 + \Delta d_3 + \Delta d_4 + \Delta d_5 = 4 + 10 + 13 + 16 = 43$ мм.

Угол закрытия полков VI калибра, на котором заканчивается расчет калибровки, принят $\alpha_6 = 120^\circ$. Изменение угла закрытия полков до предчистового калибра составило

$$\Sigma \Delta \alpha = \alpha_6 - \alpha_2 = 120 - 90 = 30^\circ.$$

Изменение угла закрытия полков на 1 мм обжатия согласно формуле (2)

$$\Delta \alpha' = \frac{\Sigma \Delta \alpha}{\Sigma \Delta d} = \frac{30}{43} = 0,6977 \text{ град/мм}.$$

Расчет калибровки ведем против хода прокатки, начиная от чистового калибра (рис. 23).

Определение размеров I (чистового) калибра

Ширина полки по наружной грани в горячем состоянии

$$b_1 = b \alpha_t = 200 \cdot 1,013 = 202,6 \text{ мм},$$

где α_t — коэффициент линейного расширения металла при температуре конца прокатки.

Толщина полки d_1 с учетом минусового допуска Δ_d

$$d_1 = (d - \Delta_d) \alpha_t = (25 - 0,7) 1,013 = 24,6 \text{ мм}.$$

Угол при вершине $\alpha_1 = 90^\circ$.

Вертикальная проекция чистового калибра по наружной грани полки

$$H_1 = b_1 \cos \frac{\alpha_1}{2} = 202,6 \cdot 0,707 = 143,2 \text{ мм}.$$

Горизонтальная проекция чистового калибра

$$B_1 = 2b_1 \cos \frac{\alpha_1}{2} = 2 \cdot 202,6 \cdot 0,707 = 286,5 \text{ мм}.$$

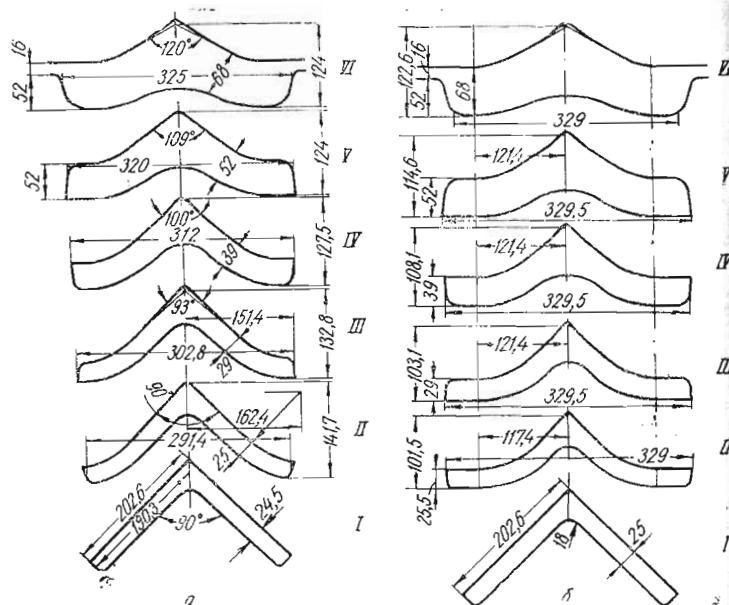


Рис. 23. Шаблоны калибров уголка $200 \times 200 \times 25$ мм: а — рассчитанный по калибровке способом постепенного сгибания; б — по развернутой (старой) калибровке

легированных сталей сечением 245×320 мм, длиной 4,5—6,0 м и массой 2,7—3,6 т. Исходный блюм прокатывают в первых двух калибрах дуо-реверсивной клетки 800 за четыре прохода в заготовку сечением 185×290 мм.

Характеристика уголков $200 \times 200 \times 25$ мм (ГОСТ 8509—57) приведена ниже.

Уголок из заготовки 185×290 мм прокатывают в семи фасонных калибрах, из них пять калибров — на валках чистовой линии.

На основании опытных данных принимаем следующие обжатия полков уголка по калибрам валков чистовой ли-

Длина средней линии полки

$$l_{cp1} = b_1 - \frac{d_1}{2} = 202,6 - \frac{24,6}{2} = 190,3 \text{ мм.}$$

Радиус закругления угла калибра с внутренней стороны на стыке полок, согласно ГОСТ, $r_1 = 18 \text{ мм}$. Радиус закругления краев полок $r'_1 = 6 \text{ мм}$.

Площадь поперечного сечения профиля без учета радиусов закруглений

$$F_1 = 2l_{cp1}d_1 = 2 \cdot 190,3 \cdot 24,6 = 9360 \text{ мм}^2.$$

Определение размеров II (предчистового) калибра

Толщина полки

$$d_2 = d_1 + \Delta d_1 = 24,6 + 0,4 = 25 \text{ мм.}$$

Коэффициент обжатия полки

$$\lambda_1 = \frac{d_2}{d_1} = \frac{25}{24,6} = 1,017.$$

Стесненное уширение полки в I калибре согласно формуле (3)

$$\Delta l_1 = 0,25 \frac{\Delta d_1}{d_2} \sqrt{R_{1k} \Delta d_1} = 0,25 \frac{0,4}{25} \sqrt{325 \cdot 0,4} = 0,1 \text{ мм.}$$

Удлинение средней линии при спрямлении полок в чистовом калибре составляет $\Delta l_{cp} = 3 \text{ мм}$. Тогда длина средней линии полки

$$l_{cp2} = l_{cp1} - \Delta l_{cp} - \Delta l_1 = 190,3 - 3 - 0,1 = 187,2 \text{ мм.}$$

Для уменьшения усилия на разгибание полок в чистовой клетки принимаем минимальный разворот полок во II калибре

$$\beta_2 - \gamma_2 = 37^\circ,$$

отсюда

$$\gamma_2 = 45 - 37 = 8^\circ.$$

Радиус скругления средней линии полки по формуле (4)

$$R_2^{cp} = 0,6 \cdot b_1 = 0,6 \cdot 200 = 120 \text{ мм,}$$

тогда радиус разворота по наружной грани

$$R_2^H = R_2^{cp} - 0,5d_2 = 120 - 0,5 \cdot 25 = 107,5 \text{ мм.}$$

Длина кривого участка полки по средней линии согласно формуле (5)

$$l'_{cp2} = \frac{(\beta_2 - \gamma_2) \pi \cdot R_2^{cp}}{180^\circ} = \frac{37^\circ \cdot 3,14 \cdot 120}{180^\circ} = 77,5 \text{ мм.}$$

Длина прямого участка полки по средней линии по формуле (6)

$$l_{cp2} = l_{cp2} - l'_{cp2} = 187,2 - 77,5 = 109,7 \text{ мм.}$$

Длина прямого участка полки по наружной грани

$$l_{n2} = l_{cp2} + 0,5d_2 = 109,7 + 12,5 = 122,2 \text{ мм.}$$

Угол закрытия полок для предчистового калибра $\alpha_2 = 90^\circ$. Тогда угол между горизонталью и наружной гранью полки

$$\beta_2 = 90^\circ - \frac{\alpha_2}{2} = 45^\circ.$$

Расстояние между вершиной и линией центра очерта-ния полок по формуле (7)

$$X_2 = l_{n2} \cos \beta_2 + R_2^H \sin \beta_2 = 122,2 \cdot 0,707 + 107,5 \cdot 0,707 = 162,4 \text{ мм.}$$

Горизонтальная проекция калибра, рассчитанная по формуле (8)

$$B_2 = 2(X_2 - R_2^{cp} \sin \gamma_2) = 2(162,4 - 120 \cdot 0,1392) = 291,4 \text{ мм.}$$

Вертикальная проекция предчистового калибра по формуле (9)

$$H_2 = l_{n2} \cdot \sin \beta_2 + (R_2^H \cos \gamma_2 - R_2^H \cos \beta_2) + d_2 \cos \gamma_2 = 122,2 \cdot 0,707 + (107,5 \cdot 0,9903 - 107,5 \cdot 0,707) + 25 \cdot 0,9903 = 141,7 \text{ мм.}$$

Радиус закругления угла калибра с внутренней стороны на стыке полок согласно формуле (10)

$$r_2 = 1,2\lambda_1 \cdot r_1 = 1,2 \cdot 1,017 \cdot 18 = 22 \text{ мм.}$$

Калибр открыт сверху. Радиус закругления краев по-лок

$$r'_2 = r'_1 + \Delta d_1 = 6 + 0,4 = 6,5 \text{ мм.}$$

Площадь калибра без учета радиусов закругления

$$F_2 = 2l_{cp2} \cdot d_2 = 2 \cdot 187,2 \cdot 25 = 9360 \text{ мм}^2.$$

Определение размеров III калибра

Толщина полки

$$d_3 = d_2 + \Delta d_2 = 25 + 4 = 29 \text{ мм.}$$

Коэффициент обжатия полки

$$\lambda_2 = \frac{d_3}{d_2} = \frac{29}{25} = 1,16$$

Стесненное уширение каждой полки во II калибре

$$\Delta l_2 = 0,25 \frac{\Delta d_2}{d_3} \sqrt{R_{2к} \cdot \Delta d_2} = 0,25 - \frac{4}{29} \sqrt{325 \cdot 4} = 1,2 \text{ мм.}$$

Длина средней линии полки в III калибре

$$l_{ср3} = l_{ср2} - \Delta l_2 = 187,2 - 1,2 = 186 \text{ мм.}$$

Увеличение угла закрытия полок, исходя из формулы (2)

$$\Delta \alpha_2 = \Delta \alpha' \cdot \Delta d_2 = 0,6977 \cdot 4 \approx 3^\circ.$$

Угол закрытия полок

$$\alpha_3 = \alpha_2 + \Delta \alpha_2 = 90 + 3 = 93^\circ.$$

Полки III калибра по условиям захвата отгибаются до горизонтали. Угол отгиба полок в III калибре

$$\beta_3 = 90 - 0,5\alpha_3 = 90 - 0,5 \cdot 93 = 43,5^\circ.$$

Радиус разворота по средней линии $R_3^{ср} = R_2^{ср} = 120 \text{ мм.}$

Радиус разворота по наружной грани

$$R_3^н = R_3^{ср} - 0,5d_3 = 120 - 0,5 \cdot 29 = 105,5 \text{ мм.}$$

Длина кривого участка полки по средней линии

$$l_{ср3}^\sim = \frac{\pi R_3^{ср} \beta_3}{180^\circ} = \frac{120 \cdot 43,5^\circ}{57,33^\circ} = 91,1 \text{ мм.}$$

Длина прямолинейного наклонного участка полки по средней линии

$$l_{ср3}^- = l_{ср3} - l_{ср3}^\sim = 186,0 - 91,1 = 94,9 \text{ мм.}$$

Длина прямолинейного наклонного участка полки по наружной грани

$$l_{н3}^- = l_{ср3}^- + 0,5d_3 \cdot \tg \beta_3 = 94,9 + 0,5 \cdot 29 \cdot 0,94896 = 108,7 \text{ мм.}$$

Расстояние между вершиной и линией центра очерта

$$X_3 = l_{н3}^- \cos \beta_3 + R_3^н \sin \beta_3 = 108,7 \cdot 0,72537 + 105,5 \cdot 0,68835 = 151,4 \text{ мм.}$$

Горизонтальная проекция калибра по средней линии

$$B_3 = 2X_3 = 2 \cdot 151,4 = 302,8 \text{ мм.}$$

Вертикальная проекция калибра

$$H_3 = l_{н3}^- \sin \beta_3 + (R_3^н - R_3^н \cos \beta_3) + d_3 = 108,7 \cdot 0,68835 + (105,5 - 105,5 \cdot 0,72537) + 29 = 132,8 \text{ мм.}$$

Радиус закругления угла калибра с внутренней стороны на стыке полок

$$r_3 = 1,2\lambda_2 \cdot r_2 = 1,2 \cdot 1,16 \cdot 22 = 30 \text{ мм.}$$

Калибр открытый снизу. Радиус закругления краев полок согласно формуле (11 а)

$$r_3'' = 0,3d_3 = 0,3 \cdot 29 = 9 \text{ мм.}$$

Площадь калибра без учета радиусов закруглений

$$F_3 = 2l_{ср3} \cdot d_3 = 2 \cdot 186 \cdot 29 = 10788 \text{ мм}^2.$$

Обжимаемая площадь во II калибре

$$\Delta F_2 = F_3 - F_2 = 10788 - 9360 = 1488 \text{ мм}^2.$$

Выпуск калибра i_3 принимаем 10 %.

Определение размеров IV калибра

Толщина полки

$$d_4 = d_3 + \Delta d_3 = 29 + 10 = 39 \text{ мм.}$$

Коэффициент обжатия полки

$$\lambda_3 = \frac{d_4}{d_3} = \frac{39}{29} = 1,345.$$

Стесненное уширение каждой полки в III калибре

$$\Delta l_3 = 0,25 \frac{\Delta d_3}{d_4} \sqrt{R_{3к} \cdot \Delta d_2} = 0,25 \frac{10}{39} \cdot \sqrt{307 \cdot 10} = 3,5 \text{ мм.}$$

Длина средней линии полки в IV калибре

$$l_{ср4} = l_{ср3} - \Delta l_3 = 186 - 3,5 = 182,5 \text{ мм.}$$

Увеличение угла закрытия полок

$$\Delta \alpha_3 = \Delta \alpha' \cdot \Delta d_3 = 0,6977 \cdot 10 = 7^\circ$$

Угол закрытия полок

$$\alpha_4 = \alpha_3 + \Delta\alpha_3 = 93 + 7 = 100^\circ.$$

Угол отгиба полок в IV калибре

$$\beta_4 = 90 - 0,5\alpha_4 = 90 - 0,5 \cdot 100 = 40^\circ.$$

Радиус разворота по средней линии принимаем $R_4^{\text{сп}} = R_3^{\text{сп}} = 120$ мм. Тогда радиус разворота по наружной грани

$$R_4^{\text{н}} = R_4^{\text{сп}} - 0,5d_4 = 120 - 0,5 \cdot 39 = 100,5 \text{ мм.}$$

Длина кривого участка полки по средней линии

$$l_{\text{кр}4} = \frac{\pi R_4^{\text{сп}} \beta_4}{180^\circ} = \frac{120 \cdot 40^\circ}{57,33^\circ} = 83,8 \text{ мм.}$$

По условиям захвата принимаем увеличение размер горизонтальной проекции IV калибра $\Delta B_3 = 9,2$ мм. Тогда

$$B_4 = B_3 + \Delta B_3 = 302,8 + 9,2 = 312 \text{ мм.}$$

Для определения размеров прямолинейного наклонного участка полки $l_{\text{сп}4}$ и горизонтального участка $l_{\text{г}4}$ составляем уравнения согласно формулам (12):

$$0,5B_4 = l_{\text{сп}4}^{\sim} = \cos \beta_4 + R_4^{\text{сп}} \sin \beta_4 + l_{\text{г}4};$$

$$l_{\text{сп}} = l_{\text{сп}4}^{\sim} + l_{\text{сп}4} + l_{\text{г}4}.$$

Подставляем значения известных величин:

$$0,5 \cdot 312 = l_{\text{сп}4}^{\sim} \cdot 0,766 + 120 \cdot 0,6428 + l_{\text{г}4};$$

$$182,5 = 83,8 + l_{\text{сп}4}^{\sim} + l_{\text{г}4}.$$

После совместного решения находим $l_{\text{сп}4}^{\sim} = 84,8$ мм. Тогда горизонтальный участок полки

$$l_{\text{г}4} = l_{\text{сп}4}^{\sim} - l_{\text{сп}4} - l_{\text{сп}4} = 182,5 - 83,8 - 84,8 = 13,9 \text{ мм.}$$

Длина прямолинейного наклонного участка полки по наружной грани

$$l_{\text{н}4} = l_{\text{сп}4}^{\sim} + 0,5d_4 \cdot \text{tg} \beta_4 = 84,8 + 0,5 \cdot 39 \cdot 0,8391 = 101,2 \text{ мм.}$$

Расстояние между вершиной и линией центра очерта-ния полок

$$X_4 = l_{\text{н}4}^{\sim} \cos \beta_4 + R_4^{\text{н}} \sin \beta_4 = 101,2 \cdot 0,766 + 100,5 \cdot 0,6428 = 142,1 \text{ мм.}$$

Вертикальная проекция калибра

$$H_1 = l_{\text{н}4}^{\sim} \sin \beta_4 + (R_4^{\text{н}} - R_4^{\text{н}} \cos \beta_4) + d_4 = 101,2 \cdot 0,6428 + (100,5 - 100,5 \cdot 0,766) + 39 = 127,5 \text{ мм.}$$

Радиус закругления угла калибра с внутренней стороны стыке полок

$$r_4 = 1,2\lambda_3 r_3 = 1,2 \cdot 1,345 \cdot 30 \approx 48 \text{ мм.}$$

Калибр открыт сверху. Радиус закругления краев по-

$$r'_4 = 0,5d_4 = 0,5 \cdot 39 = 19 \text{ мм.}$$

Площадь калибра без учета радиусов закруглений

$$F_4 = 2l_{\text{сп}4} \cdot d_4 = 2 \cdot 182,5 \cdot 39 = 14235 \text{ мм}^2.$$

Обжимаемая площадь в III калибре

$$\Delta F_3 = F_4 - F_3 = 14235 - 10788 = 3447 \text{ мм}^2.$$

Выпуск калибра i_4 принимаем 10%.

Определение размеров V калибра

Толщина полки

$$d_5 = d_4 + \Delta d_4 = 39 + 13 = 52 \text{ мм.}$$

Коэффициент обжатия полки

$$\lambda_4 = \frac{d_5}{d_4} = \frac{52}{39} = 1,334.$$

Степенное уширение каждой полки в IV калибре

$$\Delta l_1 = 0,25 \frac{\Delta d_4}{d_5} \sqrt{R_{4\text{к}} \cdot \Delta d_4} = 0,25 \frac{13}{52} \cdot \sqrt{302 \cdot 13} = 3,9 \text{ мм.}$$

Длина средней линии полки в V калибре

$$l_{\text{сп}5} = l_{\text{сп}4} - \Delta l_4 = 182,5 - 3,9 = 178,6 \text{ мм.}$$

Увеличение угла закрытия полок

$$\Delta\alpha_4 = \Delta\alpha' \cdot \Delta d_4 = 0,6977 \cdot 13 = 9^\circ.$$

Угол закрытия полок

$$\alpha_5 = \alpha_4 + \Delta\alpha_4 = 100 + 9 = 109^\circ.$$

Угол отгиба полок в V калибре

$$\beta_5 = 90 - 0,5 \cdot \alpha_5 = 90 - 0,5 \cdot 109 = 35^\circ 30'$$

Радиус разворота по средней линии $R_5^{cp} = R_4^{cp} = 120$ мм. Тогда радиус разворота по наружной грани

$$R_5^n = R_5^{cp} - 0,5d_5 = 120 - 0,5 \cdot 52 = 94 \text{ мм.}$$

Длина кривого участка полки по средней линии

$$l_{cp4} = \frac{\pi R_5^{cp} \cdot \beta_5}{180^\circ} = \frac{120 \cdot 35,5^\circ}{57,33^\circ} = 74,3 \text{ мм.}$$

По условиям захвата принимаем увеличение размер горизонтальной проекции V калибра $\Delta B_4 = 8$ мм. Тогда

$$B_5 = B_4 + \Delta B_4 = 312 + 8 = 320 \text{ мм.}$$

Для определения размеров прямолинейного наклонного участка полки l_{cp5} и горизонтального участка l_{r5} составим уравнения:

$$0,5B_5 = l_{cp5} \cos \beta_5 + R_5^{cp} \sin \beta_5 + l_{r5};$$

$$l_{cp5} = l_{cp4} + l_{cp5} + l_{r5}.$$

Подставляем значения известных величин:

$$0,5 \cdot 320 = l_{cp5} \cdot 0,8141 + 120 \cdot 0,5807 + l_{r5};$$

$$178,6 = 74,3 + l_{cp5} + l_{r5},$$

откуда $l_{cp5} = 75,3$ мм.

Горизонтальный участок полки

$$l_{r5} = 104,3 - 75,3 = 29,0 \text{ мм.}$$

Длина прямолинейного наклонного участка полки наружной грани

$$l_{n5} = l_{cp5} + 0,5d_5 \cdot \operatorname{tg} \beta_5 = 75,3 + 0,5 \cdot 52 \cdot 0,7133 = 93,9 \text{ мм.}$$

Расстояние между вершиной и линией центра радиусов охвата полок

$$X_5 = l_{n5} \cos \beta_5 + R_5^n \sin \beta_5 = 93,9 \cdot 0,8141 + 94 \cdot 0,5807 = 131 \text{ мм.}$$

Вертикальная проекция калибра

$$H_5 = l_{n5} \cdot \sin \beta_5 + (R_5^n - R_5^n \cos \beta_5) + d_5 = 93,9 \cdot 0,5807 + (94 - 94 \cdot 0,814) + 52 = 124 \text{ мм.}$$

Радиус закругления угла калибра с внутренней стороны на стыке полок

$$r_5 = 1,2 \lambda_4 r_4 = 1,2 \cdot 1,334 \cdot 48 = 77 \text{ мм.}$$

Калибр открыт снизу. Радиус закругления краев полок

$$r_5'' = 0,4d_5 = 0,4 \cdot 52 = 21 \text{ мм.}$$

Площадь калибра без учета радиусов закруглений

$$F_5 = 2l_{cp5} \cdot d_5 = 2 \cdot 178,6 \cdot 52 = 18574 \text{ мм}^2.$$

Обжимаемая площадь в IV калибре

$$\Delta F_4 = F_5 - F_4 = 18574 - 14235 = 4339 \text{ мм}^2.$$

Выпуск калибра i_5 принимаем 10%.

Определение размеров VI калибра

Толщина полки

$$d_6 = d_5 + \Delta d_5 = 52 + 16 = 68 \text{ мм.}$$

Коэффициент обжатия полки

$$\lambda_5 = \frac{d_6}{d_5} = \frac{68}{52} = 1,308.$$

Стесненное уширение каждой полки в V калибре

$$\Delta l_5 = 0,25 \frac{\Delta d_5}{d_6} \sqrt{R_{5к} \Delta d_5} = 0,25 \frac{16}{68} \cdot \sqrt{295 \cdot 16} = 4 \text{ мм.}$$

Длина средней линии полки в VI калибре

$$l_{cp6} = l_{cp5} - \Delta l_5 = 178,6 - 4 = 174,6 \text{ мм.}$$

Увеличение угла закрытия полок

$$\Delta \alpha_5 = \Delta \alpha' \cdot \Delta d_5 = 0,6977 \cdot 16 = 11^\circ.$$

Угол закрытия полок

$$\alpha_6 = \alpha_5 + \Delta \alpha_5 = 109 + 11 = 120^\circ.$$

Угол отгиба полок в VI калибре

$$\beta_6 = 90 - 0,5\alpha_6 = 90 - 0,5 \cdot 120 = 30^\circ.$$

Радиус разворота по средней линии примем $R_6^{cp} = R_5^{cp} = 120$ мм. Тогда радиус разворота по наружной грани

$$R_6^n = R_6^{cp} - 0,5d_6 = 120 - 0,5 \cdot 68 = 86 \text{ мм.}$$

Длина кривого участка полки по средней линии полки

$$l_{cp6} = \frac{\pi R_6^{cp} \beta_6}{180^\circ} = \frac{130 \cdot 30^\circ}{57,33^\circ} = 62,8 \text{ мм.}$$

По условиям захвата принимаем увеличение размер горизонтальной проекции V калибра $\Delta B_5 = 5 \text{ мм}$. Тогда

$$B_6 = B_5 + \Delta B_5 = 320 + 5 = 325 \text{ мм.}$$

Для определения размеров прямолинейного наклонного участка полки $l_{\text{срв}}$ и горизонтального участка $l_{\text{г5}}$ составим уравнения:

$$0,5B_6 = l_{cp6}^- \cos \beta_6 + R_6^{cp} \sin \beta_6 + l_{r6};$$

$$l_{\text{cp6}} = l_{\text{cp6}}^{\cup} + l_{\text{cp6}}^{-} + l_{\text{r6}}.$$

Подставим значения известных величин

$$0,5 \cdot 325 = l_{\text{cp6}} 0,866 + 120 \cdot 0,5 + l_{\text{r6}};$$

$$175,6 = 62,8 + l_{\text{cp}6}^- + l_{\text{r}6},$$

откуда $l_{\text{ср0}} = 69,5$ мм. Тогда горизонтальный участок полки

$$l_{r6} = 111,8 - 69,5 = 42,3 \text{ мм.}$$

Длина прямолинейного наклонного участка полки наружной грани

$$l_{\text{H}_8} = l_{\text{CD}_8} + 0,5d_8 \operatorname{tg} \beta_8 = 69,5 + 0,5 \cdot 68 \cdot 0,5773 = 89,1 \text{ мм.}$$

Расстояние между вершиной и линией центра радиуса
очертания полук

$$X_6 = l_{H6}^- \cos \beta_6 + R_6^H \sin \beta_6 = 89,1 \cdot 0,866 + 86 \cdot 0,5 = 120,2 \text{ мм}$$

Вертикальная проекция калибров

$$H_6 = l_{H6} \cdot \sin \beta_6 + (R_6^H - R_6^H \cdot \cos \beta_6) + d_6 = \\ = 89,1 \cdot 0,5 + (86 - 86 \cdot 0,866) + 68 = 124 \text{ мм.}$$

Радиус закругления угла калибра с внутренней стороны на стыке полок

$$r_6 = 1,2\lambda_5 r_5 = 1,2 \cdot 1,308 \cdot 77 = 120 \text{ мм.}$$

Калибр открыт сверху. Радиус закругления краев по
лок

$$r'_6 = 0,5d_6 = 0,5 \cdot 68 = 34 \text{ мм.}$$

Площадь калибра без учета радиусов закруглений

$$F_6 = 2l_{\text{ср6}} \cdot d_6 = 2 \cdot 174,6 \cdot 68 = 23745 \text{ мм}^2.$$

Сжимаемая площадь в V калибре

$$\Delta F_5 = F_6 - F_5 = 23745 - 18574 = 5171 \text{ мм}^2.$$

Шаблоны рассчитанных калибров показаны на рис. 23, а. Для сравнения на рис. 23, б приведены шаблоны старой калибровки этого профиля. Сравнение *II* и *III* калибров

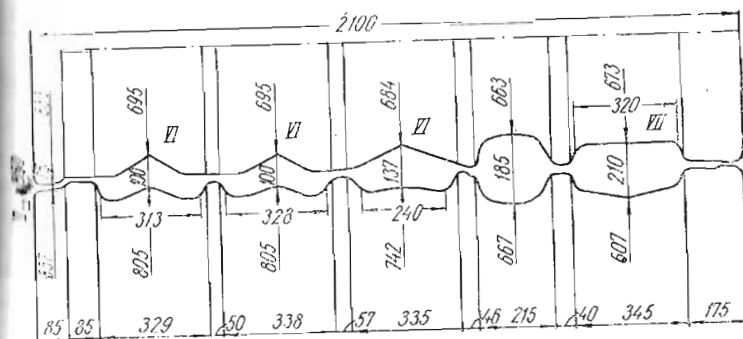


Рис. 24. Монтаж фасонных калибров (VI — VII) уголка $200 \times 200 \times 25$ мм в валках обжимной клетки 800

обих калибровок подтверждает целесообразность применения переходной системы калибров, обеспечивающей более плавное формоизменение полосы и большую устойчивость процесса применительно к прокатке больших размеров уголков с толстыми полками.

Фасонный калибр *VII* также располагаем в валках обжимной клетки 800 (рис. 24).

Размеры калибра VII выбирают конструктивно. Двуреверсивная клеть 800 не имеет стационарных вводных направляющих, поэтому калибр должен быть построен так, чтобы задаваемая в него полоса самоцентрировалась в нем. Этим достигается также симметричность полосы, поступающей с обжимной клетки.

В условиях крупносортового цеха оказалось целесообразным для каждого номера уголка иметь специальный

комплект валков черновой клетки. Это позволило в максимальной степени приспособить обжимные валки для прокатки уголка определенного номера.

После внедрения новой калибровки и изменения конструкции первого ящичного калибра длина «языков» значительно уменьшилась, повысилась устойчивость процесса прокатки вследствие постепенного формоизменения и почти не было случаев прокатки со свалом угла и аварии на стане; отсутствовали также микротрещины на наружных гранях полок.

Основные положения метода расчета калибровки швеллерных профилей способом постепенного сгибания

Метод расчета основан на условии равенства коэффициентов вытяжки по элементам профиля; элементы профиля (полки и стенки) рассчитывают по средним линиям, что дает возможность постепенно разворачивать швеллерный профиль и находить наиболее благоприятные для центрирования формы переходных калибров.

За среднюю линию стенки швеллерного профиля принимают линию, совпадающую с ее осью. По этой линии рассчитывают уширение стенки. Умножением длины средней линии на толщину стенки находят ее площадь.

Полка кривополичного калибра состоит из двух частей: прямого и кривого участков. Высоту прямого участка полки K принимают равной длине наружной грани прямого участка, а кривого участка полки h — длине дуги, очерченной средним радиусом R_n^{cp} ; последний равен радиусу наружной грани криволинейного участка R_n плюс половина толщины полки a на ее конце, т. е.

$$R_n^{cp} = R_n + 0,5a. \quad (13)$$

При таком отворачивании полок получается угол отворота α .

Исходя из практических данных, прокатку швеллеров по способу постепенного сгибания можно вести: № 5—8 — в шести фасонных калибрах; № 10—30 — в восьми фасонных калибрах; № 33—40 — в девяти фасонных калибрах.

При производстве швеллера № 16 на станах линейного типа, у которых рабочие клетки расположены в две ли-

нии — обжимную (черновую) и чистовую, исходя из временного графика загрузки обеих линий прокатку черновой швеллерной заготовки на чистовой линии принимаем в семи, а на черновой — в одном фасонном калибрах.

Для определения коэффициентов вытяжки по элементам профиля и по калибрам чистовой линии (калибры I—VII) следует принимать обжатие по стенке Δd (рис. 25). Затем рассчитывают коэффициент вытяжки μ по стенке, который принимается и для полок. Благодаря одинаковым коэффициентам вытяжки по элементам профиля умень-

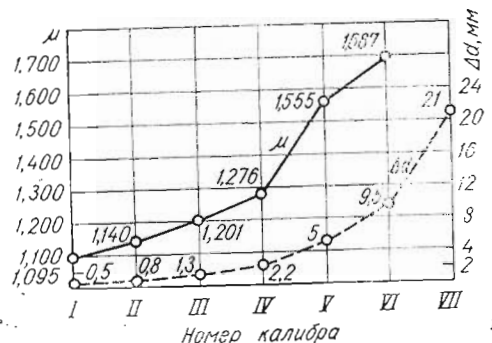


Рис. 25. График распределения обжатий стенки (Δd) и коэффициента вытяжки (μ) по калибрам чистовой линии стана 650 при прокатке швеллера № 16

шается или совсем не происходит перетекания металла из одного элемента калибра в другой в процессе деформации, что уменьшает износ валков и сокращает расход энергии.

При выборе обжатия по стенке учитывается положение калибра в валках. Калибры, расположенные на середине бочки вала, следует нагружать меньше крайних, чтобы сделать валки равнопрочными и избежать поломок. Обжатия следует распределять в соответствии с потерей пластичности металла от прохода к проходу и от клетки к клетке, с понижением температуры, а также износом калибров. Кривая распределения обжатий по стенке для швеллера № 14 и меньших размеров расположится выше, а для швеллеров № 18 и больших размеров — ниже, чем для швеллера № 16 (см. рис. 25).

В общем случае деформация по калибрам и клетям должна быть так распределена, чтобы на одну, например черновую клеть, приходилось по износу две предчистовых или на одну предчистовую — две чистовых. Это позволит полностью избежать дополнительных перевалок.

Очень важно при расчете калибровки швеллеров учитывать уширение стенки и приращение или утяжку высоты полка профиля.

Приращение высоты полка в открытых швеллерных калибрах принимаем в пределах $\Delta h = 0,5 \div 3,0$ мм; иног-

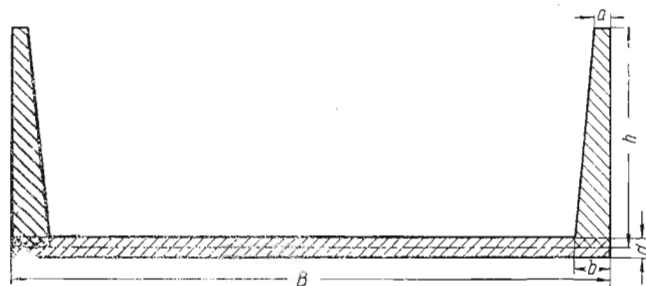


Рис. 26. Деление черного швеллерного профиля на элементы, учитывающие обжатие стенки

да его рассчитывают по формуле Б. П. Бахтинова [3] или по уточненной формуле П. И. Полухина [32], которые дают значение приращения высоты полка в этих же пределах.

В данных случаях не учитывается доля приращения за счет обжатия стенки. При малых значениях обжатия стенки это приращение невелико и им можно пренебречь. Если обжатие по стенке значительно, а увеличение высоты полки равно половине обжатия, то эта погрешность внесет заметную ошибку в определение высоты полка и в расчетные данные калибровки. Поэтому при разработке калибровки швеллера № 16, начиная с IV калибра, высоту полка определяли от средней линии стенки (рис. 26). Такой способ деления профиля черновых швеллерных профилей на части позволяет учесть увеличение высоты полка за счет обжатия стенки.

Уширение стенки в чистовом и предчистовом калибрах при прокатке швеллеров, особенно облегченных, имеет большое значение, так как уменьшение толщины эле-

ментов облегченных швеллеров по сравнению с обычным профилем вызывает понижение температуры конца прокатки. В связи с этим и из-за ажурности элементов затрудняется перетекание металла из одной части калибра в другую, что неизбежно при неправильном определении уширения. Особенно нежелательно значительное ограничение уширения, которое в последних калибрах создает большие давления на бурты, повышающие их износ, а иногда является причиной скалывания буртов.

Уширение в I — IV калибрах для швеллеров всего сортамента принимаем от 1,0 до 3,0 мм. В черновых калибрах V — VII, где еще достаточно высокая температура металла, а конфигурация и массивность элементов профиля слабо препятствуют перемещению металла, можно ограничить уширение полностью или даже вести прокатку с отрицательным уширением. Примером полностью ограниченного уширения может служить прокатка балок в сопряженных калибрах. При калибровке способом постепенного сгибания имеется достаточно большой выпуск прямых участков наружных граней полков черновых калибров (от 55 до 80%, см. рис. 17,б). Такая форма калибров дает возможность полностью ограничить уширение по стенке, а если это продиктовано условиями захвата, то можно вести прокатку с отрицательным уширением по стенке (в пределах 1—6 мм). В нашем случае при калибровке швеллера № 16 отрицательное уширение в черновых развернутых калибрах принято ~3 мм, а для швеллера № 30 — оно равно 5 мм.

Многолетний опыт применения калибровки способом постепенного сгибания показал, что устойчивость полосы в переходных кривополичных калибрах зависит от разности горизонтальных проекций задаваемого профиля и калибра, в котором он прокатывается. Следовательно, при одинаковом способе построения калибров, приняв определенную разность в величине горизонтальных проекций, принимается соответствующая степень устойчивости процесса прокатки. На основании опытных данных увеличение горизонтальной проекции следующего по ходу расчета калибра можно рекомендовать в пределах $\Delta B_r = 5 \div 30$ мм: меньшие значения для швеллеров малых номеров, большие — для больших.

Размер горизонтальной проекции рассчитываемого калибра при прочих известных величинах зависит от угла

разворота полок α (рис. 27). Эту зависимость можно определить по формуле

$$B_{\Gamma} + 2 \left[\frac{180 \left(h - R \operatorname{tg} \frac{90 - \gamma'}{2} \cos \gamma' - 0,5d \right)}{\pi \alpha} - a \right] \times \\ \times \sin \alpha \cdot \sin (\alpha + \gamma) + 2 \left(R + R' \operatorname{tg} \frac{90 - \gamma'}{2} \cos \gamma' + \right. \\ \left. + 0,5d \right) \sin \gamma + 2B' \cdot \cos \gamma, \quad (14)$$

где B_{Γ} — горизонтальная проекция калибра;
 h — длина прямого участка полки;
 R' — радиус сопряжения внутренней грани полки со стенкой;
 d — толщина стенки;
 B' — ширина прямого участка стенки;
 a — толщина полки на конце;
 α — половинный угол отворота наружной грани полки;
 γ — угол наклона наружной грани полки;
 γ' — угол наклона внутренней грани полки относительно наружной.

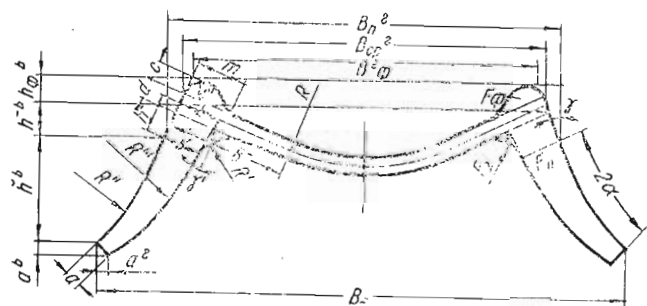


Рис. 27. К расчету швеллерного калибра при калибровке способом постепенного сгибания полок

Угол 2α может изменяться в пределах $0 < 2\alpha \leq 90 - (\gamma + \gamma')$. Поскольку угол α входит в несколько членов формулы (14) в виде тригонометрических функций и в градусах, то это уравнение решают путем последовательной подстановки, что требует много времени. Однако на вы-

числительной машине можно получить результат за несколько минут.

Методика определения остальных элементов швеллерного профиля при калибровке способом постепенного сгибания и соответствующие расчетные формулы для их определения рассмотрим на примере расчета калибровки швеллера № 16.

Расчет развернутой калибровки швеллеров способом постепенного сгибания полок

Расчет выполнен применительно к крупносортному стану 650 завода «Азовсталь» при прокатке швеллера № 16. Все данные, характеризующие швеллер № 16, взяты по ГОСТ 8240—56*.

Для прокатки швеллера № 16 принимаем восемь фазонных калибров. Расчет калибровки ведем против хода прокатки, начиная от чистового калибра (рис. 28).

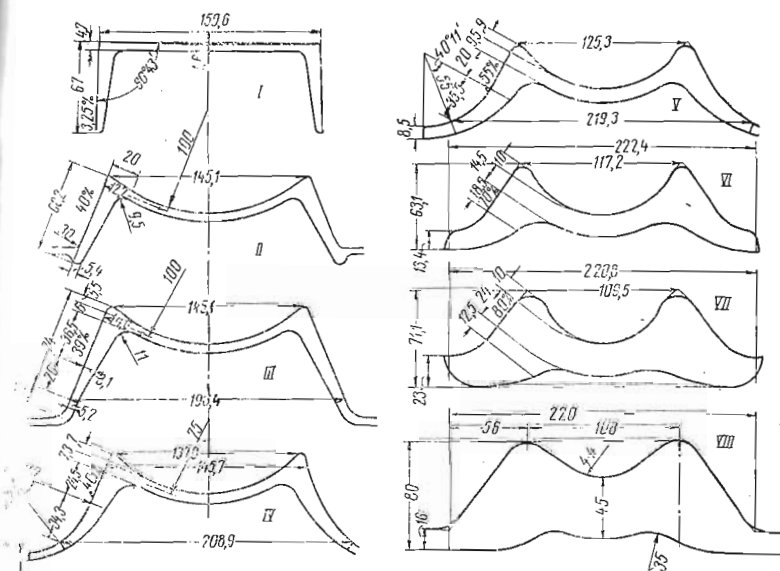


Рис. 28. Шаблоны калибров швеллера № 16 по развернутой калибровке способом постепенного сгибания полок

Определение размеров I (чистового) калибра

Определим ширину калибра с учетом минусового допуска, так как по мере износа валков и их переточек ширина калибра увеличится. Поэтому чем полнее используется минусовый допуск по ширине швеллера, тем большую переточку допускают валки чистовой клетки, т. е. увеличивается срок их службы.

Ширина калибра с учетом минусового допуска на высоту профиля и теплового расширения будет

$$B_1 = (B - \Delta_B) \alpha_t = (160 - 2,5) \cdot 1,013 = 159,6 \text{ мм.}$$

По ГОСТ 8240—56* допускается уменьшение средней толщины полки

$$\Delta t = 0,06t = 0,06 \cdot 8,4 = 0,504 \approx 0,5 \text{ мм.}$$

Тогда средняя толщина полки чистового калибра с учетом минусового допуска будет

$$t_1 = (t - \Delta t) \alpha_t = (8,4 - 0,5) \cdot 1,013 = 8,0 \text{ мм.}$$

Высота полки чистового калибра

$$h_1 = (h - d) \alpha_t = (64 - 5) \cdot 1,013 = 59,77 \approx 59,8 \text{ мм.}$$

Уменьшение площади полок вследствие уменьшения их средней толщины составит

$$\Delta F_{\text{п}} = 2h_1 \Delta t = 2 \cdot 59,8 \cdot 0,5 = 59,8 \text{ мм}^2.$$

Площадь сечения профиля в горячем состоянии

$$F_1 = F \alpha_t^2 = 1810 \cdot 1,013^2 = 1857 \text{ мм}^2.$$

По ГОСТ 8240—56* допускается минусовое отклонение до 5% (по массе) 1 м проката. Для швеллера № 16 максимальное уменьшение массы 1 м составит в переводе на площадь в горячем состоянии

$$\Delta F_1 = 0,05F_1 = 0,05 \cdot 1857 = 92,8 \text{ мм}^2.$$

Допустимое уменьшение площади стенки

$$\Delta F_{\text{ст}} = \Delta F_1 - \Delta F_{\text{п}} = 92,8 - 59,8 = 33 \text{ мм}^2.$$

Тогда допустимое уменьшение толщины стенки

$$\Delta d'_1 = \Delta F_{\text{ст}} : B_1 = 33 : 159,6 = 0,2 \text{ мм.}$$

Учитывая износ калибров, принимаем уменьшение толщины стенки $\Delta d'_1 = 0,3 \text{ мм.}$

Толщина стенки чистового калибра

$$d_1 = d - \Delta d'_1 = 5 - 0,3 = 4,7 \text{ мм.}$$

Площадь полки по шаблону чистового калибра

$$F_{1\text{ш}} = h_1 t_1 = 59,8 \cdot 8 = 478,4 \text{ мм}^2.$$

Толщина полки у основания

$$b_1 = t_1 + \frac{h_1}{2} \operatorname{tg} \alpha = 8 + \frac{59,8}{2} \cdot 0,1 = 10,99 \text{ мм.}$$

Учитывая износ калибров, округлим толщину полки у основания в меньшую сторону и примем $b_1 = 10,9 \text{ мм.}$

Толщина полки на конце

$$a_1 = t_1 - \frac{h_1}{2} \operatorname{tg} \alpha = 8 - \frac{59,8}{2} \cdot 0,1 = 5,01 \text{ мм.}$$

Высота полки по шаблону с учетом плюсового допуска

$$h_{1\text{ш}} = h_1 + \Delta h = 59,8 + 2,5 = 62,3 \text{ мм.}$$

Толщина полки на конце по шаблону

$$a_{1\text{ш}} = a_1 - (h_{1\text{ш}} - h_1) \cdot \operatorname{tg} \alpha = 5,01 - (62,3 - 59,8) \cdot 0,1 = 4,76 \text{ мм.}$$

Учитывая износ калибров, округлим толщину полки на конце в меньшую сторону и примем $a_{1\text{ш}} = 4,7 \text{ мм.}$

Для лучшей восстановимости валков выпуск наружных граней чистового калибра должен быть возможно большим. По ГОСТ 8240—56* выпуск наружных граней швеллера не должен превышать 1,25%. Правильные машины обычных конструкций надежно выправляют стенку швеллера с прогибом, соответствующим 2%; тогда максимально возможный выпуск наружных граней чистового калибра составит $1,25 + 2 = 3,25\%$.

По мере износа валков высота полки увеличивается. Поэтому заполнение чистового калибра металлом (расчетное) в первый период прокатки следует принимать несколько меньше номинального размера. Допустим, что оно на 0,8 мм меньше номинального, тогда расчетная высота полки чистового калибра

$$h'_1 = h_1 - 0,8 = 59,8 - 0,8 = 59 \text{ мм.}$$

Толщина полки на конце по заполнению

$$a'_1 = a_{1\text{ш}} + (h_{1\text{ш}} - h'_1) \operatorname{tg} \alpha = 4,7 + (62,3 - 59,0) \cdot 0,1 = 5,05 \text{ мм.}$$

Расчетная площадь полки чистового калибра

$$F_{1п} = \frac{b_1 + a'_1}{2} \cdot h'_1 = \frac{10,9 + 5,05}{2} \cdot 59 = 471,0 \text{ мм}^2.$$

Горизонтальная проекция полки I калибра

$$B_{1г} = (h_{1ш} + 0,5d_1) \sin \gamma_1 = (62,3 + 0,5 \cdot 47) \times \\ \times 0,0325 = 2,1 \text{ мм}.$$

Тогда горизонтальная проекция I калибра

$$B_{1г} = B_1 + 2B_{1г}^n = 159,6 + 2 \cdot 2,1 = 163,8 \text{ мм}.$$

Определение размеров II (предчистового) калибра

Обжатие стенки в I (чистовом) калибре $\Delta d_1 = 0,5 \text{ мм}$; принимаем уширение в I калибре $\Delta B_1 = 1,6 \text{ мм}$.

Тогда толщина стенки II калибра будет

$$d_2 = d_1 + \Delta d_1 = 4,7 + 0,5 = 5,2 \text{ мм},$$

и ширина калибра

$$B_2 = B_1 - \Delta B_1 = 159,6 - 1,6 = 158 \text{ мм}.$$

Для надежного контроля высоты полок предчистовой калибр обычно выполняют полузакрытым (контрольным). Этим достигается стабильность высоты полок по всей длине полосы и уменьшается концевая обрезь. Выпуск наружных граней предчистового калибра для экономии валков выбираем максимально возможным по условиям захвата в чистовом калибре.

Для обеспечения высокой производительности современных станов и повышения качества продукции необходимо стремиться вести прокатку без использования сложной вводной арматуры. Поэтому оптимальный выпуск наружных граней предчистового калибра определяют, исходя из возможности работы на чистовой клети без применения указанной арматуры. Практика показывает, что при максимальном выпуске 40% обеспечивается надежная работа чистовой клети с использованием обычных вводных линеек, при этом угол изгиба стенки $\gamma_2 = 21^\circ 50'$.

Угол между стенкой и полкой равен 90° .

Изгиб стенки закругляется радиусом $R_2 = (0,5 \div 1,0) B_2$. Принимаем $R_2 = 100 \text{ мм}$.

Ширина прямого участка стенки

$$B_2' = \frac{2\pi R_2 \gamma_2}{360^\circ} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 100 \cdot 21^\circ 50'}{360^\circ} = 76,2 \text{ мм}.$$

Ширина прямого участка стенки

$$B_2^- = 0,5 (B_2 - B_2') = 0,5 \cdot (158 - 76,2) = 40,9 \text{ мм}.$$

Горизонтальная проекция стенки

$$0,5B_{2г} = B_2^- : \cos \gamma_2 + (R_2 - B_2^- \operatorname{tg} \gamma_2) \sin \gamma_2 = \\ 40,9 : 0,92827 + (100 - 40,9 \cdot 0,4) 0,3719 = 75,2 \text{ мм},$$

откуда $B_{2г} = 2 \cdot 75,2 = 150,4 \text{ мм}$.

Для хорошего выполнения углов и сохранения в них высокой температуры, а также создания достаточной устойчивости полосы в валках во всех калибрах, начиная с предчистового, предусмотрены ложные фланцы. Чтобы избежать излишнего перетекания металла внутри калибра, размеры ложных фланцев следует проектировать возможно меньшими.

Размеры ложных фланцев выбирают конструктивно, основываясь на опыте хорошо работающих калибровок. Ложные фланцы предчистовых калибров обычно имеют треугольную форму.

Принимаем высоту ложных фланцев $c_2'' = 4,5 \text{ мм}$, ширину у основания $m_2 = 20 \text{ мм}$ (см. рис. 28).

Ширина калибра по вершинам ложных фланцев

$$B_{2ф} = B_г - 2 (0,5d_2 + c_2) \sin \gamma_2 = 150,4 - 2 (0,5 \cdot 5,2 + \\ + 4,5) 0,3719 = 145,1 \text{ мм}.$$

Площадь стенки II калибра

$$F_{2ст} = d_2 B_2 = 5,2 \cdot 158 = 821,6 \text{ мм}^2.$$

Коэффициент вытяжки в чистовом калибре

$$\mu_1 = \frac{F_{2ст}}{F_{1ст}} = \frac{821,6}{750,1} = 1,095.$$

Площадь полки

$$F_{2п} = F_{1п} \mu_1 = 471,0 \cdot 1,095 = 515,8 \text{ мм}^2.$$

Приращение высоты полки в чистовом калибре принимаем $\Delta h_1 = 0,5 \text{ мм}$. Тогда высота полки II калибра

$$h_2 = h_1' - \Delta h_1 = 59 - 0,5 = 58,5 \text{ мм}.$$

Толщина полки на конце

$$a_2 = a_1' \cdot \mu_1 = 5,05 \cdot 1,095 = 5,4 \text{ мм}.$$

Толщина полки у основания

$$b_2 = \frac{2F_{2п}}{h_2} - a_2 = \frac{2 \cdot 515,8}{58,5} - 5,4 = 12,2 \text{ мм.}$$

Размеры полукрытого контрольного калибра принимаем конструктивно: $p = 7 \text{ мм}$, $l = 10 \text{ мм}$, $s = 5 \text{ мм}$ (зазор между валками, зависящий от упругой деформации рабочей клетки и валков). Для плавного перехода наружная грань полки раскрывается двумя радиусами 30 и 6 мм.

Толщина полки в месте начала разъема валков

$$t_{2р} = a_2 + \frac{b_2 - a_2}{h_2} \cdot f_2 = 5,4 + \frac{12,2 - 5,4}{58,5} \cdot 22 = 8,0 \text{ мм,}$$

где $f_2 = p + l + s = 7 + 10 + 5 = 22 \text{ мм}$.

Тогда участок полки

$$u_2 = h_2 - f_2 = 58,5 - 22 = 36,5 \text{ мм.}$$

Радиус закругления конца полки

$$r_2 = r_{1\mu_1} = 3,5 \cdot 1,095 = 4 \text{ мм.}$$

Радиус сопряжения полки со стенкой

$$R'_2 = R'_{1\mu_1} = 8,5 \cdot 1,095 = 9,5 \text{ мм.}$$

Горизонтальная проекция полки

$$B_{2г} = (h_2 + 0,5d_2) \sin \gamma_2 = (58,5 + 0,5 \cdot 5,2) \cdot 0,3719 = 22,7 \text{ мм.}$$

Горизонтальная проекция калибра

$$B_{2п} = B_{2г} + 2B_{2г}^n = 150,4 + 2 \cdot 22,7 = 195,8 \text{ мм.}$$

Определение размеров III калибра

Обжатие стенки во II калибре Δd_2 принимаем равным 0,8 мм; уширение стенки $\Delta B_2 = 1,8 \text{ мм}$. Тогда:

$$d_3 = d_2 + \Delta d_2 = 5,2 + 0,8 = 6,0 \text{ мм;}$$

$$B_3 = B_2 - \Delta B_2 = 158 - 1,8 = 156,2 \text{ мм.}$$

Для предотвращения захвата полосы буртами полуоткрытого калибра выпуск наружных граней полок следующего по ходу расчета калибра принимаем несколько меньшим (39%) и угол изгиба стенки $\gamma_3 = 21^\circ 18'$.

Радиус изгиба стенки $R_3 = R_2 = 100 \text{ мм}$. Тогда ширина кривого участка стенки

$$B_3^* = \frac{2\pi R_3 \cdot 2\gamma_3}{360^\circ} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 100 \cdot 42^\circ 36'}{360^\circ} = 74,3 \text{ мм.}$$

Ширина прямого участка

$$B_3^- = 0,5 (B_3 - B_3^*) = 0,5 (156,2 - 74,3) = 40,85 \text{ мм.}$$

Горизонтальная проекция стенки

$$0,5B_{3г} = B_3^- : \cos \gamma_3 + (R_3 - B_3^- \operatorname{tg} \gamma_3) \sin \gamma_3 = 40,85 : 0,93169 + (100 - 40,85 \cdot 0,39) 0,36325 = 74,4 \text{ мм}$$

или $B_{3г} = 148,8 \text{ мм}$.

В III и последующих калибрах принимаем трапециевидные ложные фланцы. Размер ложных фланцев III калибра принимаем:

$$c_3 = 5,5 \text{ мм; } n_3 = 5 \text{ мм; } m_3 = 23 \text{ мм (см. рис. 28).}$$

Ширина калибра по вершинам ложных фланцев

$$B_{3ф} = B_{3г} - 2(0,5d_3 + c_3) \sin \gamma_3 = 148,8 - 2(0,5 \cdot 6 + 5,5) 0,36325 = 142,6 \text{ мм.}$$

Как показывает практика, обжатие полки по высоте в контрольном калибре должно быть равным 3—4 мм, что вполне сохраняет постоянную высоту полок по всей длине полосы. Применение высотной деформации больше указанных величин приводит к быстрой выработке валков контрольного калибра на конце полки, которая в готовом профиле выражена в виде продольных борозд. Кроме того, при большом обжатии излишек металла может выйти в разъем контрольного калибра, что приведет к образованию продольных лампасов и волнистости полки, а также быстрому износу калибра валков чистовой клетки.

Принимаем обжатие высоты полки в контрольном калибре $\Delta h_2 = 4 \text{ мм}$. Тогда размеры полки

$$u_3 = u_2 = 36,5 \text{ мм; } f_3 = f_2 + \Delta h_2 = 22 + 4 = 26 \text{ мм.}$$

Высота полки III калибра

$$h_3 = u_3 + f_3 = 36,5 + 26 = 62,5 \text{ мм.}$$

Для предотвращения образования наплывов (продольных лампасов) в контрольном калибре конец полки должен быть меньше на $\Delta_a = 0,2 \div 0,5 \text{ мм}$, т. е.

$$a_3 = a_2 - \Delta_a = 5,4 - 0,2 = 5,2 \text{ мм.}$$

Толщина полки в месте начала разъема валков

$$t_{3р} = t_{2р} = 8,0 \text{ мм.}$$

Однако поскольку в процессе деформации происходит обжатие (осадка) полки по высоте, толщину в этом месте

необходимо несколько увеличить. Принимаем увеличение толщины на 0,1 мм.

Тогда

$$t_{3p} = t_{2p} + 0,1 = 8 + 0,1 = 8,1 \text{ мм.}$$

Площадь стенки III калибра

$$F_{3ст} = d_3 \cdot B_3 = 6 \cdot 156,2 = 936 \text{ мм}^2.$$

Коэффициент вытяжки стенки в II калибре

$$\mu_2 = \frac{F_{3ст}}{F_{2ст}} = \frac{936}{821,6} = 1,140.$$

Площадь полки

$$F_{3п} = F_{2п} \cdot \mu_2 = 515,8 \cdot 1,140 = 588,0 \text{ мм}^2.$$

Обозначим $F_{3п.н}$ — площадь нижней части полки и $F_{3п.в}$ — площадь верхней части полки, тогда

$$F_{3п.н} = \frac{t_{3p} + a_3}{2} f_3 = \frac{8,1 + 5,2}{2} \cdot 26 = 172,9 \text{ мм}^2.$$

$$F_{3п.в} = F_{3п} - F_{3п.н} = 588,0 - 172,9 = 415,1 \text{ мм}^2.$$

Толщина полки у основания

$$b_3 = \frac{2F_{3п.в}}{a_3} - t_{3p} = \frac{2 \cdot 415,1}{36,5} - 8,1 = 14,6 \text{ мм.}$$

Радиус сопряжения полки со стенкой

$$R'_3 = R'_2 \mu_2 = 9,5 \cdot 1,140 \approx 11 \text{ мм.}$$

Горизонтальная проекция полки

$$B_{3г}^n = (h_3 + 0,5d_3) \sin \gamma_3 = (62,5 + 0,5 \cdot 6,0) \cdot 0,3632 = 23,8 \text{ мм.}$$

Горизонтальная проекция калибра

$$B_{3п} = B_{3г} + 2B_{3г}^n = 148,8 + 2 \cdot 23,8 = 196,4 \text{ мм.}$$

Определение размеров IV калибра

Калибр IV — кривополючный переходный: от III прямополючного к следующему V кривополючному. Этот калибр размещен во II клетки трио 650, поэтому выпуск наружных граней полок примем таким же, как и у II калибра (40%). Отгиб полки производят на величину, обеспечивающую надежную задачу полосы в III калибр без

привнесения специальной вводной арматуры. Для этого верхний бурт II калибра скругляют двумя радиусами 30 и 15 мм. Задаемся обжатием стенки в III калибре $\Delta d_3 = 1,3$ мм и уширением $\Delta B_3 = 2,1$ мм.

Толщина стенки

$$d_4 = d_3 + \Delta d_3 = 6,0 + 1,3 = 7,3 \text{ мм.}$$

Ширина калибра

$$B_4 = B_3 - \Delta B_3 = 156,2 - 2,1 = 154,1 \text{ мм.}$$

Радиус изгиба стенки R_4 принимаем равным 75 мм.

Ширина кривого участка стенки

$$B_4^v = \frac{2\pi R_4 \gamma_4}{360^\circ} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 75 \cdot 2 \cdot 21^\circ 50'}{360^\circ} = 57,1 \text{ мм.}$$

Ширина прямого участка полки

$$B_4^- = 0,5 (B_4 - B_4^v) = 0,5 (154,1 - 57,1) = 48,45 \text{ мм.}$$

Горизонтальная проекция стенки

$$0,5B_{4г} = B_4^- : \cos \gamma_4 + (R_4 - B_4^- \operatorname{tg} \gamma_4) \sin \gamma_4 = 48,45 : 0,92827 + (75 - 48,45 \cdot 0,4) \cdot 0,37191 = 72,85 \text{ мм,}$$

откуда $B_{4г} = 145,7$ мм.

Размеры ложных фланцев IV калибра принимаем $n_4 = c_4 = 7$ мм. Сопряжение ложных фланцев со стенкой производим радиусом 60 мм.

Ширина калибра по вершинам ложных фланцев

$$B_{4ф} = B_{4г} - 2(0,5d_4 + c_4) \sin \gamma_4 = 145,7 - 2(0,5 \cdot 7,3 + 7) \cdot 0,3719 = 137,8 \text{ мм.}$$

Приращение высоты полки Δh_3 в III калибре принимаем равным 0,5 мм.

Тогда высота полки IV калибра

$$h_4 = h_3 - \Delta h_3 = 62,5 - 0,5 = 62 \text{ мм.}$$

Принимаем высоту прямого участка полки $k_4 = 24,5$ мм. Высота кривого участка полки

$$h_4^v = h_4 - k_4 = 62 - 24,5 = 37,5 \text{ мм.}$$

Площадь стенки IV калибра

$$F_{4ст} = d_4 \cdot B_4 = 7,3 \cdot 154,1 = 1124,2 \text{ мм}^2.$$

Коэффициент вытяжки стенки в III калибре

$$\mu_3 = \frac{F_{4\text{ст}}}{F_{3\text{ст}}} = \frac{1124,2}{936} = 1,201.$$

Площадь полки IV калибра

$$F_{4п} = F_{3п} \cdot \mu_3 = 588 \cdot 1,201 = 706,2 \text{ мм}^2.$$

Толщина полки на конце

$$a_4 = a_3 \mu_3 = 5,2 \cdot 1,201 = 6,4 \text{ мм}.$$

Для нахождения толщины полки в месте перехода от прямого участка к кривому, сначала определяем толщину полки III калибра на высоте $k_4 = 24,5 \text{ мм}$:

$$t_{3к} = b_3 - \frac{b_3 - t_{3р}}{u_3} k_4 = 14,6 - \frac{14,6 - 8,1}{36,5} \cdot 24,5 = 10,2 \text{ мм}.$$

Толщина полки в месте перехода от прямого участка к кривому (на высоте k_4) в IV калибре

$$t_{4к} = t_{3к} \mu_3 = 10,2 \cdot 1,201 = 12,1 \text{ мм}.$$

Площадь кривого участка полки

$$F_{4п}^{\sim} = 0,5 (t_{4к} + a_4) h_4^{\sim} = 0,5 (12,1 + 6,4) 37,5 = 346,9 \text{ мм}^2.$$

Площадь прямого участка полки

$$F_{4п}^- = F_{4п} - F_{4п}^{\sim} = 706,2 - 346,9 = 359,3 \text{ мм}^2.$$

Тогда толщина полки у основания

$$b_4 = \frac{2F_{4п}^-}{k_4} - t_{4к} = \frac{2 \cdot 359,3}{24,5} - 12,1 = 17,2 \text{ мм}.$$

Радиус сопряжения полки со стенкой

$$R_4' = R_3' \mu_3 = 11 \cdot 1,201 = 13,5 \text{ мм}.$$

Для нормального захвата полосы валками конструируем плавный переход конца полки в зазор между валками. При развертывании прямолинейного участка в криволинейный очень важно выбрать радиус, так как от этого зависит угол отгиба конца полки и, следовательно, горизонтальная проекция калибра.

Принимаем радиус отгиба полки от наружной грани $R_4 = 70 \text{ мм}$. Тогда радиус отгиба полки по средней линии

$$R_{4п}^{\text{ср}} = R_{4п} + 0,5a_4 = 70 + 0,5 \cdot 6,4 = 73,2 \text{ мм}.$$

Угол отгиба криволинейного участка

$$\beta_4 = \frac{h_4^{\sim} \cdot 360^\circ}{2\pi \cdot R_{4п}^{\text{ср}}} = \frac{37,5 \cdot 360^\circ}{2 \cdot 3,14 \cdot 73,2} = 29^\circ 23'.$$

Горизонтальная проекция полки IV калибра

$$B_{4г}^{\text{п}} = (k_4 + 0,5d_4) \sin \gamma_4 + [R_4 \sin (90^\circ - \gamma_4) - R_4 \sin (90^\circ - \gamma_4 - \beta_4)] = (24,5 + 0,5 \cdot 7,3) \cdot 0,3719 + [70 \cdot 0,9293 - 70 \cdot 0,6264] = 31,6 \text{ мм}.$$

Горизонтальная проекция IV калибра

$$B_{4п} = B_{4г} + 2B_{4г}^{\text{п}} = 145,7 + 2 \cdot 31,6 = 208,9 \text{ мм}.$$

Определение размеров V калибра

Калибр размещен в I клетки трио 650. Поэтому выпуск наружных граней полок, исходя из восстановимости калибров, желательно проектировать возможно большим. Однако резкое увеличение выпуска наружных граней может существенно ухудшить задачу полосы в IV калибр. С учетом этого принимаем выпуск наружных граней V калибра равным 55% и угол изгиба стенки $\gamma_5 = 28^\circ 49'$. Тогда толщина стенки при $\Delta d_4 = 2,2 \text{ мм}$ будет

$$d_5 = d_4 + \Delta d_4 = 7,3 + 2,2 = 9,5 \text{ мм}.$$

Ширина калибра

$$B_5 = B_4 - \Delta B_4 = 154,1 - 3 = 151,1 \text{ мм}.$$

Радиус изгиба стенки R_5 , как и ранее, принимаем равным 75 мм. Ширина кривого участка стенки

$$B_5^{\sim} = \frac{2\pi R_5 \cdot 2\gamma_5}{360^\circ} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 75 \cdot 2 \cdot 28^\circ 49'}{360^\circ} = 75,4 \text{ мм}.$$

Ширина прямого участка

$$B_5^- = 0,5 (B_5 - B_5^{\sim}) = 0,5 (151,1 - 75,4) = 37,8 \text{ мм}.$$

Горизонтальная проекция стенки

$$0,5B_{5г} = B_5^- : \cos \gamma_5 + (R_5 - B_5^- \text{ tg } \gamma_5) \sin \gamma_5 = 37,8 : 0,87617 + (75 - 37,8 \cdot 0,55) 0,482 = 69,25 \text{ мм},$$

откуда $B_{5г} = 138,5 \text{ мм}.$

Размеры ложных фланцев V калибра принимаем $n_5 = c_5 = 9$ мм. Приращение высоты полки IV калибра Δh_4 принимаем равным 0,5 мм.

Тогда высота полки V калибра

$$h_5 = h_4 - \Delta h_4 = 62 - 0,5 = 61,5 \text{ мм.}$$

Принимаем высоту прямого участка полки $k_5 = 20$ мм. Высота криволинейного участка полки

$$h'_5 = h_5 - k_5 = 61,5 - 20 = 41,5 \text{ мм.}$$

Площадь стенки V калибра

$$F_{\text{ст}} = B_5 \cdot d_5 = 151,1 \cdot 9,5 = 1434,5 \text{ мм}^2.$$

Коэффициент вытяжки стенки в IV калибре

$$\mu_4 = \frac{F_{\text{ст}}}{F_{\text{дст}}} = \frac{1434,5}{1124,4} = 1,276.$$

Площадь полки V калибра

$$F_{5\text{п}} = F_{4\text{п}} \cdot \mu_4 = 706,2 \cdot 1,276 = 901,1 \text{ мм}^2.$$

Толщина полки на конце

$$a_5 = a_4 \cdot \mu_4 = 6,4 \cdot 1,276 = 8,2 \text{ мм.}$$

Толщина полки у основания

$$b_5 = \frac{2F_{5\text{п}}}{h_5} - a_5 = \frac{2 \cdot 901,1}{61,5} - 8,2 = 21 \text{ мм.}$$

Толщина полки на высоте $k_5 = 20$ мм

$$t_{5\text{к}} = b_5 - \frac{b_5 - a_5}{h_5} k_5 = 21 - \frac{21 - 8,2}{61,5} \cdot 20 = 16,8 \text{ мм.}$$

Принимаем радиус отгиба полки по наружной грани криволинейного участка $R_{5\text{п}} = 55$ мм. Тогда радиус отгиба полки по средней линии

$$R_{5\text{п}}^{\text{ср}} = 55 + 4,1 = 59,1 \text{ мм.}$$

Угол отворота криволинейного участка

$$\beta_5 = \frac{h'_5 \cdot 360^\circ}{2\pi \cdot R_{5\text{п}}^{\text{ср}}} = \frac{41,5 \cdot 360^\circ}{2 \cdot 3,14 \cdot 59,1} = 40^\circ 11'.$$

Радиус сопряжения полки со стенкой

$$R'_5 = R'_4 \mu_4 = 13,5 \cdot 1,276 = 17,5 \text{ мм.}$$

Горизонтальная проекция полки V калибра

$$B_{5\text{г}} = (k_5 + 0,5d_5) \sin \gamma_5 + [R_{5\text{п}} \sin (90^\circ - \gamma_5) -$$

$$R_{5\text{п}} \sin (90^\circ - \gamma_5 - \beta_5)] = (20 + 0,5 \cdot 9,5) 0,482 + (55 \cdot 0,8762 - 55 \cdot 0,3584) = 40,4 \text{ мм.}$$

Горизонтальная проекция V калибра

$$B_{5\text{п}} = B_{5\text{г}} + 2B_{5\text{г}}^{\text{н}} = 138,5 + 2 \cdot 40,4 = 219,3 \text{ мм.}$$

Определение размеров VI калибра

Калибры VI — VII размещены в I клетке трио 650. Калибры VI и VII развернуты полностью, поэтому для них необходим несколько иной метод расчета. Принимаем угол выпуска наружных граней VI калибра равным 70% и угол отгиба стенки $\gamma_6 = 35^\circ$.

Обжатие стенки в V калибре $\Delta d_5 = 5$ мм. Уширение стенки $\Delta B_5 = -2,8$ мм. Тогда толщина стенки

$$d_6 = d_5 + \Delta d_5 = 9,5 + 5 = 14,5 \text{ мм}$$

и ширина калибра

$$B_6 = B_5 - \Delta B_5 = 151,1 + 2,8 = 153,9 \text{ мм.}$$

Принимаем радиус изгиба стенки $R_6 = 75$ мм.

Ширина кривого участка стенки

$$B_6^{\text{к}} = \frac{2\pi R_6^2 \gamma_6}{360^\circ} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 75^2 \cdot 2 \cdot 35^\circ}{360^\circ} = 91,6 \text{ мм.}$$

Ширина прямого участка стенки

$$B_6^{\text{п}} = 0,5 (B_6 - B_6^{\text{к}}) = 0,5 (153,9 - 91,6) = 31,15 \text{ мм.}$$

Горизонтальная проекция стенки VI калибра

$$0,5B_{\text{ст.г}} = B_6^{\text{п}} \cdot \cos \gamma_6 + R_6 \sin \gamma_6 = 31,15 \cdot 0,81915 + 75 \cdot 0,57358 = 68,5 \text{ мм,}$$

откуда $B_{\text{ст.г}} = 137$ мм.

Площадь стенки

$$F_{\text{ст}} = B_6 \cdot d_6 = 153,9 \cdot 14,5 = 2230 \text{ мм}^2.$$

Коэффициент вытяжки стенки в V калибре

$$\mu_5 = \frac{F_{\text{ст}}}{F_{5\text{ст}}} = \frac{2230}{1434,5} = 1,555.$$

В калибрах VI и VII обжатие по стенке достаточной величины и заметно влияет на прирост высоты полки. Для учета влияния обжатия стенки на прирост высоты полки следует пересчитать площади полки V калибра;

принимая, что основание полки совмещается с горизонтальной осью стенки.

Толщина основания полки по оси стенки:

$$b_{\text{бст}} = \frac{b_5 - t_{\text{бк}}}{k_5} (k_5 + 0,5d_5) + t_{\text{бк}} = \\ = \frac{21 - 16,8}{20} (20 + 0,5 \cdot 9,5) + 16,8 = 22 \text{ мм.}$$

Высота полки V калибра от оси стенки

$$h_{\text{бст}} = h_5 + 0,5d_5 = 61,5 + 0,5 \cdot 9,5 = 66,25 \text{ мм.}$$

Площадь полки V калибра уточненной длины

$$F'_{5\text{п}} = \frac{a_5 + b_{\text{бст}}}{2} \cdot h_{\text{бст}} = \frac{8,2 + 22}{2} \cdot 66,25 = 1000,4 \text{ мм}^2.$$

Площадь полки VI калибра]

$$F_{6\text{п}} = F_{5\text{п}} \mu_5 = 1000,4 \cdot 1,555 = 1555,6 \text{ мм}^2.$$

Высота полки VI калибра при ее приращении в V калибре $\Delta h_5 = 0,75 \text{ мм}$ будет

$$h_6 = h_{\text{бст}} - \Delta h_5 = 66,25 - 0,75 = 65,5 \text{ мм.}$$

Толщина основания полки по оси стенки VI калибра

$$b_{\text{бст}} = b_{\text{бст}} \mu_5 = 22 \cdot 1,555 = 34,2 \text{ мм.}$$

Толщина конца полки

$$a_6 = \frac{2F_{6\text{п}}}{h_6} - b_{\text{бст}} = \frac{2 \cdot 1555,6}{65,5} - 34,2 = 13,4 \text{ мм.}$$

Калибр VI по условиям входа в V калибр может быть выполнен полностью развернутым. Угол разворота полки

$$\beta_6 = 90^\circ - \gamma_6 = 90 - 35^\circ = 55^\circ.$$

Принимаем радиус отгиба наружной грани полки $R_{6\text{п}} = 34 \text{ мм}$. Радиус отгиба средней линии полки

$$R_{6\text{п}}^{\text{сп}} = R_{6\text{п}} + 0,5a_6 = 34 + 0,5 \cdot 13,4 = 40,7 \text{ мм.}$$

Высота кривого участка полки

$$h_6^{\sim} = \frac{2\pi R_{6\text{п}}^{\text{сп}} \beta_6}{360^\circ} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 40,7 \cdot 55^\circ}{360^\circ} = 39 \text{ мм.}$$

Принимаем $k_6 = 18,5 \text{ мм}$. Тогда длина горизонтального участка полки (по средней линии полки)

$$h_{6\text{г}} = h_6 - h_6^{\sim} - k_6 - 0,5d_6 = 65,5 - 39 - 18,5 - \\ - 0,5 \cdot 14,5 = 0,75 \approx 0,7 \text{ мм.}$$

Толщина полки на высоте k_6

$$t_{6\text{к}} = b_{\text{бст}} - \frac{b_{\text{бст}} - a_6}{h_6} (k_6 + 0,5d_6) = 34,2 - \\ - \frac{34,2 - 13,4}{64,5} \cdot (18,5 + 0,5 \cdot 14,5) = 26 \text{ мм.}$$

Размеры ложных фланцев принимаем $c_6 = n_6 = 10 \text{ мм}$.

Радиус сопряжения полки со стенкой

$$R'_6 = R'_{6\text{п}} = 17,5 \cdot 1,555 = 27 \text{ мм.}$$

Горизонтальная проекция наклонного и криволинейного участков полки VI калибра

$$B_{6\text{г}}^{\text{лн}} = (k_6 + 0,5d_6) \sin \gamma_6 + R_{6\text{п}} \sin \beta_6 = \\ = (18,5 + 0,5 \cdot 14,5) \cdot 0,5736 + 34 \cdot 0,81915 = 42,7 \text{ мм.}$$

Горизонтальная проекция полки VI калибра

$$B_{6\text{г}}^{\text{п}} = B_{6\text{г}}^{\text{лн}} + h_{6\text{г}} = 42,7 + 0,7 = 43,4 \text{ мм.}$$

Горизонтальная проекция VI калибра

$$B_{6\text{п}} = B_{6\text{г}} + 2B_{6\text{г}}^{\text{п}} = 137 + 2 \cdot 43,4 = 223,8 \text{ мм.}$$

Остальные размеры рассчитывают из геометрических построений.

Определение размеров VII калибра

Калибр VII полностью развернут. Принимаем выпуск наружных граней полок VII калибра равным 80% или $\gamma_7 = 38^\circ 40'$.

Обжатие стенки в VI калибре принимаем $\Delta d_6 = 9,5 \text{ мм}$ и уширение стенки $\Delta B_6 = -2,9 \text{ мм}$. Тогда:

$$d_7 = d_6 + \Delta d_6 = 14,5 + 9,5 = 24 \text{ мм;}$$

$$B_7 = B_6 - \Delta B_6 = 153,9 + 2,9 = 156,8 \text{ мм.}$$

Радиус изгиба стенки по средней линии $R_7 = 75$ мм.
Ширина кривого участка стенки

$$B_7^- = \frac{2\pi R_7 \gamma_7}{360^\circ} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 75 \cdot 2 \cdot 38^\circ 40'}{360^\circ} = 101,2 \text{ мм.}$$

Ширина прямого участка стенки

$$B_7^- = 0,5 (B_7 - B_7^-) = 0,5 (156,8 - 101,2) = 27,8 \text{ мм.}$$

Горизонтальная проекция стенки VII калибра

$$0,5 B_{7r} = B_7^- \cos \gamma_7 + R_7 \sin \gamma_7 = 27,8 \cdot 0,78079 + 75 \cdot 0,62479 = 68,5 \text{ мм,}$$

откуда $B_{7r} = 137$ мм.

Площадь стенки

$$F_{7ст} = B_7 d_7 = 156,8 \cdot 24 = 3760,8 \text{ мм}^2.$$

Коэффициент вытяжки в VI калибре

$$\mu_6 = \frac{F_{7ст}}{F_{6ст}} = \frac{3760,8}{2230} = 1,687.$$

Площадь полки VII калибра

$$F_{7п} = F_{п} \mu_6 = 1555,6 \cdot 1,687 = 2624 \text{ мм}^2.$$

Толщина основания полки по оси стенки

$$b_{7ст} = b_{6ст} \mu_6 = 34,2 \cdot 1,687 = 57,7 \text{ мм.}$$

Высота полки VII калибра

$$h_7 = h_6 - \Delta h_6 = 65,5 - 0,5 = 65 \text{ мм.}$$

Толщина конца полки

$$a_7 = \frac{2F_{7п}}{h_7} - b_{7с} = \frac{2 \cdot 2624}{65,0} - 57,7 = 23,0 \text{ мм.}$$

Принимаем радиус отгиба наружной грани полки $R_{7п} = 31,5$ мм. Радиус отгиба средней линии полки

$$R_{7п}^{cp} = R_{7п} + 0,5 a_7 = 31,5 + 0,5 \cdot 23 = 43 \text{ мм.}$$

Высота кривого участка полки

$$h_7^- = \frac{2\pi R_{7п}^{cp} \beta_7}{360^\circ} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 43 \cdot 51^\circ 20'}{360^\circ} = 38,5 \text{ мм.}$$

Принимаем $k_7 = 12,5$ мм, тогда длина горизонтально-кривого участка полки

$$h_{7к} = h_7 - k_7 - 0,5 d_7 = 65 - 38,5 - 12,5 - 0,5 \cdot 24 = 2,0 \text{ мм.}$$

Размеры ложных фланцев, как и в VI калибре, принимаем $n_7 = c_7 = 10$ мм.

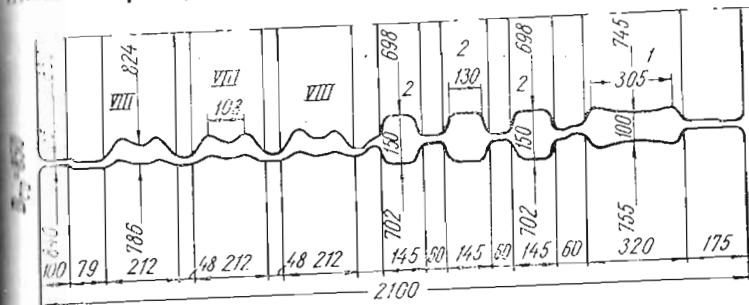


Рис. 29. Монтаж калибров швеллера № 16 на валках обжимной клетки 800 по калибровке способом постепенного сгибания

Толщина полки на высоте k_7

$$t_{7к} = b_{7ст} - \frac{b_{7ст} - a_7}{h_7} (k_7 + 0,5 d_7) = 57,7 - \frac{57,7 - 23}{65} (12,5 + 0,5 \cdot 24) = 44,7 \text{ мм.}$$

Радиус сопряжения полки со стенкой

$$R_7' = R_6' \mu_6 = 27 \cdot 1,687 = 45 \text{ мм.}$$

Горизонтальная проекция наклонного и криволинейного участков полки VII калибра

$$B_{7r}^{ln} = (k_7 + 0,5 d_7) \sin \gamma_7 + R_{7п} \sin \beta_7 = (12,5 + 0,5 \cdot 24) \cdot 0,6248 + 31,5 \cdot 0,7808 = 39,9 \text{ мм.}$$

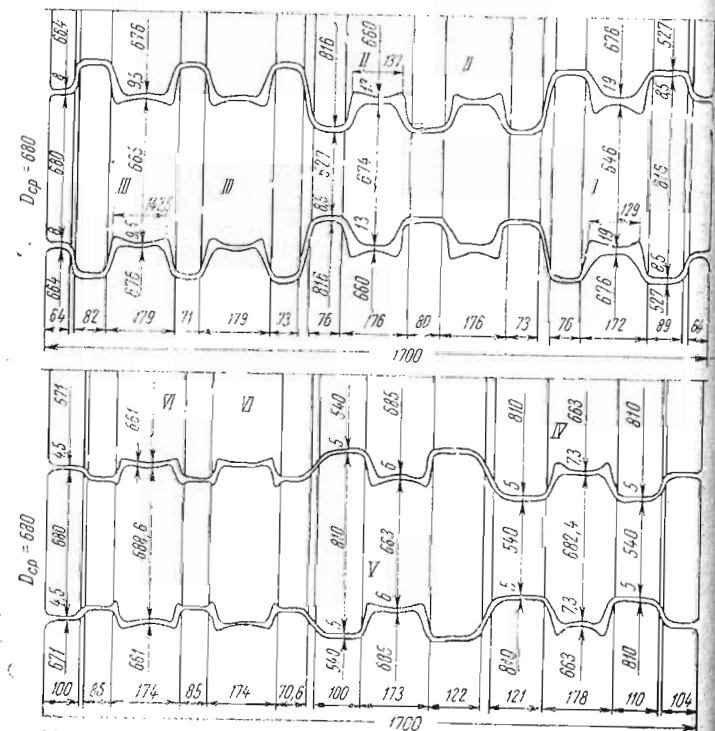
Горизонтальная проекция полки VII калибра

$$B_{7r}^n = B_{7r}^{ln} + h_{7с} = 39,9 + 2 = 41,9 \text{ мм.}$$

Горизонтальная проекция VII калибра

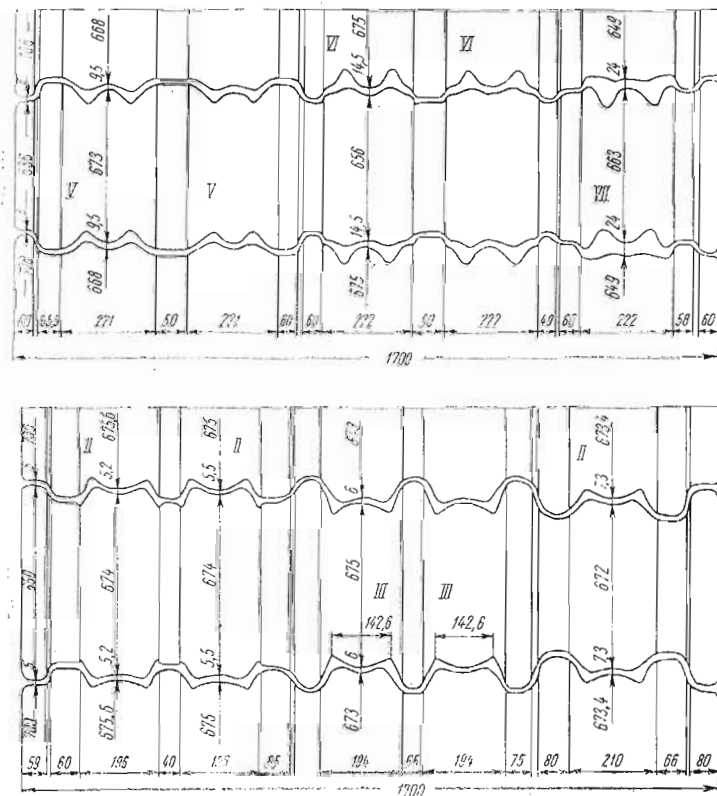
$$B_{7п} = B_{7r} + 2 B_{7r}^n = 137 + 2 \cdot 41,9 = 220,8 \text{ мм.}$$

Шаблоны калибров выполненной калибровки приведены на рис. 28.



92

Рассчитанная по изложенному методу калибровка улучшает технико-экономические показатели при прокатке массовых профилей (швеллеры и др.) вследствие уменьшения глубины вреза ручьев, меньшего съема металла валков при их переточке и уменьшения исходных диаметров вал-



93

ков по сравнению с калибровкой с увеличенным выпуском полок.

Так, по калибровке с увеличенным выпуском полок при прокатке швеллера № 16 диаметр среднего валка в опасном сечении на II клети 650 равен $D_{\text{ср1}} = 540 \text{ мм}$, верхнего и нижнего $D_{\text{в1}} = D_{\text{н1}} = 540 \text{ мм}$ (рис. 30). Исходные диаметры бочек верхнего, среднего и нижнего валков для II клети трио $D_{\text{и.в1}} = D_{\text{и.ср1}} = D_{\text{и.н1}} = 810 \text{ мм}$.

По развернутой калибровке способом постепенного сгибания (рис. 31) диаметр среднего валка II клети трио 650 в опасном сечении составляет $D_{\text{ср}} = 589 \text{ мм}$, а верхнего и нижнего валков $D_{\text{в}} = D_{\text{н}} = 552 \text{ мм}$. Исходные диаметры бочек верхнего и нижнего валков II клети $D_{\text{и.в}} = D_{\text{и.н}} = 760 \text{ мм}$, а среднего $D_{\text{и.ср}} = 797 \text{ мм}$.

Увеличение прочности валков II клети стана 650 при калибровке способом постепенного сгибания по сравнению с калибровкой с увеличенным выпуском полок пропорционально отношению диаметров в кубе в опасном сечении для средних валков $\frac{D_{\text{ср}}^3}{D_{\text{ср1}}^3} = \frac{589^3}{540^3} = 1,298$ раза;

для верхних и нижних валков $\frac{D_{\text{в}}^3}{D_{\text{в1}}^3} = \frac{D_{\text{н}}^3}{D_{\text{н1}}^3} = \frac{552^3}{540^3} = 1,068$ раза.

Следовательно, прочность валков II клети трио 650 по калибровке способом постепенного сгибания соответственно больше в 1,298 и 1,068 раза, чем в случае применения калибровки с увеличенным выпуском полок.

Среднее уменьшение массы исходных бочек валков II клети трио 650 по калибровке способом постепенного сгибания составит

$$\frac{D_{\text{и.ср1}}^2 + D_{\text{и.в1}}^2 + D_{\text{и.н1}}^2}{D_{\text{и.ср}}^2 + D_{\text{и.в}}^2 + D_{\text{и.н}}^2} = \frac{810^2 + 810^2 + 810^2}{797^2 + 760^2 + 760^2} = 1,10 \text{ раза.}$$

Из этого следует, что расход валков II клети только за счет уменьшения исходных диаметров бочек уменьшается примерно на 10%.

На I клети трио 650 увеличение прочности валков в опасном сечении при применении калибровки способом постепенного сгибания составит:

$$\text{для средних валков } \frac{D_{\text{ср}}^3}{D_{\text{ср1}}^3} = \frac{596^3}{527^3} = 1,447 \text{ раза;}$$

$$\text{для нижних и верхних валков } \frac{D_{\text{н}}^3}{D_{\text{н1}}^3} = \frac{D_{\text{в}}^3}{D_{\text{в1}}^3} = \frac{602^3}{527^3} = 1,491 \text{ раза.}$$

Среднее снижение расхода валков I клети трио 650 за счет уменьшения исходных диаметров бочек в этом случае будет:

$$\frac{D_{\text{и.ср1}}^2 + D_{\text{и.в1}}^2 + D_{\text{и.н1}}^2}{D_{\text{и.ср}}^2 + D_{\text{и.в}}^2 + D_{\text{и.н}}^2} = \frac{816^2 + 816^2 + 816^2}{730^2 + 740^2 + 740^2} = 1,227 \text{ раза,}$$

т. е. примерно на 22,7%.

На обжимной клети дуо 800 прочность валков в опасном сечении соответственно увеличится

$$\frac{D_{\text{ср}}^3}{D_{\text{ср1}}^3} = \frac{767^3}{638^3} = 1,738 \text{ раза.}$$

Уменьшение расхода валков обжимной клети дуо 800 за счет уменьшения исходных диаметров бочек составит

$$\frac{D_{\text{и.н1}}^2 + D_{\text{и.в1}}^2}{D_{\text{и.н}}^2 + D_{\text{и.в}}^2} = \frac{1030^2 + 841^2}{901^2 + 840^2} = 1,165 \text{ раза,}$$

т. е. примерно на 16,5%.

Основные положения метода расчета калибровки профиля боковины рештака шахтного конвейера способом постепенного сгибания полок

Боковина рештака шахтного конвейера (см. рис. 4) представляет собой сложный несимметричный профиль. Точное определение границы истечения металла из углов в стенку и полку профиля затруднено. Поэтому, пока эта граница не определена, деление профиля на части должно быть таким, чтобы можно было контролировать изменение размеров каждого элемента. При общепринятом делении подобных профилей (рис. 32, а) не учитывается увеличение высоты полок за счет обжатия стенки. Профиль СП-63 имеет сравнительно большую толщину прямых участков стенки ($d_{\text{н}}' = 13 \text{ мм}$), которая в VII калибре возрастает до $d_{\text{н7}} = 37 \text{ мм}$. Общая погрешность в определении высоты полки составит $\Delta d_{\Sigma} = 0,5$ ($d_{\text{н7}} - d_{\text{н}}'$) = 0,5 (37 — 13) = 12 мм. Общую погрешность высоты полки определяют при условии симметричного обжатия прямых участков стенки. Изменение высоты полки профиля на 12 мм

уже заметно влияет на другие расчетные размеры калибров, поэтому оно должно быть учтено.

Увеличение высоты полки за счет обжатия стенки может быть учтено, если разбить профиль таким образом, чтобы основание полки совпадало с осью прямых участков стенки (рис. 32,б). Части профиля с двойной штриховкой

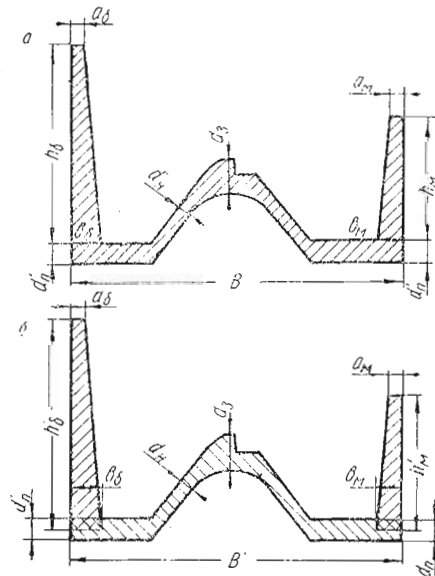


Рис. 32. Способы деления профиля боковины решетки шахтного конвейера на элементы:

а — общепринятый способ деления фланцевых профилей; б — способ деления, учитывающий обжатие стенки

как бы одновременно принадлежат стенке и полкам профиля. Следовательно, действительная граница раздела между стенкой и полками проходит в области двойной штриховки. Поскольку калибровка способом постепенного сгибания основана на условии равенства коэффициентов вытяжки различных частей профиля, то точное определение действительной линии раздела полки и стенки не внесет существенной погрешности в расчет.

Для определения приращения Δh высоты полки, перпендикулярных оси валков, обычно пользуются форму-

лой В. П. Бахтинова [3]. Чаще всего это приращение принимают равным 0,5 мм.

Если полки профиля расположены параллельно оси валков, например при прокатке уголков по развернутой калибровке, то приращение высоты полки рассчитывают по формулам уширения для полосы [13]. Эти формулы можно использовать при калибровке способом постепенного сгибания только для VIII и VII калибров. Полки промежуточных калибров имеют криволинейную форму и различный наклон к оси валков. Формулы для определения приращения высоты полки в криволинейных калибрах с различным наклоном получаются громоздкими и недостаточно точными. Практические наблюдения показывают, что приращение высоты полки находится в пределах от 0,5 до 2,5 мм. При разработке рабочих калибровок, зная примерно пределы изменения приращения высоты полки, можно с достаточной степенью точности оценить значение величины приращения без громоздких вычислений. Именно таким образом определяли приращение высоты полки при разработке калибровки профиля СП-63.

Величина уширения зависит от обжатия стенки полосы и определяется условиями свободного проникновения профиля в калибр. Профиль СП-63 имеет изогнутую и достаточно толстую стенку. Такая стенка вследствие хороших условий для перетекания металла не создает больших давлений на бурты, что наблюдается при прокатке швеллеров в случае малой величины запроецированного уширения. Поэтому уширение стенки при калибровке этого профиля можно принимать в пределах, рекомендуемых при расчете калибровок двутавровых балок и швеллеров.

При разработке калибровки обычно известны все технологические параметры стана и, следовательно, ориентировочные обжимаемые площади по проходам с учетом одновременной прокатки в нескольких калибрах, что характерно для станов линейного типа. На основании этих данных строят график распределения обжимаемых площадей по проходам, а затем определяют коэффициенты вытяжки и строят график коэффициентов вытяжки.

Прокатку рассматриваемого профиля применительно к крупносортному стану 650 рекомендуется производить в клетях чистой линии за семь проходов: один (в калибре I) в III клетке дуо 650, три (в калибрах II — IV) во II

клетей трио 650 и три (в калибрах V — VII) в I клетей трио 650.

Исходя из практических данных, при прокатке профиля СП-63 распределение обжимаемых площадей принимается по семи фасонным калибрам чистовой линии стана соответственно с рис. 33; обжимаемые площади определяются по величине коэффициентов вытяжки всего профиля в каждом калибре. При выборе величины обжимаемой площади в калибре, как и при прокатке швеллеров, оценивали пластичность

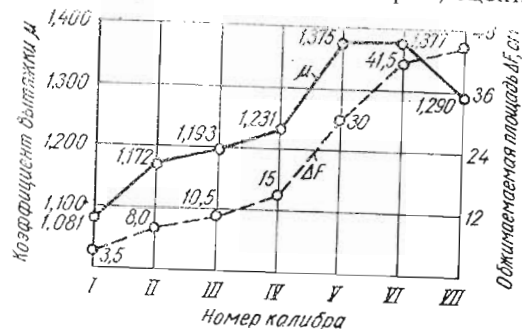


Рис. 33. Распределение обжимаемых площадей ΔF и коэффициентов вытяжки μ по калибрам чистовой линии стана 650 при прокатке профиля СП-63

металла с учетом понижения температуры полосы от одного прохода к другому, а также положение калибров на бочке вала и наличие дублирующих калибров. Из рис. 33 видно, что при передаче полосы из клетки в клетку (после третьего и шестого проходов) соответственно снижается обжимаемая площадь, ибо такая передача связана с потерей времени, снижением температуры полосы и пластичности металла. Калибр III обычно находится в средней части бочки вала, поэтому интенсивность изменения величины обжимаемой площади значительно снижена. При определении величины обжимаемой площади по проходам учитывается также возможность прокатки с перекрытием. Для данного стана необходимо было предусмотреть возможность одновременной прокатки в III, V и VII калибрах. При одновременной прокатке в нечетных калибрах I и II клетей трио 650 интенсивность изменения обжимаемой площади в VII калибре также снижается, что видно на кривой рис. 33.

Важное значение для точного заполнения всех элементов фасонных калибров имеет правильное размещение калибров на валах, что в значительной мере зависит от точности определения нейтральной линии, т. е. горизонтальной оси калибра, относительно которой моменты сил, приложенных к профилю со стороны верхнего и нижнего валков, равны. При правильном определении нейтральной линии калибра скорость выхода из валков нижнего контура полосы, соприкасающегося с нижним валком, должна быть равна скорости выхода из валков верхнего контура полосы, соприкасающегося с верхним валком.

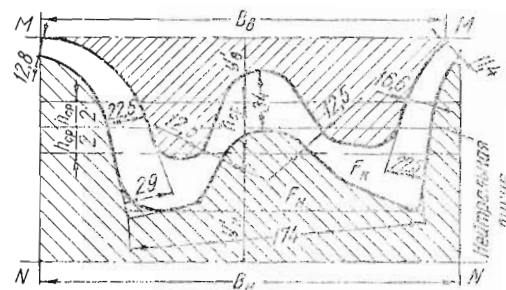


Рис. 34. Определение нейтральной линии калибра профиля СП-63

ком. Если считать, что силы трения в каждой точке верхнего контура полосы распределены равномерно и равны силам трения нижнего контура полосы, то моменты сил, приложенных к профилю со стороны верхнего и нижнего валков, а значит, и скорости выхода из валков нижнего и верхнего контура полосы будут равны в случае равенства средних катающих диаметров нижнего и верхнего валков. Таким образом, задача сводится к определению средней ординаты верхнего и нижнего контура калибра (рис. 34), которая равна соответствующей площади F_v и F_n , ограниченной контуром и отнесенной к ширине B_v и B_n :

$$y'_v = \frac{F_v}{B_v}; \quad y'_n = \frac{F_n}{B_n}, \quad (15)$$

Нейтральная линия калибра находится на равном расстоянии от точек, соответствующих средним рабочим диаметрам нижнего и верхнего контуров полосы. Расстояние

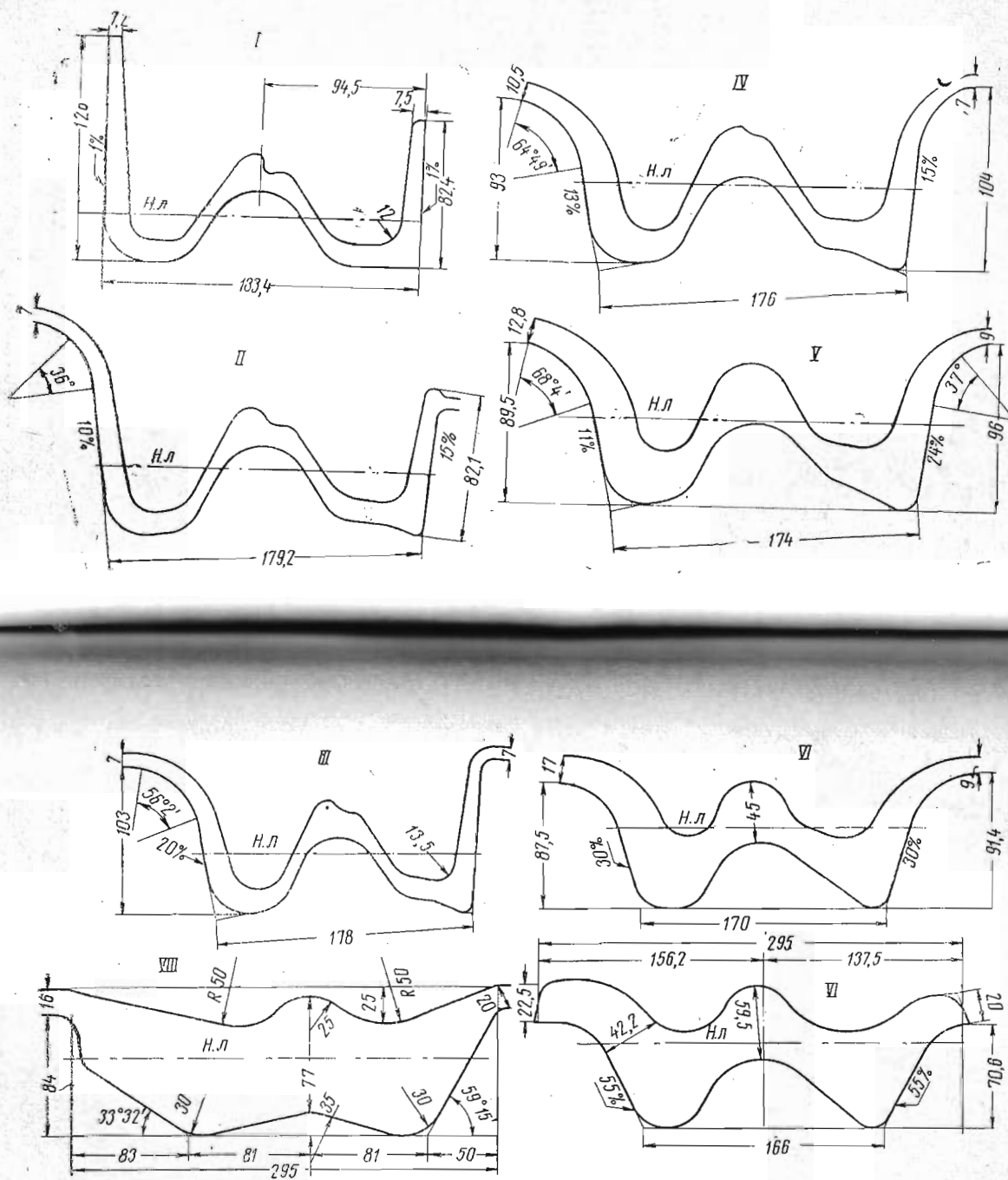


Рис. 35. Шаблоны калибров профиля СП-63 по развернутой калибровке способом постепенного сгибания полок (Н. л — нейтральная линия)

между точками, соответствующими средним рабочим диаметрам, можно принять равным средней толщине полосы

$$h_{\text{ср}} = \frac{F_{\text{к}}}{B_{\text{ср}}},$$

где

$$B_{\text{ср}} = \frac{B_{\text{в}} + B_{\text{н}}}{2}, \quad (16)$$

Расстояние от любой линии, параллельной оси валков, до нейтральной линии калибра равно средней ординате контура калибра плюс половина средней толщины полосы. Со стороны верхнего вала это расстояние равно

$$y_{\text{в}} = y'_{\text{в}} + 0,5h_{\text{ср}} = \frac{F_{\text{в}}}{B_{\text{в}}} + 0,5 \frac{F_{\text{к}}}{B_{\text{ср}}} \quad (17)$$

и соответственно со стороны нижнего вала

$$y_{\text{н}} = y'_{\text{н}} + 0,5h_{\text{ср}} = \frac{F_{\text{н}}}{B_{\text{н}}} + 0,5 \frac{F_{\text{к}}}{B_{\text{ср}}}. \quad (17a)$$

Площади $F_{\text{в}}$, $F_{\text{н}}$ и $F_{\text{к}}$ для любой формы калибра могут быть подсчитаны аналитически. Обычно при расчетах калибровок и определении нейтральных линий калибров пользуются планиметром. По данному способу расчеты занимают несколько минут. Этот способ определения нейтральной линии калибра практически проверен на десятках различных профилей, он сравнительно прост и имеет достаточное обоснование [33].

Имея исходные данные, отражающие особенности калибровки такого сложного несимметричного профиля, как боковина решетки шахтного конвейера, легко рассчитать и саму калибровку данного профиля.

Расчет развернутой калибровки боковины шахтного конвейера способом постепенного сгибания полок

Характеристика профиля приведена на рис. 4. Калибровку рассчитывают применительно к крупносортному стану 650 завода «Азовсталь» и, начиная от чистового калибра, расчет ведут против хода прокатки (рис. 35).

Определение размеров I (чистового) калибра

Ширина готового профиля с учетом минусового допуска и температурного расширения будет

$$B_1 = (B - \Delta_B) \alpha_t = (183 - 2) 1,013 = 183,4 \text{ мм},$$

толщина прямых участков стенки

$$d_{\text{п1}} = (d_{\text{п}} - \Delta_{d_{\text{п}}}) \alpha_t = (13 - 0,7) \cdot 1,013 = 12,5 \text{ мм};$$

толщина наклонных участков стенки

$$d_{\text{н1}} = (d_{\text{н}} - \Delta_{d_{\text{н}}}) \alpha_t = (8 - 0,7) 1,013 = 7,4 \text{ мм};$$

толщина зуба стенки

$$d_{\text{з1}} = (d_{\text{з}} - \Delta_{d_{\text{з}}}) \alpha_t = (20 - 0,7) 1,013 = 19,5 \text{ мм};$$

высота зуба стенки от основания профиля

$$h_{\text{з1}} = (h_{\text{з}} - 0,5\Delta_{h_{\text{з}}}) \alpha_t = (61 - 0,5 \cdot 1,5) 1,013 = 61 \text{ мм};$$

высота малой полки по шаблону

$$h'_{\text{м.ш}} = (h_{\text{м}} + \Delta_{h_{\text{м}}} - \Delta_{d_{\text{п}}}) \alpha_t = (78 + 4 - 0,7) 1,013 = 82,4 \text{ мм};$$

высота большой полки по шаблону

$$h'_{\text{б.ш}} = (h_{\text{б}} - \Delta_{h_{\text{б}}} - \Delta_{d_{\text{п}}}) \alpha_t = (120 + 5 - 0,7) 1,013 = 126 \text{ мм};$$

высота малой полки до оси прямых участков стенки

$$h_{\text{м.ш}} = h'_{\text{б.ш}} - 0,5d_{\text{п1}} = 82,4 - 0,5 \cdot 12,5 = 76,15 \text{ мм};$$

высота большой полки до оси прямых участков стенки

$$b_{\text{м1}} = h'_{\text{б.ш}} - 0,5d_{\text{п1}} = 126 - 0,5 \cdot 12,5 = 119,75 \text{ мм};$$

толщина малой полки у основания

$$b_{\text{м1}} = (b_{\text{м}} - \Delta_{t_{\text{м}}}) \alpha_t = (14,15 - 0,7) 1,013 = 13,6 \text{ мм},$$

где $b_{\text{м}}$ — толщина малой полки у основания,

$$b_{\text{м}} = t_{\text{м}} + (h_{\text{м}} - h_{\text{т}}^{\text{м}} - 0,5d_{\text{п}}) \text{tg} \alpha = \\ = 11 + (78 - 32 - 0,5 \cdot 13) 0,08 = 14,15 \text{ мм};$$

толщина малой полки на конце по шаблону

$$a_{\text{м.ш}} = b_{\text{м1}} - h_{\text{м.ш}} \text{tg} \alpha = 13,6 - 76,15 \cdot 0,08 = 7,5 \text{ мм},$$

толщина большой полки у основания

$$b_{\text{б1}} = (b_{\text{б}} - \Delta_{t_{\text{б}}}) \alpha_t = (17,3 - 0,7) 1,013 = 16,8 \text{ мм},$$

где $b_{\text{б}}$ — толщина большой полки у основания,

$$b_{\text{б}} = t_{\text{б}} + (h_{\text{б}} - h_{\text{т}}^{\text{б}} - 0,5d_{\text{п}}) \text{tg} \alpha = \\ = 11 + (120 - 35 - 0,5 \cdot 13) 0,08 = 17,3 \text{ мм};$$

толщина большой полки на конце по шаблону

$$a_{\text{б.ш}} = b_{\text{б1}} - h_{\text{б.ш}} \text{tg} \alpha = 16,8 - 119,75 \cdot 0,08 = 7,2 \text{ мм}.$$

Заполнение металлом принимаем по номинальным размерам полок, т. е. без учета плюсовых допусков.

Расчетная высота малой полки по заполнению

$$h_{m1} = h_{m.ш} - \Delta h_m = 76,15 - 4 = 72,15 \text{ мм},$$

расчетная высота большой полки по заполнению

$$h_{b1} = h_{b.ш} - \Delta h_b = 119,75 - 5 = 114,75 \text{ мм},$$

толщина малой полки на конце по заполнению

$$a_{m1} = a_{m.ш} + \Delta h_m \operatorname{tg} \alpha = 7,5 + 4 \cdot 0,08 = 7,8 \text{ мм},$$

толщина большой полки на конце по заполнению

$$a_{b1} = a_{b.ш} + \Delta h_b \operatorname{tg} \alpha = 7,2 + 5 \cdot 0,08 = 7,6 \text{ мм},$$

расчетная площадь малой полки

$$F_{m1} = \frac{a_{m1} + b_{m1}}{2} h_{m1} = \frac{7,8 + 13,6}{2} 72,15 = 772 \text{ мм}^2,$$

расчетная площадь большой полки

$$F_{b1} = \frac{a_{b1} + b_{b1}}{2} h_{b1} = \frac{7,6 + 16,8}{2} 114,75 = 1400 \text{ мм}^2.$$

Определение размеров II (предчистового) калибра

Для надежного контроля высоты полок предчистовой калибр выполняют обычно полузакрытым (контрольным). Обжатие высоты полки в полузакрытом калибре чаще всего равно 3—4 мм и в отдельных случаях может быть увеличено до 5—6 мм. В нашем случае обжатие высоты малой полки в полузакрытом калибре принимаем 6 мм. Большая полка имеет допуск по высоте $\Delta h_b = \pm 5 \text{ мм}$. Это создает условия, позволяющие при соответствующей настройке получить высоту большой полки в пределах допусков без применения контрольного калибра.

Большая разность в вертикальных проекциях полок создает значительные осевые усилия, приводящие к быстрому износу боковых текстолитовых подшипников и нарушению в настройке стана.

Для уменьшения осевых усилий и глубины вреза в валки в предчистовом калибре предусматривается отворот большой полки. Величину отворота выбирают по условиям захвата в чистовом калибре. Оптимальную величину выпуска наружных граней предчистового калибра определяют, исходя из возможности работы на чистовой клети без применения сложной вводной арматуры.

По условиям захвата в чистовом калибре выпуск наружной грани большой полки предчистового калибра $i_{b2}^k = 10\%$, $\gamma_{b2} = 5^\circ 43'$; выпуск наружной грани малой полки $i_{m2}^k = 15\%$; $\gamma_{m2} = 8^\circ 31'$. Во всех калибрах угол между прямыми участками стенки и полкой сохраняется постоянным. Изгиб стенки происходит за счет кривого участка.

Задаемся обжатием прямого участка стенки в чистовом калибре $\Delta d_{n1} = 0,5 \text{ мм}$ и уширением $\Delta B_1 = 2,2 \text{ мм}$. Тогда

$$B_2 = B_1 - \Delta B_1 = 183,4 - 2,2 = 181,2 \text{ мм},$$

горизонтальная проекция стенки

$$B_{r2} = B_2 \cos \gamma_2 = 181,2 \cdot 0,989 = 179,2 \text{ мм},$$

толщина прямых участков стенки

$$d_{n2} = d_{n1} + \Delta d_{n1} = 12,5 + 0,5 = 13,0 \text{ мм},$$

коэффициент обжатия толщины прямых участков стенки в чистовом калибре

$$\lambda_1 = \frac{d_{n2}}{d_{n1}} = \frac{13,0}{12,5} = 1,04,$$

толщина наклонных участков стенки

$$d_{n2} = d_{n1} \lambda_1 = 7,4 \cdot 1,04 = 7,7 \text{ мм},$$

толщина зуба стенки

$$d_{z2} = d_{z1} \lambda_1 = 19,5 \cdot 1,04 = 20,3 \text{ мм}.$$

Для лучшего заполнения толщину зуба примем $d_{z2} = 21,0 \text{ мм}$. Коэффициент вытяжки полок μ_1 в чистовом калибре примем равным коэффициенту обжатия стенки λ_1 , т. е. $\mu_1 = \lambda_1 = 1,04$. Площадь малой полки

$$F_{m2} = F_{m1} \mu_1 = 772 \cdot 1,04 = 803 \text{ мм}^2.$$

Приращение высоты полок в чистовом калибре примем $\Delta h_{m1} = \Delta h_{b1} = 0,55 \text{ мм}$. Тогда высота малой полки во II калибре будет

$$h_{m2} = h_{m1} - \Delta h_{m1} = 72,15 - 0,55 = 71,6 \text{ мм}.$$

Толщина малой полки на конце

$$a_{m2} = a_{m1} \lambda_1 = 7,8 \cdot 1,04 = 8,1 \text{ мм},$$

толщина малой полки у основания

$$b_{m2} = \frac{2F_{m2}}{h_{m2}} a_{m2} = \frac{2 \cdot 803}{71,6} \cdot 8,1 = 14,3 \text{ мм}.$$

Остальные размеры малой полки выбирают конструктивно: зазор у разъема калибра $l = 5$ мм, высота полки выше зазора $p = 4$ мм, высота полки ниже зазора (до прямого участка) $s = 7$ мм; сумма всех трех участков $f_2 = p + l + s = 4 + 5 + 7 = 16$ мм. Остальная часть высоты малой полки $u_2 = h_{m2} - f_2 = 71,6 - 16 = 55,6$ мм. Толщина малой полки по разъему контрольного калибра

$$t_{m2} = a_{m2} + \frac{b_{m2} - a_{m2}}{h_{m2}} f_2 = 8,1 + \frac{14,3 - 8,1}{71,6} 16 = 9,5 \text{ мм.}$$

Для лучшего заполнения угла малой полки и сохранения в нем высокой температуры во всех калибрах, начиная с предчистового, предусматриваем ложные фланцы. Ложный фланец предчистового калибра (см. рис. 35) выполнен в форме треугольника (высота $c_2 = 4$ мм, ширина $m_2 = 22$ мм). Внешний угол стыка большой полки со стенкой выполнен большим радиусом $R = 24$ мм, поэтому здесь ложных фланцев не нужно.

Наличие ложных фланцев у малой полки приподнимает ее над рольгангом. Для лучшего захвата полосы калибром профиль в валках расположен так же, как на рольганге, т. е. постепенно его наклоняют на большую полку. Это уменьшает вертикальную проекцию большой полки и увеличивает проекцию малой полки, чем уменьшаются осевые усилия. В черновых калибрах, где большие обжаты и разница в вертикальных проекциях полок еще более нежелательна, они для малой и большой полки равны, а значит, осевые усилия сведены к нулю. Наличие ложного фланца у малой полки создало наклон профиля в валках, равный $\Delta i_2 = 5\%$. Тогда выпуск большой полки в валках будет равен

$$i_{62}^B = i_{62}^K + \Delta i_2 = 10 + 5 = 15\%,$$

выпуск малой полки в валках

$$i_{m2}^B = i_{m2}^K - \Delta i_2 = 15 - 5 = 10\%;$$

площадь большой полки

$$F_{62} = F_{61} \mu_1 = 1400 \cdot 1,040 = 1456 \text{ мм}^2.$$

толщина большой полки на конце

$$a_{62} = a_{61} \lambda_1 = 7,6 \cdot 1,04 = 7,9 \text{ мм,}$$

высота большой полки

$$h_{62} = h_{61} - \Delta h_{61} = 114,75 - 0,55 = 114,2 \text{ мм,}$$

толщина большой полки у основания

$$b_{62} = \frac{2F_{62}}{h_{62}} - a_6 = \frac{2 \cdot 1456}{114,2} - 7,9 = 17,6 \text{ мм.}$$

Длина прямого участка большой полки $k_{62} = 79,6$ мм; тогда длина кривого участка большой полки

$$h_{62}^\sim = h_{62} - k_{62} = 114,2 - 79,5 = 34,7 \text{ мм.}$$

Толщина большой полки на конце прямого участка (в месте перехода от прямого участка к кривому)

$$l_{62} = a_{62} + \frac{b_{62} - a_{62}}{h_{62}} h_{62}^\sim = 7,9 + \frac{17,6 - 7,9}{114,2} 34,7 = 10,9 \text{ мм.}$$

В целях надежности захвата задаваемой полосы конструируется плавный переход конца большой полки в зазор между валками.

Принимаем радиус отворота большой полки по наружной грани $R_{62} = 50$ мм. Тогда радиус отворота по средней линии большой полки

$$R_{62}^{cp} = R_{62} + 0,5a_{62} = 50 + 0,5 \cdot 7,9 = 53,95 \text{ мм.}$$

Радиус отворота большой полки по внутренней грани $R'_{62} = R_{62} + 0,5(a_{62} + t_{62}) = 50 + 0,5(7,9 + 10,9) = 59,4$ мм.

Принимаем

$$R'_{62} = 60 \text{ мм.}$$

Угол отворота криволинейного участка большой полки

$$\beta_{62} = \frac{h_{62}^\sim 180^\circ}{\pi R_{62}^{cp}} = \frac{34,7 \cdot 57,3}{53,95} = 36^\circ 51'.$$

Остальные размеры рассчитывают путем геометрических построений либо выбирают конструктивно.

Определение размеров III калибра

Задаемся обжатием прямого участка стенки во II калибре $\Delta d_{n2} = 1,7$ мм. В профиле боковины решетки шахтного конвейера стенка подогнута и имеет значительное утолщение в средней части.

Такая конфигурация стенки не может вызвать больших давлений на бурты даже при ограничении уширения.

Исходя из этого, во II калибре, как и у всех последующих, уширение принимают по горизонтальной проекции стенки.

Уширение горизонтальной проекции стенки во II калибре принимают равным $\Delta B_{r2} = 1,2$ мм. Тогда

$$B_{r3} = B_{r2} - \Delta B_{r2} = 179,2 - 1,2 = 178 \text{ мм},$$

толщина прямых участков стенки

$$d_{п3} = d_{п2} + \Delta d_{п2} = 13 + 1,7 = 14,7 \text{ мм},$$

коэффициент обжатия толщины прямых участков стенки

$$\lambda_2 = \frac{d_{п3}}{d_{п2}} = \frac{14,7}{13} = 1,13,$$

толщина наклонных участков стенки

$$d_{н3} = d_{н2} \lambda_2 = 7,7 \cdot 1,13 = 8,7 \text{ мм},$$

толщина зуба стенки

$$d_{з3} = d_{з2} \lambda_2 = 21 \cdot 1,13 = 23,8 \text{ мм}.$$

Принимаем $d_{з3} = 24$ мм. Площадь малой полки при $\mu_2 = \lambda_2 = 1,13$ будет

$$F_{м3} = F_{м2} \mu_2 = 808 \cdot 1,13 = 907 \text{ мм}^2.$$

Принимаем обжатие высоты малой полки в контрольном калибре $\Delta h_{м2} = 6$ мм. Тогда $f_3 = f_2 + \Delta h_{м2} = 16 + 6 = 22$ мм; приращение высоты большой полки, как и ранее, $\Delta h_{б2} = 0,55$ мм. Толщина конца малой полки III калибра принимается, как и для швеллера, меньше на $\Delta a_{м2} = 0,2$ мм, тогда $a_{м3} = a_{м2} - \Delta a_{м2} = 7,9$ мм, а

$$t_{м3} = t_{м2} + 0,1 = 9,5 + 0,1 = 9,6 \text{ мм},$$

площадь крайней части малой полки

$$F_{м.кз} = \frac{t_{м3} + a_{м3}}{2} f_3 = \frac{9,6 + 7,9}{2} 22 = 192 \text{ мм}^2,$$

площадь основания малой полки

$$F_{м.оз} = F_{м3} - F_{м.кз} = 907 - 192 = 715 \text{ мм}^2,$$

толщина малой полки у основания (при $u_2 = u_3$)

$$b_{м3} = \frac{2F_{м.оз}}{u_3} - t_{м3} = \frac{2 \cdot 715}{55,6} - 9,6 = 16,1 \text{ мм},$$

высота малой полки

$$h_{м3} = u_3 + f_3 = 55,6 + 22 = 77,6 \text{ мм},$$

размеры ложных фланцев малой полки III калибра:

$$n_3 = c_3 = 6 \text{ мм}; \quad m_3 = 26 \text{ мм}.$$

Для предотвращения захвата полосы на бурт контрольного калибра выпуск наружных граней полок III калибра выполняют несколько меньшим, чем у II калибра, а именно $i_{м3}^k = i_{б3}^k = 14\%$. Изменение наклона профиля в валках за счет ложного фланца малой полки принимаем равным 6%. Тогда выпуск малой полки в валках

$$i_{м3}^b = i_{м3}^k - \Delta i_3 = 14 - 6 = 8\%,$$

выпуск большой полки в валках

$$i_{б3}^b = i_{б3}^k + \Delta i_3 = 14 + 6 = 20\%,$$

площадь большой полки

$$F_{б3} = F_{б2} \mu_2 = 1456 \cdot 1,13 = 1645 \text{ мм}^2,$$

толщина большой полки на конце

$$a_{б3} = a_{б2} \lambda_2 = 7,9 \cdot 1,13 = 9,0 \text{ мм},$$

высота большой полки

$$h_{б3} = h_{б2} - \Delta h_{б2} = 114,2 - 0,55 = 113,65 \text{ мм},$$

толщина большой полки у основания

$$b_{б3} = \frac{2F_{б3}}{h_{б3}} - a_{б3} = \frac{2 \cdot 1645}{113,65} - 9 = 20 \text{ мм}.$$

Принимаем длину прямого участка большой полки $h_{б3} = 60,35$ мм, длину кривого участка

$$h_{б3}^{\sim} = h_{б3} - k_{б3} = 113,65 - 60,35 = 53,3 \text{ мм},$$

толщина большой полки на конце прямого участка (в месте перехода от прямого участка к кривому)

$$t_{б3} = a_{б3} + \frac{b_{б3} - a_{б3}}{h_{б3}} h_{б3}^{\sim} = 9 + \frac{20 - 9}{113,65} 53,3 = 14,2 \text{ мм}.$$

Радиус отворота большой полки по наружной грани сохраняется прежним: $R_{б2} = R_{б3} = 50$ мм. Тогда радиус отворота по средней линии большой полки

$$R_{б3}^{cp} = R_{б3} - 0,5a_{б3} = 50 + 0,5 \cdot 9 = 54,5 \text{ мм},$$

радиус отворота большой полки по внутренней грани

$$R'_{63} = R_{63} + 0,5(a_{63} + t_{63}) = 50 + 0,5(9 + 14,2) = 61,6 \text{ мм.}$$

Принимаем $R'_{63} = 62 \text{ мм.}$

Угол отворота криволинейного участка большой полки

$$\beta_{63} = \frac{h_{63}^{\sim} 180^{\circ}}{\pi R_{63}^{\text{cp}}} = \frac{53,3 \cdot 57,3^{\circ}}{54,5} = 56^{\circ} 2'.$$

Остальные размеры рассчитывают путем геометрических построений либо выбирают конструктивно.

Определение размеров IV калибра

Принимаем обжатие прямого участка стенки в III калибре $\Delta d_{п3} = 2,5 \text{ мм.}$ Тогда

$$d_{п4} = d_{п3} + \Delta d_{п3} = 14,7 + 2,5 = 17,2 \text{ мм.}$$

Уширение горизонтальной проекции стенки принимаем $\Delta B_{г3} = 2 \text{ мм,}$ тогда

$$B_{г4} = B_{г3} - \Delta B_{г3} = 178 - 2 = 176 \text{ мм.}$$

Коэффициент обжатия толщины прямых участков стенки

$$\lambda_3 = \frac{d_{п4}}{d_{п3}} = \frac{17,2}{14,7} = 1,17,$$

толщина наклонных участков стенки

$$d_{н4} = d_{н3} \lambda_3 = 8,7 \cdot 1,17 = 10,2 \text{ мм,}$$

толщина зуба стенки

$$d_{з4} = d_{з3} \lambda_3 = 24 \cdot 1,17 = 28,0 \text{ мм,}$$

площадь малой полки при $\mu_3 = \lambda_3 = 1,17$

$$F_{м4} = F_{м3} \mu_3 = 907 \cdot 1,17 = 1061 \text{ мм}^2,$$

толщина малой полки на конце

$$a_{м4} = a_{м3} \lambda_3 = 7,9 \cdot 1,17 = 9,3 \text{ мм.}$$

Приращение малой и большой полки в III калибре принимаем $\Delta h_{м3} = \Delta h_{б3} = 0,55 \text{ мм.}$ Тогда высота малой полки

$$h_{м4} = h_{м3} - \Delta h_{м3} = 77,6 - 0,55 = 77,05 \text{ мм,}$$

толщина малой полки у основания

$$b_{м4} = \frac{2F_{м4}}{h_{м4}} - a_{м4} = \frac{2 \cdot 1061}{77,05} - 9,3 = 18,2 \text{ мм.}$$

Принимаем длину прямого участка малой полки $h_{м4} = 50,6 \text{ мм,}$ тогда длина кривого участка малой полки

$$h_{м4}^{\sim} = h_{м4} - k_{м4} = 77,05 - 50,6 = 26,45 \text{ мм,}$$

толщина малой полки в месте перехода от прямого участка к кривому

$$l_{м4} = a_{м4} + \frac{b_{м4} - a_{м4}}{h_{м4}} h_{м4}^{\sim} = 9,3 + \frac{18,2 - 9,3}{77,05} 26,45 = 12,4 \text{ мм.}$$

Радиус отворота малой полки по наружной грани принимаем таким же, как и для большой полки III калибра

$$R_{63} = R_{64} = R_{м4} = 50 \text{ мм,}$$

радиус отворота по средней линии малой полки

$$R_{м4}^{\text{cp}} = R_{м4} + 0,5a_{м4} = 50 + 0,5 \cdot 9,3 = 54,65 \text{ мм,}$$

радиус отворота малой полки по внутренней грани

$$R'_{м4} = R_{м4} + 0,5(a_{м4} + t_{м4}) = 50 + 0,5(9,3 + 12,4) = 60,85 \approx 61 \text{ мм,}$$

угол отворота криволинейного участка малой полки

$$\beta_{м4} = \frac{h_{м4}^{\sim} 180^{\circ}}{\pi R_{м4}^{\text{cp}}} = \frac{26,45 \cdot 57,3^{\circ}}{54,65} = 27,73 = 27^{\circ} 44'.$$

Размеры ложных фланцев малой полки IV калибра принимаем: $n_4 = c_4 = 8 \text{ мм;}$ $m_4 = 32 \text{ мм.}$ Выпуск наружной грани малой полки $i_{м4}^{\text{к}} = 15\%.$

Изменение наклона профиля в валках за счет ложного фланца малой полки будет $\Delta i_4 = 7\%.$ Тогда выпуск малой полки в валках

$$i_{м4}^{\text{в}} = i_{м4}^{\text{к}} - \Delta i_4 = 15 - 7 = 8\%,$$

площадь большой полки

$$F_{б4} = F_{б3} \mu_3 = 1645 \cdot 1,17 = 1925 \text{ мм}^2,$$

толщина большой полки на конце

$$a_{б4} = a_{б3} \lambda_3 = 9,0 \cdot 1,17 = 10,5 \text{ мм,}$$

высота большой полки

$$h_{64} = h_{63} - \Delta h_{63} = 113,65 - 0,55 = 113,1 \text{ мм},$$

толщина большой полки у основания

$$b_{64} = \frac{2F_{64}}{h_{64}} - a_{64} = \frac{2 \cdot 1925}{113,1} - 10,5 = 23,5 \text{ мм}.$$

Принимаем длину прямого участка большой полки $k_{64} = 50,6 \text{ мм}$. Тогда длина кривого участка большой полки

$$h_{64}^{\vee} = h_{64} - k_{64} = 113,1 - 50,6 = 62,5 \text{ мм},$$

толщина большой полки в месте перехода от прямого участка к кривому

$$t_{64} = a_{64} + \frac{b_{64} - a_{64}}{h_{64}} h_{64}^{\vee} = 10,5 + \frac{23,5 - 10,5}{113,1} 62,5 = 17,7 \text{ мм}.$$

Радиус отворота большой полки по средней линии

$$R_{64}^{cp} = R_{64} + 0,5a_{64} = 50 + 0,5 \cdot 10,5 = 55,25 \text{ мм},$$

радиус отворота большой полки по внутренней грани

$$R'_{64} = R_{64} + 0,5(a_{64} + t_{64}) = 50 + 0,5(10,5 + 17,7) = 64,1 = 64 \text{ мм},$$

угол отворота криволинейного участка большой полки

$$\beta_{64} = \frac{h_{64}^{\vee} 180^{\circ}}{\pi R_{64}^{cp}} = \frac{62,5 \cdot 57,3^{\circ}}{55,25} = 64^{\circ} 49'.$$

Выпуск наружной грани большой полки принимаем $i_{64}^k = 13\%$. Тогда выпуск большой полки в валках

$$i_{64}^b = i_{64}^k + \Delta i_4 = 13 + 7 = 20\%.$$

Остальные размеры калибров данного профиля рассчитывают путем геометрических построений либо выбирают конструктивно.

Размеры последующих калибров рассчитывают аналогично. При этом большая полка VII калибра выполнена полностью развернутой (см. рис. 35, правый нижний). Данные расчета представлены в табл. 2,

Расчетные размеры калибров профиля СП-63

	Номер калибра						
	I	II	III	IV	V	VI	VII
Обжатие прямых участков Δd , мм	0,5	1,7	2,5	3,8	7,0	9,0	—
Толщина » d_n , мм	12,5	13,0	14,7	17,2	21,0	28,0	38,0
Уширение ΔB_r , мм	2,2	1,2	2,0	2,0	4,0	4,0	4,0
Ширина B_r , мм	183,4	179,2	178,0	176,0	174,0	170,0	166,0
Коэффициент обжатия прямых участков λ	1,04	1,13	1,17	1,22	1,33	1,37	—
Толщина наклонного участка d_n , мм	7,4	7,7	8,7	10,2	12,5	16,7	22,0
Толщина зуба d_3 , мм	19,5	21,0	24,0	28,0	34,0	45,0	59,5
Вытяжка μ	1,04	1,13	1,17	1,22	1,33	1,32	—
Площадь F_m , мм ²	772	803	907	1061	1295	1727	2283
Толщина на конце a_m , мм	7,8	8,1	7,9	9,3	11,4	15,2	20,0
Приращение высоты Δh_m , мм	0,55	—	0,55	0,60	1,00	1,50	—
Высота h_m , мм	72,15	71,60	77,60	77,05	76,45	75,45	73,95
Толщина у основания b_m , мм	13,6	14,3	16,1	18,2	22,5	30,6	41,7
Длина прямого участка k_m , мм	—	—	—	50,6	40,5	34,0	28,5
Толщина на конце прямого участка t_m , мм	—	—	—	12,4	16,6	23,7	33,3
Радиус отворота R_m , мм	—	—	—	50	50	50	40
Угол отворота криволинейного участка β_m	—	—	—	27° 44'	37°	41° 14'	52° 5'
Ширина прямого участка ложного фланца n , мм	—	—	6	8	10	10	—
Высота ложного фланца c , мм	—	—	6	8	10	—	—
Ширина ложного фланца n , мм	—	—	26,0	32,0	48,5	—	—
Выпуск в валках i_m^b , %	1	15	14	15	24	30	55
Выпуск в шаблоне калибра i_m^k	1	10	8	8	15	30	55

	Номер калибра						
	I	II	III	IV	V	VI	VII
Большая полка							
Вытяжка μ	1,04	1,13	1,17	1,22	1,33	1,32	—
Площадь F_6 , мм ²	1400	1456	1645	1925	2350	3135	4144
Толщина на конце a_6 , мм	7,6	7,9	9,0	10,5	12,8	17,0	22,5
Приращение высоты Δh_6 , мм	0,55	0,55	0,55	0,60	1,00	1,50	—
Высота h_6 , мм	114,75	114,20	113,65	113,10	112,50	111,50	110,00
Толщина у основания b_6 , мм	16,8	17,6	20,0	23,5	29,0	39,2	52,8
Длина прямого участка k_6 , мм	—	79,50	60,35	50,60	45,50	40,00	38,50
Толщина на конце прямого участка l_6 , мм	—	10,9	14,2	17,7	22,5	31,2	42,2
Радиус отворота R_6 , мм	—	50	50	50	50	50	20
Угол отворота криволинейного участка β_6	—	36° 51'	56° 2'	64° 49'	68° 4'	70° 2'	61° 11'
Выпуск в шаблоне калибра t_6^k , %	1	10	14	13	11	30	55
Выпуск в валках t_6^B , %	1	15	20	20	20	30	55
Площадь калибра ¹ по планиметру F , мм ²	4350	4700	5500	6550	8050	11050	15200
Коэффициент вытяжки профиля по планиметру μ	1,08	1,17	1,19	1,23	1,37	1,38	1,29

1 в VIII калибре 19600 мм².

Следует обратить внимание на то, что коэффициенты деформации полок и стенки отличаются от вытяжек всего профиля, принятых при рассмотрении основных положений расчета калибровки боковины рештака. Это объясняется тем, что расчетные площади полок и стенки определяли без учета радиусов закруглений, а площадь всего профиля находили по планиметру, следовательно, в ней учтены не только изменения площадей отдельных элементов профиля из-за закруглений, но и ложные фланцы.

Фасонный калибр VIII расположен в обжимной двухвалковой реверсивной клетки 800 (рис. 36). Размеры калибра VIII выбирают конструктивно.

Благодаря использованию калибровки способом постепенного сгибания на обжимной клетки 800 фасонный калибр VIII удалось выполнить с одинаковыми вертикальными проекциями полок. Прямоугольная заготовка в таком калибре хорошо центрируется (см. рис. 19, в), осевых усилий между валками не возникает, полоса выходит из калибра без применения выводной арматуры.

В клетки 800 производится четыре прохода в ящичных калибрах и три в фасонном калибре. Фасонный калибр VIII строят так, чтобы исключить выход металла в разъем седьмого калибра. Обжатие в калибре VII выбираются исходя из условий захвата, мощности привода и допустимой прочности валков.

Калибровка способом постепенного сгибания сложных несимметричных профилей типа боковины рештака шахтного конвейера вследствие отворота полок позволила уменьшить глубину вреза и увеличить прочность валков, а также дала возможность уменьшить исходные диаметры бочек валков обжимной дуо-реверсивной клетки 800, I и II клетей трио 650 чистовой линии.

Так, в проекте калибровки СП-63 с увеличенным выпуском полок (так называемой корытной калибровки) диаметр среднего валка в опасном сечении на II клетей трио 650 равен $D_{ср1} = 468$ мм, а верхнего и нижнего $D_{в1} = D_{н1} = 466$ мм. Исходные же диаметры бочек верхнего и нижнего валков для II клетей $D_{н.в1} = D_{н.н1} = 878$ мм, а среднего $D_{н.ср1} = 880$ мм. По калибровке способом постепенного сгибания (см. рис. 36) диаметр среднего валка в опасном по излому сечении (середина среднего валка II клетей 650) составляет $D_{ср} = 544$ мм, а верхнего и нижнего валков $D_{в} = D_{н} = 506$ мм. Исходные диаметры бочек

верхнего и нижнего валков II клетки $D_{и.в} = D_{и.н} = 810$ мм, а среднего $D_{и.ср} = 840$ мм. Увеличение прочности валков II клетки трио 650 при калибровке способом постепенного сгибания по сравнению с калибровкой с увеличенным выпуском полок пропорционально отношению диаметров и кубе в опасном сечении:

$$\frac{D_{ср}^3}{D_{ср1}^3} = \frac{544^3}{468^3} = 1,57 \text{ раза};$$

для верхних и нижних валков

$$\frac{D_{в}^3}{D_{в1}^3} = \frac{D_{н}^3}{D_{н1}^3} = \frac{506^3}{466^3} = 1,28 \text{ раза}.$$

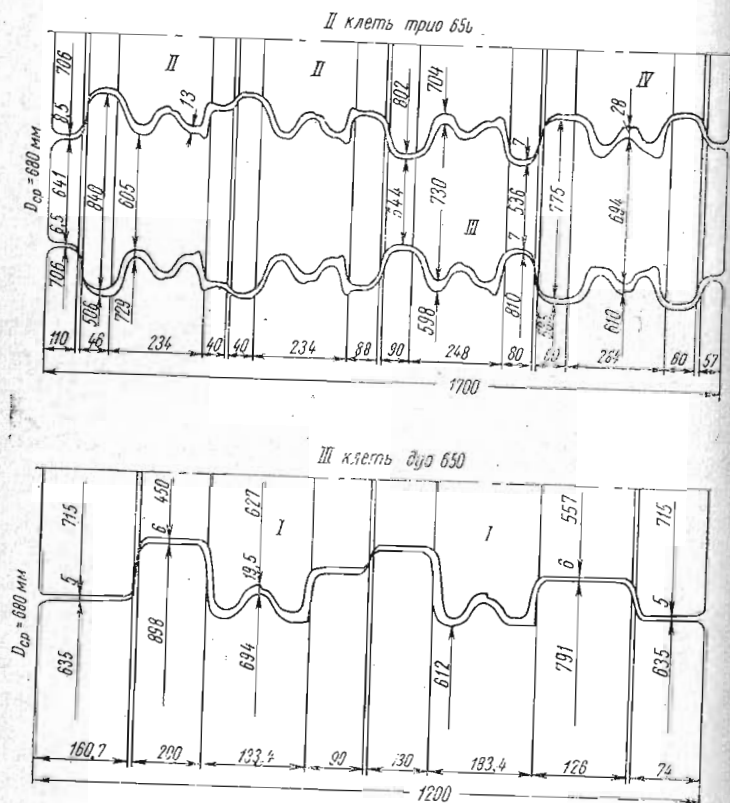


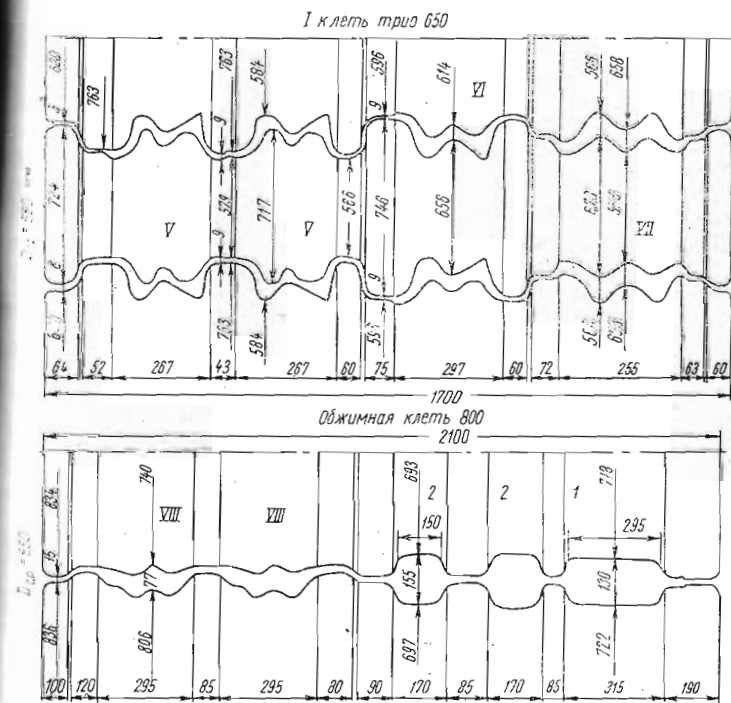
Рис. 36. Монтаж калибров на валках обжимной клетки 800

Следовательно, прочность валков II клетки трио 650 по калибровке способом постепенного сгибания соответственно больше в 1,57 и в 1,28 раза, чем в случае применения калибровки с увеличенным выпуском полок (корытной калибровки).

Среднее уменьшение массы исходных бочек валков II клетки трио 650 по калибровке способом постепенного сгибания составит

$$\frac{D_{и.ср1}^2 + D_{и.в1}^2 + D_{и.н1}^2}{D_{и.ср}^2 + D_{и.в}^2 + D_{и.н}^2} = \frac{830^2 + 878^2 + 878^2}{840^2 + 810^2 + 810^2} = 1,14.$$

Из этого следует, что расход валков II клетки только по счет уменьшения исходных диаметров бочек уменьшится примерно на 14%.



«рупносортового стана для прокатки профиля СП-63

На I клетки трио 650 увеличение прочности валков в применении калибровки способом постепенного сгибания составит:

для средних валков

$$\frac{D_{\text{ср}}^3}{D_{\text{ср1}}^3} = \frac{566^3}{471^3} = 1,73,$$

для верхних и нижних валков

$$\frac{D_{\text{в}}^3}{D_{\text{в1}}^3} = \frac{D_{\text{н}}^3}{D_{\text{н1}}^3} = \frac{566^3}{459^3} = 1,87.$$

Среднее уменьшение расхода валков I клетки трио 650 в результате уменьшения исходных диаметров бочек в этом случае будет

$$\frac{D_{\text{и.ср1}}^2 + D_{\text{и.в1}}^2 + D_{\text{и.н1}}^2}{D_{\text{и.ср}}^2 + D_{\text{и.в}}^2 + D_{\text{и.н}}^2} = \frac{883^2 + 871^2 + 871^2}{759^2 + 776^2 + 776^2} = 1,29,$$

т. е. примерно на 29%.

На обжимной клетки дуо 800 прочность валков в опасном сечении соответственно увеличивается

$$\frac{D^3}{D_1^3} = \frac{693^3}{590^3} = 1,62.$$

На обжимной клетки заготовка для верхнего валка не изменяется, а масса исходной бочки нижнего валка уменьшается примерно в

$$\frac{D_{\text{и.н1}}^2}{D_{\text{и.н}}^2} = \frac{1080^2}{938^2} = 1,326 \text{ раза,}$$

т. е. более чем на 32%.

3. СКОРОСТНЫЕ УСЛОВИЯ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛ ТРЕНИЯ В КАЛИБРАХ ПО РАЗВЕРНУТОЙ КАЛИБРОВКЕ СПОСОБОМ ПОСТЕПЕННОГО СГИБАНИЯ ПОЛОК

Скоростные условия в развернутых и переходных швеллерных калибрах

Скольжение металла по периметру швеллерных калибров, характеризующее скоростные условия в них, зависит от коэффициента трения и точности определения опережения полосы. Экспериментальное определение скольжения металла в прямополочных швеллерных калибрах в свое время было выполнено А. П. Чекмаревым и Р. А. Маш-

ковцевым [10], а в прямополочных и развернутых — И. Я. Павловским и др. [34].

При расчете калибровки для предварительного анализа важно определить скольжение металла по периметру калибра. Для примера определим по предлагаемой ниже методике скольжение по периметру развернутого и переходного швеллерных калибров при прокатке швеллера № 30 по способу постепенного сгибания полок. При этом по условиям скольжения металла в развернутых калибрах VII и VI можно судить о качественной картине скольжения в предыдущих развернутых калибрах, а по первому переходному калибру V — в последующих переходных калибрах.

Для определения скольжения находим опережение по формуле Финка:

$$S_h = \frac{[D(1 - \cos \gamma) + \frac{1}{2} D \sin \gamma]}{h} - 1. \quad (18)$$

При вычислении опережения необходимо знать критический угол γ , который, согласно последним исследованиям И. М. Павлова [35] и его учеников, находят по форму-

$$\gamma = C_1 \frac{\alpha}{2} \left(1 - C_2 C_3 \frac{\alpha}{2\beta} \right), \quad (19)$$

где β — угол трения;

C_1, C_2, C_3 — коэффициенты, учитывающие влияние на угол γ уширения, неравномерности распределения давления и сил трения в очаге деформации.

Однако ввиду отсутствия экспериментальных данных, позволяющих найти значения коэффициентов C_1, C_2 и C_3 для случая прокатки в калибрах фасонных профилей, для расчета значений угла γ использовали предложенную И. М. Павловым еще в 1932 г. зависимость между характеристическими углами [36],

$$\gamma = \frac{\alpha}{2} \left(1 - \frac{\alpha}{2\beta} \right). \quad (19a)$$

Для определения критического угла γ нужно знать угол трения β и угол захвата α . Угол трения при установленном процессе находим по среднему значению коэффициента внешнего трения f , а угол захвата — по среднему (приведенному) обжатия за проход.

Швеллер № 30 прокатывали из стали МСт. 3 на рельсо-балочном стане 850 завода «Азовсталь». Калибры VII — V расположены на валках I клетки трио 850 чистовой линии стана. Средний диаметр валков в указанной клетке $D_{\text{ср}} = 838$ мм; валки стальные. Твердость поверхности валков 35 единиц по Шору. Средняя окружная скорость валков $v_{\text{в}} = 4$ м/сек. Температура прокатываемого металла в VII калибре 1070 °С, в VI 1050 °С и в V 1030 °С.

Исходные данные, необходимые для расчета среднего значения коэффициента трения f , угла трения β , угла захвата α и критического угла γ при прокатке полосы в VII — V калибрах, приведены в табл. 3, при этом значения сред-

Таблица 3

Исходные данные для расчета f , β , α , γ

Номер калибра	Приведенная высота полосы, мм		Среднее обжатие $\Delta h_{\text{ср}}$ мм	Средний рабочий диаметр $D_{\text{р}}$ мм	Вытяжка μ	Средняя скорость скольжения металла относительно валков $v_{\text{ск}}$ м/сек
	до прохода h_{II}	после прохода $h_{\text{п}}$				
VII	53,8	35,6	18,2	802,2	1,473	0,682
VI	35,6	23,6	12,0	814,4	1,518	0,678
V	23,6	18,4	5,2	819,6	1,383	0,377

него обжатия находили по разности приведенных высот полосы до и после прохода [37], а значение среднего рабочего диаметра $D_{\text{р}}$ по формуле

$$D_{\text{р}} = D_{\text{ср}} - h_{\text{п}}. \quad (20)$$

Среднее значение коэффициента трения f_y при установившемся процессе прокатки, учитывающее влияние средней скорости скольжения $v_{\text{ск}}$ металла в очаге деформации, определяли по формуле Т. М. Голубева и М. А. Зайкова [38]

$$f_y = f_0 z_1, \quad (21)$$

где f_0 — условный коэффициент трения, равный $(0,33 - 0,1C) \times (1 - 0,16v_{\text{ск}})$;

z — коэффициент, определяемый из выражения

$$\lg z = \frac{T_{\text{пл}} - t}{Cv_{\text{ск}}} 10^{-5}, \quad (22)$$

где $T_{\text{пл}}$ — температура плавления металла;

t — температура прокатываемого металла;

C — содержание углерода в стали, %.

Средняя скорость скольжения $v_{\text{ск}}$ в очаге деформации показывает интенсивность перемещения поверхности полосы относительно поверхности валков. Эта скорость при-ближенно может быть определена для наших условий по формуле

$$v_{\text{ск}} = \frac{v_{\text{в}} \Delta h_{\text{ср}}}{3h_{\text{п}}} \text{ м/сек.} \quad (23)$$

С учетом влияния материала валков, на которых производится прокатка, и химического состава прокатываемого металла, формулу Т. М. Голубева и М. А. Зайкова для определения коэффициента внешнего трения при установившемся процессе прокатки можно выразить

$$f_y = k'_1 k'_2 f'_y, \quad (24)$$

где k'_1 — коэффициент, учитывающий материал и состояние поверхности валков (для новых стальных валков $k'_1 = 1,1$; для стальных валков с сеткой разгара $k'_1 = 1,1 - 1,2$);

k'_2 — коэффициент, учитывающий влияние химического состава прокатываемой стали на коэффициент трения (для малоуглеродистой стали $k'_2 = 1,0$).

Зная значение коэффициента трения f_y , находим угол трения β_y из выражения $f_y = \text{tg} \beta_y$. Угол захвата α_y определим по известному среднему рабочему диаметру $D_{\text{р}}$, рассчитываемому по формуле (20), и по среднему обжатию $\Delta h_{\text{ср}}$ как разнице между приведенными значениями высоты полосы до и после прохода (см. табл. 3). После этого найдем угол γ по формуле (19а) и опережение S_h по формуле (18).

Далее определим отставание по формуле

$$S_H = \frac{\mu}{1 + S_h} - 1, \quad (25)$$

где μ — вытяжка в данном проходе.

Результаты расчетов коэффициента трения f_y по формуле (24), угла трения β , угла захвата α , критического угла γ по формуле (19а), опережения S_h по формуле (18) и отставания S_H по формуле (25) приведены в табл. 4.

Нейтральную линию калибров определяли методом, описанным в работе [39].

Таблица

Результаты расчетов $f_y, \beta, \alpha, \gamma, S_h, S_H$

Номер калибра	Коэффициент трения f_y	Угол трения β	Угол захвата α	Критический угол γ	Опережение S_h	Отставание S_H
VII	0,330	0,3186	0,2130	0,0709	0,0535 5,35	0,398 39,82
VI	0,341	0,3285	0,1715	0,0633	0,0656 6,56	0,424 42,46
V	0,390	0,3716	0,1129	0,0479	0,0480 4,80	0,319 31,97

Примечание. В числителе — абсолютное значение, в знаменателе — относительное, %.

Зная положение нейтральной линии и величину опережения и отставания полосы в калибре, можно построить эпюры распределения скольжения металла по развернутым VII, VI и переходному V швеллерным калибрам (рис. 37).

Полоса выходит из валков без учета опережения со скоростью, соответствующей среднему рабочему диаметру, определяемому по формуле (20).

Если учесть опережение, то диаметр валков, со скоростью которого полоса выходит из валков, можно определить из выражения

$$D_0 = D_p (1 + S_h). \quad (20)$$

Следовательно, в точке 0 калибра VII, соответствующей $D_0 = 845$ мм, VI калибра — $D_0 = 868$ мм и V калибра — $D_0 = 859$ мм, скорость валка и металла совпадает и нет скольжения металла относительно валка.

Принимая скорость выхода полосы из VII калибра за 100%, можно определить скорость характерных точек калибра и величину скольжения прокатываемого металла.

Скольжение точек 1—6 на выходе VII калибра (рис. 37,а) определяют из выражения

$$S = \frac{D_n - D_0}{D_0} 100\%, \quad (27)$$

где D_n — диаметр валка в n -ной точке.

Таким образом, точки калибра, где валок отстает от

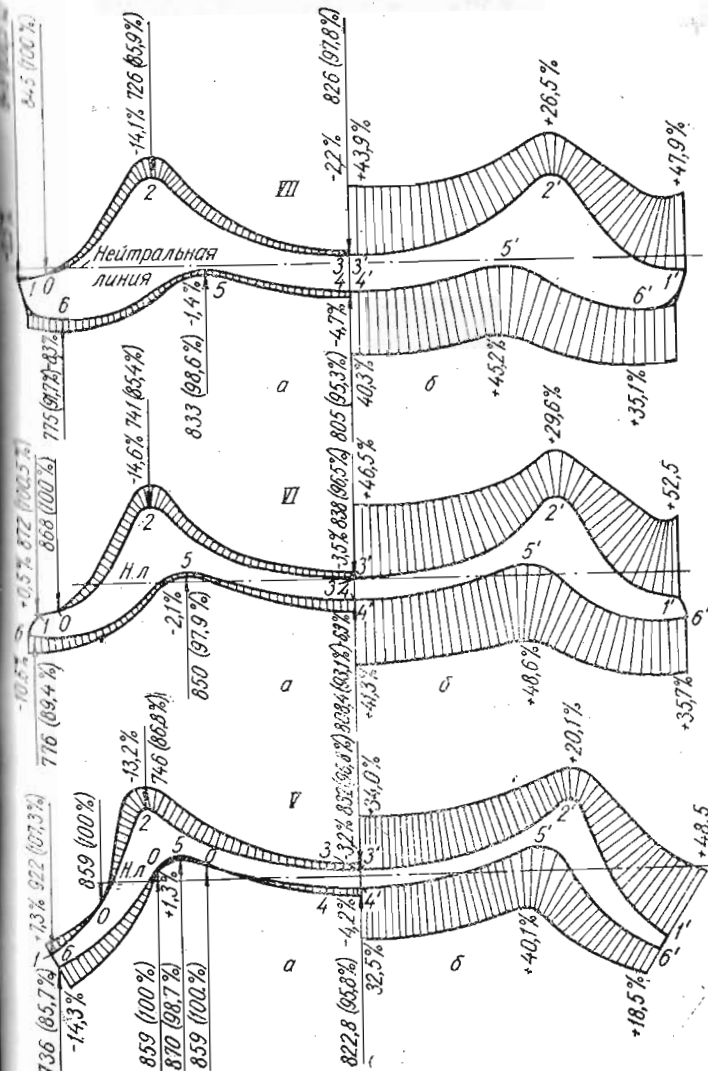


рис. 37. Схемы эпюр скольжения металла по периметру VII, VI и V калибров при прокатке швеллера № 30 по развернутой калибровке способом постепенного сгибания полок

металла полосы, имеют знак минус, а где опережает металл — знак плюс.

Диаметр валка, соответствующий скорости входа металла в калибр, определим из выражения

$$D'_0 = \frac{D_0}{\mu}. \quad (26)$$

Тогда скольжение тех же точек 1 — 6 VII калибра (см. рис. 37,б) относительно прокатываемого металла на входе определим следующим образом:

$$S' = \frac{D_n - D'_0}{D'_0} 100\%. \quad (27)$$

Данные расчета скольжения металла на выходе по формуле (27) и на входе по формуле (27а) по контуру развернутых VII, VI и переходного V калибров представлены в табл. 5.

Таблица

Скольжение по периметру развернутых и переходного калибров

Номер калибра	Значения скольжения металла полосы относительно валков в точках %					
	1	2	3	4	5	6
VII	+0,5 +47,9	-14,1 +26,5	-2,2 +43,9	-4,7 +40,3	-1,4 +45,2	-8,1 +35,1
VI	+0,5 +52,5	-14,6 +29,6	-3,5 +46,5	-6,9 +41,3	-2,1 +48,6	-10,1 +35,1
V	+7,3 +48,5	-13,2 +20,1	-3,2 +34,0	-4,2 +32,5	+1,3 +40,1	-14,1 +18,1

Примечание. В числителе указаны значения S , в знаменателе — S' , соответствующие точкам со штрихом на рис. 37.

По рассчитанным значениям величины скольжения металла в точках 1—6 VII калибра построены эпюры скольжения металла на выходе из валков (рис. 37,а) и эпюры скольжения металла относительно валков на входе в валки (рис. 37,б).

Аналогичным образом построены эпюры скольжения металла на входе и выходе VI и V калибров (см. рис. 37).

Из схемы скольжения металла по периметру последнего полностью развернутого (VI) калибра следует, что максимальное скольжение на выходе наблюдается в точ

ке 2 и составляет 14,6%. В точке 2 валки отстают от прокатываемого металла на 14,6%, что соответствует и максимальной разности скольжения на выходе. На входе в точке 2' валки опережают металл на 29,6%. Максимальное скольжение валков относительно прокатываемого металла на входе будет в точке 1' и составит 52,5%.

Разница между максимальным и минимальным скольжением на входе VI калибра составит $52,5 - 29,6 = 22,9\%$.

Следует иметь в виду, что разность в величине скольжения в известной мере характеризует также и разность в величине износа валков в данных точках калибра (в зависимости от исследуемого фактора).

Схема скольжения металла по периметру первого переходного (V) швеллерного калибра показывает, что максимальное скольжение на выходе наблюдается в точке 6 и равно — 14,3%, а в точке 2 скольжение составляет 13,2%. На входе в точке 2' валки опережают металл на 20,1%. Максимальное скольжение на входе будет в точке 1' и составит +48,5%.

Разница между максимальным и минимальным скольжением на входе V калибра, влияющая на неравномерность износа валков, составит $48,5 - 20,1 = 28,4\%$.

При прочих равных условиях износ калибров пропорционален средней величине скольжения металла по длине очага деформации, которую определяют для любой точки калибра как

$$S_{\text{ср}} = \frac{S + S'}{2}. \quad (29)$$

Например, максимальная средняя величина скольжения будет в точках 1—1' и для VII калибра составит 24,2%, VI 26,5%, и V 27,9%.

Значение средней величины скольжения зависит от формы и размеров калибра, а также от коэффициента вытяжки в данном калибре. Если исключить влияние коэффициентов вытяжки на величину среднего скольжения, то величина условного среднего скольжения может быть определена из выражения:

$$S_{\text{усл}} = \frac{\bar{S}_{\text{ср}}}{\mu}. \quad (30)$$

Для точек 1 — 1' калибра VII $S_{\text{усл}} = 16,4\%$, VI $S_{\text{усл}} = 17,5\%$ и V $S_{\text{усл}} = 20,2\%$.

Приведенные расчеты показывают, что наибольшая величина среднего скольжения металла и величина условного среднего скольжения в точках $I - I'$, как и следовало ожидать, наблюдаются в V калибре. Увеличение среднего и условного среднего скольжения в V калибре объясняется увеличением его вертикальной проекции. Следовательно, развернутые швеллерные калибры при прочих равных условиях отличаются меньшей величиной скольжения между отдельными точками калибра, а также меньшим средним скольжением в сравнении с переходными и тем более прямополочными калибрами с определенным выпуском полок.

По распределению и величине скольжения металла по периметру швеллерного калибра можно определить работу сил трения в калибре и характер его износа.

Распределение сил трения по периметру развернутого и переходного швеллерных калибров

Применение развернутой калибровки способом постепенного сгибания полок при производстве ряда сложных профилей проката, в том числе и швеллерных, привело к улучшению скоростных условий прокатки. Последнее должно обеспечить уменьшение работы сил трения, оказывающей определенное влияние на износ калибров.

Известно, что при прокатке швеллерных профилей отмечается неравномерный износ калибров, одни части калибров по их периметру изнашиваются больше, другие — меньше [10]. Это приводит к нарушению режима обжатия, предусмотренного калибровкой, ухудшению качества поверхности проката и т. д. Последнее вызывает необходимость сравнительно частых перевалок валков, что связано с потерей производительности стана, на котором прокатываются швеллеры.

На неравномерность износа швеллерных и других фасонных калибров влияет ряд факторов, в том числе распределение сил трения в отдельных частях калибра. Это связано с неодинаковым скольжением металла прокатываемой полосы по периметру швеллерных калибров вследствие существенного неравенства рабочих диаметров. Применение развернутой калибровки несколько уменьшает

неравенство рабочих диаметров по периметру калибра. Поэтому интересно рассмотреть влияние этого фактора на распределение сил трения при прокатке полосы в развернутом (VI) и переходном (V) швеллерных калибрах при прокатке швеллера № 30.

Для определения сил трения по периметру калибра необходимо найти длину очага деформации в характерных точках калибра, а затем, зная величину скольжения на входе и выходе очага деформации развернутого и пере-

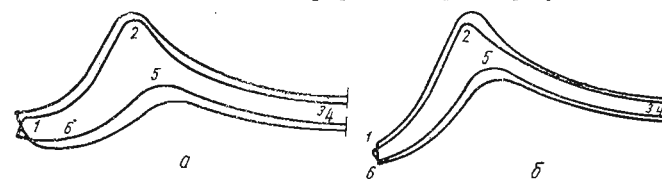


Рис. 38. Схема распределения обжатий по периметру VI развернутого (a) и V переходного (b) калибров швеллера № 30

ходного калибров в рассматриваемых точках, можно построить эпюры скольжения в этих точках по длине очага деформации. Площади эпюр скольжения можно принять пропорциональными работе сил трения, что и определяет качественную картину распределения сил трения по периметру калибра.

Таблица 6

Обжатия, рабочие диаметры и длина очага деформации в характерных точках калибров

Показатели	Номер калибра	Точки калибра					
		1	2	3	4	5	6
Обжатие, мм	VI	3,5	6,8	4,0	4,0	13,2	5,0
	V	2,0	7,2	2,0	2,0	7,5	2,0
Рабочий диаметр, мм	VI	872	741	838	808,4	850	776
	V	922	746	832	822,8	870	736
Длина очага деформации, мм	VI	55	71	58	57	106	63
	V	43	73	41	41	81	38

Длину очага деформации в характерных точках VI развернутого и V переходного швеллерных калибров определяем графоаналитическим методом. Для этого путем

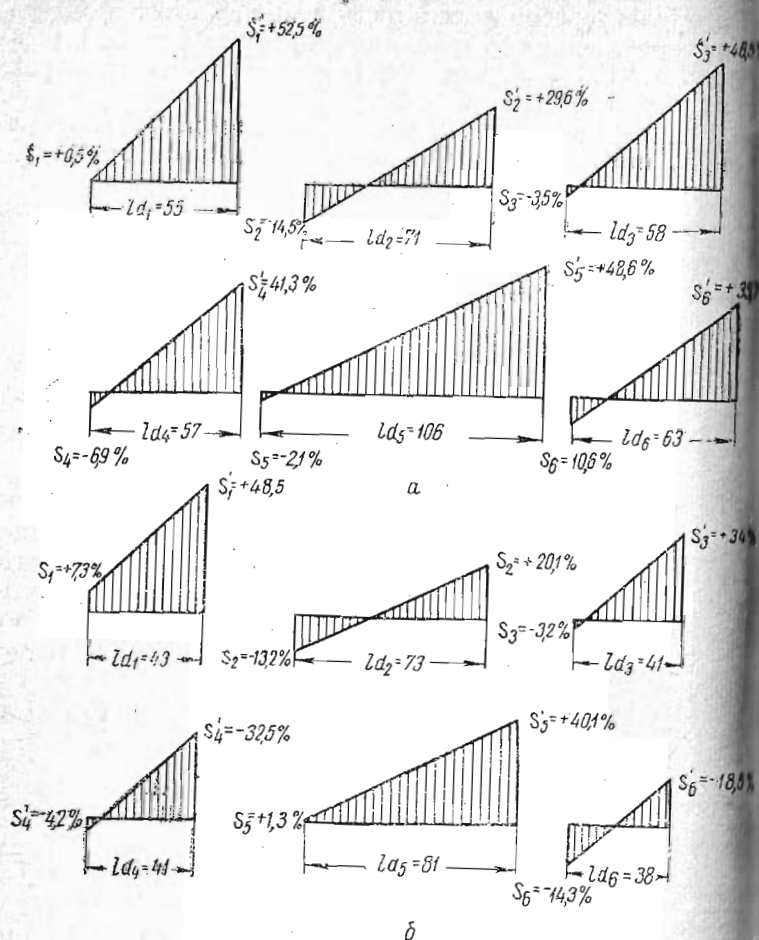


Рис. 39. Схема эпюр скольжения металла относительно валков в характерных точках по длине очага деформации в VI развернутом (а) и V переходном (б) швеллерных калибрах

наложения исходной полосы на калибр, в котором она будет прокатываться (рис. 38), совмещая нейтральные линии полосы в калибре, находим обжатие в характерных точках 1—6 (табл. 6).

Чтобы определить длину очага деформации в соответствующих точках, необходимо знать рабочие диаметры

в этих точках. После этого определяем длину очага деформации по формуле [18]

$$l_{dn} = \sqrt{0,5 D_{pn} \Delta h_n}, \quad (31)$$

где Δh_n — обжатие в n -й точке одним из валков;

D_{pn} — рабочий диаметр в n -й точке калибра.

Зная величину скольжения в точках 1—6 на входе и выходе развернутого VI и переходного V швеллерного калибра (см. табл. 5), строим эпюры скольжения металла относительно валков в этих точках по длине очага деформации (рис. 39).

Работу сил трения примем пропорциональной площадям заштрихованных участков. Для определения эпюр сколь-

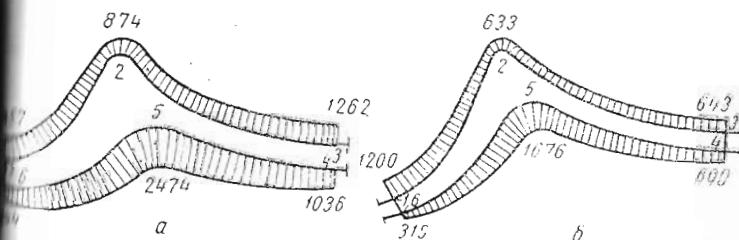


Рис. 40. Схемы эпюр распределения работы сил трения в характерных точках по периметру VI развернутого (а) и V переходного (б) швеллерных калибров

жения по длине очага деформации точек 1—6 этих заштрихованных участков находим длину зоны опережения l_{sh} по формуле

$$l_{sh} = \frac{Sl_d}{S + S'} \quad (32)$$

длину зоны отставания l_{sh} по формуле

$$l_{sh} = l_{dn} - l_{sh}, \quad (33)$$

где опережение и отставание выражены в масштабе: 1% опережения или отставания соответствует 1 мм.

После этого нетрудно рассчитать суммарные площади заштрихованных участков в каждом проходе.

Результат расчета длины зон опережения и отставания и площадей заштрихованных участков приведен в табл. 7.

На основании произведенного расчета строим схему распределения работы сил трения по периметру *VI* развернутого (рис. 40,а) и *V* переходного (рис. 40,б) швеллерных калибров.

Таблица 7

Длина зон опережения и отставания и площади заштрихованных участков (рис. 39)

Точки калибра	Длина зоны, мм		Суммарная пло- щадь заштрихо- ванных участков F_{Σ} , мм ²
	опережения l_{S_n}	отставания l_{S_H}	
VI калибр			
1	—	55,0	1457
2	25,5	47,5	874
3	4,0	54,0	1262
4	8,2	48,8	1036
5	4,4	101,6	2474
6	14,4	48,6	944
V калибр			
1	—	43,0	1200
2	29,0	44,0	633
3	3,5	37,5	643
4	4,7	36,3	600
5	—	81,0	1676
6	16,6	21,2	315

Принимаем величину износа (в зависимости от скольжения) пропорционально работе сил трения. Тогда построенные схемы представляют качественную картину износа развернутого и переходного швеллерных калибров при воздействии на них только одного фактора, а именно скольжения прокатываемого металла в очаге деформации.

Из рис. 40 видно, что распределение работы сил трения по контуру развернутых и переходных калибров в результате скольжения металла также не является равномерным, однако эта неравномерность значительно меньше, чем у прямополочных калибров [10].

Максимального износа следует ожидать в точке 1 и прилегающей к ней области на концах полки по верхнему валку и в точке 5 по гребню нижнего валка.

Таким образом, расчет распределения сил трения, исходя из скольжения металла по периметру швеллерного калибра, позволяет качественно прогнозировать характер износа калибра, который следует учитывать при калибровке валков.

Вместе с тем следует иметь в виду, что износ калибров зависит не только от скольжения металла прокатываемой полосы относительно поверхности валков, но и от температурных условий прокатки, химического состава, твердости материала валков, марки прокатываемой стали, режима обжатий и других факторов, влияние которых в вышеприведенном расчете не учитывалось.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОКАТКИ ШВЕЛЛЕРОВ ПО ПРЯМОПОЛОЧНОЙ И РАЗВЕРНУТОЙ КАЛИБРОВКЕ СПОСОБОМ ПОСТЕПЕННОГО СГИБАНИЯ ПОЛОК

1. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГОСКОРОСТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОКАТКИ ШВЕЛЛЕРА № 30

Для выявления преимуществ и недостатков различных способов прокатки фасонных профилей было проведено сопоставительное исследование энергоскоростных параметров, скольжения металла и распределения сил трения по периметру швеллерного калибра, а также износа калибров, формоизменения металла по проходам при прокатке швеллеров по прямополочной калибровке с увеличенным выпуском полок и развернутой калибровке способом постепенного сгибания полок.

Для определения энергоскоростных параметров прокатки швеллера № 30 (по ГОСТ 8240—56*) на обжимной клетки 900, а также на I и II клетях трио 850 рельсобалочного стана с помощью осциллографа типа МПО-2 были записаны на пленку величины тока двигателя, напряжения и числа оборотов, а также ток возбуждения двигателя. Ток якоря двигателя подводился к вибратору осциллографа от шунта цепи якоря через добавочное сопротивление. Число оборотов якоря главного двигателя измеряли подключением вибратора к тахогенератору тоже через добавочное сопротивление. В качестве отметчика времени использовали обычный вибратор, к которому через добавочное сопротивление подводился переменный ток промышленной частоты (50 гц).

Для определения тарифовочных данных силы тока, напряжения и числа оборотов двигателя задавали режимы работы с известными значениями и по величине отклонения соответствующих кривых от нулевой линии на осцил-

лограмме определяли цену одного миллиметра. Так, например, если кривая напряжения двигателя отклонялась от нулевой линии при подаче на двигатель напряжения 800 в на величину 6,8 мм, то 1 мм отклонения будет составлять $\frac{800}{6,8}$ в. Таким же образом определяли цену 1 мм для

силы тока и числа оборотов двигателя. Затем осциллограмма с помощью увеличителя была перенесена на миллиметровую бумагу с пятикратным увеличением. После такого перенесения кривых силы тока цена 1 мм отклонения этих кривых от нулевой линии с учетом пятикратного увеличения уменьшилась в пять раз и для напряжения составила: $(800 : 6,8) \cdot 5 = 25,5$ в в 1 мм отклонения.

Для силы тока двигателя и числа оборотов, поступив аналогичным образом, получим: а) масштаб силы тока двигателя 227,6 а в 1 мм; б) масштаб числа оборотов двигателя 2,4 об/мин в 1 мм. Для времени при движении пленки со скоростью 4 мм/сек с учетом пятикратного увеличения $\frac{1}{10}$ сек в 1 мм. Расстояние (мм) на осциллограмме от момента захвата металла валками до момента выхода, измеренное по нулевой линии и умноженное на масштаб времени $\left(\frac{1}{20} \text{ сек/мм}\right)$, и есть время прокатки металла (в сек) (рис. 41, 1, 2). Таким же образом определяли и время пауз.

Расстояние по вертикали от любой точки на нулевой линии до точки на кривой силы тока двигателя, умноженное на масштаб силы тока (227,6 а/мм) — это сила тока в данный момент времени. Из осциллограмм прокатки в I и II клетях 850 видно, что напряжение двигателя в процессе прокатки постоянно и равно 800 в. Таким образом, кривая тока двигателя с учетом коэффициента K и выбранного масштаба является кривой мощности.

Кривые мощности двигателя строили перемножением ординат кривой тока h_a и кривой напряжения h_b на постоянный коэффициент K , зависящий от масштаба $m_{a,m} = K h_a h_b$. Указанный коэффициент K с учетом масштабов будет иметь следующее значение:

$$K = \frac{m_a m_b}{m_{a,m}} = \frac{227 \cdot 6 \cdot 25,5}{184 \cdot 10} = 0,03189.$$

Поскольку $v = \text{const}$, то кривая тока есть кривая мощности при масштабе $m_{a,m} = 182 \text{ кВт в 1 мм}$.

Результаты обработки данных прокатки швеллера № 30 по прямополочной калибровке, блюмы 1—6 (21,5 м) Таблица 8

Номер		$S, \text{ мм}^2$		$W = \frac{S}{396}, \text{ квт} \cdot \text{ч}$		$t_{\text{пр}}, \text{ сек}$		$t_{\text{п}}, \text{ сек}$		$N_{\text{ср}}, \text{ квт}$	
клет	калиб- ра	мин макс	среднее	мин макс	среднее	мин макс	среднее	мин макс	среднее	мин макс	среднее
I	VII	3055 4000	3339	7,714 10,101	8,432	6,15 8,30	6,8	4,85 6,65	5,4	4183 5139	4687
	VI	3260 3550	3400	8,232 8,965	8,585	8,00 8,55	8,3	4,30 4,75	4,6	3562 3865	3763
	V	3320 3520	3441	8,384 8,889	8,719	9,40 9,85	9,7	—	—	3096 3395	3232
	Σ_I	9635 11070	10180	24,320 27,955	25,936	—	24,8	—	—	—	—
II	IV	3720 4125	3930	9,595 10,416	10,014	11,6 12,00	11,80	3,9 4,85	4,43	2915 3125	3027
	III	3340 3750	3582	8,434 9,470	9,045	12,6 14,90	13,53	5,0 5,75	5,47	2288 2482	2408
	II	3950 4350	4110	9,974 10,984	10,377	14,5 15,85	15,04	—	—	2424 2538	2484
	Σ_{II}	11010 12225	11622	28,003 30,870	29,436	—	40,37	—	—	—	—
	Σ_{I-II}	20645 23295	21802	52,325 58,825	55,372	—	—	—	—	—	—

Таблица 9

Результаты обработки данных прокатки швеллера № 30 по калибровке способом постепенного сгибания, блюмы 1—6 (21,5 м.м)

Номер		$S, \text{ мм}^2$		$W = \frac{S}{396}, \text{ квт} \cdot \text{ч}$		$t_{\text{пр}}, \text{ сек}$		$t_{\text{п}}, \text{ сек}$		$N_{\text{ср}}, \text{ квт}$	
клет	калиб- ра	мин макс	среднее	мин макс	среднее	мин макс	среднее	мин макс	среднее	мин макс	среднее
I	VII	2960 3500	3227	7,47 8,64	8,122	4,70 5,75	5,20	4,0 5,95	5,45	5103,9 6249,2	5607,85
	VI	3650 4410	4156	9,22 11,11	10,495	6,15 7,55	7,20	4,8 5,55	5,30	4602,3 5770,7	5241,90
	V	2610 3820	3334	6,60 9,00	8,420	7,55 9,40	8,78	—	—	3094,8 3538,0	3449,30
	Σ_I	9220 11730	10717	23,29 28,75	27,037	—	21,18	—	—	—	—
II	IV	3350 4150	3794	8,46 9,77	9,582	10,7 12,45	11,75	3,75 5,05	4,25	2793,3 3139,0	2935,40
	III	2570 3250	2950	6,49 8,20	7,447	11,2 14,15	12,85	5,60 6,70	6,10	1925,6 2246,8	2062,05
	II	2800 3566	3391	7,07 9,14	8,570	12,6 15,10	14,40	—	—	2020,0 2275,8	2129,80
	Σ_{II}	8720 10966	10135	22,02 27,11	25,599	—	39,00	—	—	—	—
	Σ_{I-II}	17940 22696	20852	45,31 55,86	52,636	—	—	—	—	—	—

Таблица 10

Значения энергоскоростных параметров при прокатке швеллера № 30
на обжимной клети 900 по прямополочной калибровке
(блумы 1—5)

Номер прохо- да	$W_{пр}, \text{кат} \cdot \text{ч}$		$W_p, \text{кат} \cdot \text{ч}$		$W_T, \text{кат} \cdot \text{ч}$		$W, \text{кат} \cdot \text{ч}$	
	мин.	сред-	мин.	сред-	мин.	сред-	мин.	сред-
	макс.	нее	макс.	нее	макс.	нее	макс.	нее
1	1,175	1,270	0	0,0410	0,2664	0,3839	0,8381	0,9333
	1,385		0,064		0,4932		0,980	
2	1,669	1,912	0,0151	0,2624	0	0,1971	1,7612	1,9654
	2,118		0,704		0,3831		2,451	
3	0,917	0,997	0	0,0683	0,444	0,518	0,5041	0,5479
	1,159		0,115		0,5626		0,622	
4	3,053	3,173	0,0589	0,1682	0,1979	0,2752	2,845	3,0523
	3,381		0,252		0,3631		3,264	
5	2,688	2,855	0	0,0519	0,3498	0,4098	2,3643	2,4935
	3,019		0,105		0,4884		2,600	
6	4,835	5,123	0,006	0,2229	0,1573	0,2572	4,841	5,088
	5,343		0,472		0,3223		5,392	
7	3,934	4,260	0	0,0190	0,4228	0,4647	3,4735	3,806
	4,524		0,0678		0,494		4,075	
Σ	18,271	19,530						
	20,936							

Продолжение табл. 10

Номер прохо- да	$N_{пр}, \text{кат}$		$N_T, \text{кат}$		$N, \text{кат}$		$N_{пр. макс}, \text{кат}$	
	мин.	сред-	мин.	сред-	мин.	сред-	мин.	сред-
	макс.	нее	макс.	нее	макс.	нее	макс.	нее
1	2277	2428	580	660	511	686	3297	3424
	2545		809		882		3704	
2	2601	3118	—	339	1109	1227	4129	4615
	3558		666		1482		5165	

Продолжение табл. 10

Номер прохо- да	$N_{пр}, \text{кат}$		$N_T, \text{кат}$		$N, \text{кат}$		$N_{пр. макс}, \text{кат}$	
	мин.	сред-	мин.	сред-	мин.	сред-	мин.	сред-
	макс.	нее	макс.	нее	макс.	нее	макс.	нее
3	1583	1695	670	871	240	314	1983	2549
	1904		1172		437		3407	
4	3246	3572	330	444	1300	1560	4873	5187
	3960		645		1833		5471	
5	2816	2879	584	649	1003	1169	3129	3458
	3082		755		1427		3841	
6	4190	3905	139	404	1814	2172	4502	4999
	3681		580		2411		5218	
7	2335	2510	592	637	979	1242	2623	2930
	2720		679		1632		3297	

Продолжение табл. 10

Номер прохо- да	$I_{пр. макс}, a$		$n_3, \text{об/мин}$		$n_v, \text{об/мин}$		$n_{макс}, \text{об/мин}$	
	мин.	сред-	мин.	сред-	мин.	сред-	мин.	сред-
	макс.	нее	макс.	нее	макс.	нее	макс.	нее
1	7607	8294	3,67	12,90	64,53	69,20	77,87	83,23
	9188		28,49		72,88		90,26	
2	7564	9178	7,68	19,27	58,43	69,23	81,51	86,41
	11290		45,50		85,47		97,68	
3	4743	5467	5,57	38,25	79,82	81,70	85,47	88,50
	5852		51,85		82,93		90,96	
4	9070	9755	5,65	12,81	63,12	65,85	74,25	73,69
	10555		25,99		69,13		83,40	
5	7622	8638	13,30	32,88	68,68	70,74	79,82	84,36
	10180		49,83		72,93		91,17	
6	7900	9284	3,80	24,14	62,20	66,61	77,87	80,96
	10078		53,08		69,30		86,42	
7	6222	7256	7,42	17,41	73,51	76,43	85,89	88,62
	7957		36,02		82,58		91,17	

Продолжение табл. 10

Номер прохода	$t_{пр}, сек$		$t_p, сек$		$t_T, сек$		$t_{х.х}, сек$		$t_{п}, сек$	
	мин. макс.	среднее	мин. макс.	среднее	мин. макс.	среднее	мин. макс.	среднее	мин. макс.	среднее
1	1,71 2,06	1,886	— 3,20	1,657	1,654 2,63	2,120	— 1,357	0,32	2,684 6,210	4,290
2	1,82 2,68	2,255	1,03 4,03	1,852	1,962 3,83	2,509	— 1,210	2,24	2,923 4,610	3,607
3	1,95 2,62	2,143	— 1,55	0,856	1,466 3,02	2,205	— 2,601	0,83	3,430 6,648	4,763
4	3,03 3,43	3,207	0,93 2,58	1,638	2,010 2,78	2,280	— 3,820	0,76	3,070 6,235	4,520
5	3,40 3,86	3,570	— 3,62	1,480	1,840 2,90	2,304	— 2,203	1,00	3,300 5,223	4,215
6	4,33 4,94	4,687	0,12 1,97	0,914	1,837 4,07	2,579	— 1,010	0,52	2,643 4,801	3,307
7	5,77 7,08	6,183	— 0,50	0,210	2,440 2,80	2,675	0,42 4,240	2,11	5,230 8,050	6,550
		$\Sigma 23,911$								

Примечание. $W_{пр}$ —расход энергии на прокатку; W_p —то же, на разгон двигателя; W_T —отдача энергии при торможении; W —полный расход энергии за проход; $N_{пр}$ —средняя мощность за период прокатки; N_T —то же, за период торможения; N —то же, за проход; $N_{пр. макс.}$ —значение максимальной мощности в данном проходе; $I_{пр. макс.}$ —значение максимального тока в данном проходе; n_3 —число оборотов валков в минуту при захвате; $n_в$ —то же, при выбросе; $n_{макс}$ —то же, в данном проходе; $t_{пр}$ —время прокатки; t_p —время разгона двигателя; t_T —время торможения двигателя; $t_{х. х}$ —время холостого хода; $t_{п}$ —время пауз; $t_{ц}$ —время цикла: минимальное 53,20 сек, максимальное 57,6 сек, среднее 55,18 сек.

Анализ полученных опытных данных

Для исследования энергоскоростных параметров прокатки швеллера № 30 на I и II клетях трио 850 рельсобалочного стана было снято шесть осциллограмм. Три осциллограммы характеризуют прокатку швеллера № 30 по калибровке с увеличенным до 15—20% выпуском полок и три осциллограммы — прокатку швеллера по калибровке способом постепенного сгибания полок. На каждой из

Таблица 11

значения энергоскоростных параметров при прокатке швеллера № 30 на обжимной клетки 900 по калибровке способом постепенного сгибания полок (блюда 1—5)

Номер прохода	$W_{пр}, кат.ч$		$W_p, кат.ч$		$W_T, кат.ч$		$W, кат.ч$	
	мин макс	среднее	мин макс	среднее	мин макс	среднее	мин макс	среднее
1	1,031 1,226	1,123	0,025 0,155	0,1180	0,619 0,7510	0,6744	0,420 0,722	0,567
2	1,960 2,563	2,250	0,054 0,516	0,3208	0,382 0,6435	0,4560	1,726 2,408	2,103
3	1,610 2,146	1,897	0,074 0,558	0,3000	0,635 0,7305	0,6670	1,204 1,600	1,499
4	1,876 2,271	2,113	0,032 0,338	0,2212	0,500 0,7880	0,6926	1,505 1,861	1,625
5	2,141 2,445	2,279	0,015 0,051	0,0258	0,347 0,6986	0,5733	1,477 2,033	1,725
6	4,625 5,788	5,000	0,159 1,547	0,5720	— 0,4977	0,2926	4,397 6,170	5,339
7	3,332 3,913	3,585	— 0,271	0,1109	0,743 0,8529	0,7845	2,602 3,220	2,914
Σ	17,565 20,352	18,257						

Продолжение табл. 11

Номер прохода	$N_{пр}, кат$		$N_T, кат$		$N, кат$		$N_{пр. макс}, кат$	
	мин. макс	среднее	мин макс	среднее	мин макс	среднее	мин макс	среднее
1	2173 2692	2495	1454 2255	1781	418 659	546	2854 3295	3150
2	3612 4534	3911	689 2030	1083	1241 1452	1370	4943 5470	5210

Продолжение табл. 11

Номер прихо- да	$N_{пр}$, кат		N_T , кат		N , кат		$N_{пр. макс}$, кат	
	мин. макс.	сред- нее	мин. макс.	сред- нее	мин. макс.	сред- нее	мин. макс.	сред- нее
3	2493 4128	3348	1205 1401	1275	700 1218	974	3678 4797	4323
4	2262 3014	2612	1074 2462	1882	961 1188	1072	3348 4216	3915
5	2568 3348	2953	429 2099	1572	1142 1622	1299	3520 4603	3981
6	4015 5717	4948	— 1903	933	2361 2595	2429	5203 7275	6181
7	2670 3327	2981	947 1427	1263	990 2520	1586	3511 4100	3789

Продолжение табл. 11

Номер прохо- да	$I_{пр}$, а		n_3 , об/мин		$n_в$, об/мин		$n_{макс}$, об/мин	
	мин макс	сред- нее	мин макс	сред- нее	мин макс	сред- нее	мин макс	сред- нее
1	4863 5473	5259	20,85 45,50	33,78	78,50 85,00	81,80	85,16 88,64	86,56
2	8047 10750	8772	19,62 46,98	30,04	67,67 78,76	73,42	78,76 82,03	76,42
3	6975 8566	7823	31,28 57,26	50,09	71,52 80,51	78,07	85,81 89,16	87,95
4	5856 6606	6182	5,35 43,38	24,54	79,78 88,63	86,00	86,76 92,32	88,88
5	6119 7707	6808	6,95 27,48	20,06	75,13 83,32	79,95	76,38 88,64	81,86
6	8868 10730	9799	7,13 53,75	26,56	66,51 7125	69,20	66,51 78,05	72,09
7	6020 6975	6611	20,4 42,00	32,60	82,26 92,11	84,98	92,11 92,76	92,40

Продолжение табл. 11

$t_{пр}$, сек	t_D , сек	t_T , сек		$t_{х. х}$, сек		$t_{п}$, сек*	
		мин макс	сред- нее	мин макс	сред- нее	мин макс	сред- нее
1,45 1,88	1,63	0,475 1,04	0,795	1,20 1,55	1,39	— 1,05	0,210
1,70 2,38	1,97	0,50 3,46	2,03	1,14 1,78	1,56	0,10 0,91	0,486
1,98 2,17	2,08	0,66 2,52	1,64	1,91 2,08	1,89	2,12 2,57	2,332
2,41 3,59	2,96	0,32 2,45	1,29	1,17 1,68	1,35	3,21 4,16	3,700
2,70 3,23	2,83	0,28 1,80	0,75	1,13 2,90	1,56	— 0,08	0,020
3,16 4,23	3,68	0,95 3,35	2,03	0,91 3,72	2,08	1,02 2,35	1,355
3,95 4,72	4,30 Σ 19,45	0,47 2,35	0,98	1,98 2,38	2,17	1,54 2,91	1,970
							3,10 4,66 2,47 4,86 4,72 6,90 4,81 6,67 2,12 5,52 2,62 7,09 4,28 6,05
							3,63 3,69 5,51 5,80 3,61 4,42 4,87

* $t_{ц}$, сек: $\frac{47}{53,8}$; 51.

осциллограмм записано семь — девять блюмов. Энерго-
скоростные параметры записывались при прокатке одной
и той же полосы в I и II клетях трио 850.

С каждой осциллограммы было выбрано по две полосы,
запись которых не имела никаких дефектов. Кроме этого,
для сравнимости результатов общая длина шести блюмов,
прокатанных по прямополочной калибровке и калибровке
способом постепенного сгибания, составляла 21,5 м.

Таким образом, для каждой из калибровок исследова-
на прокатка шести блюмов в шести проходах I и II кле-
тей трио 850, всего 36 проходов по калибровке с увеличе-
нием до 15—20% выпуском полок и 36 проходов по калиб-
ровке способом постепенного сгибания полок.

Для прокатки швеллера № 30 по прямополочной калиб-
ровке с выпуском полок 15—20% и по калибровке спосо-

бом постепенного сгибания использовали заготовку 245 × 320 мм длиной 3,1—3,8 м из стали марки Ст. 3сп.

Средний расход энергии для прокатки одного блюма, равный для прямополочной калибровки $W_{\text{ср}} = 55,372 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$ (см. табл. 8), относится к блюму средней длины $l_{\text{ср}} = 21,5 : 6 = 3,583 \text{ м}$. Зная массу 1 пог. м блюма, который

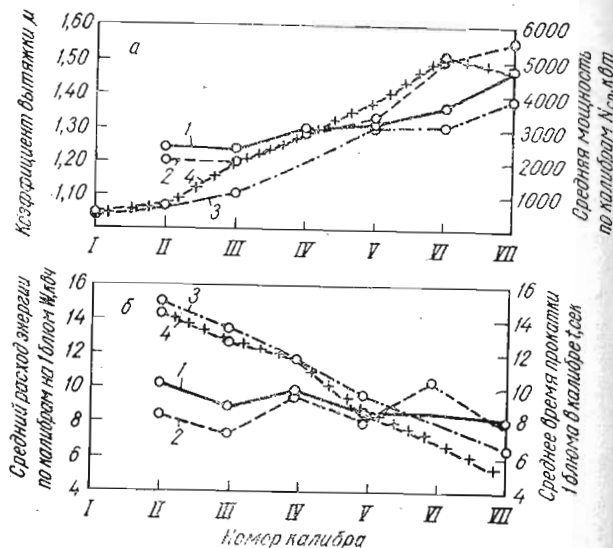


Рис. 42. Кривые средней мощности, расхода энергии (1, 2) (а), вытяжки и среднего времени прокатки (3, 4) (б) по калибрам I и II трехвалковых клеток 850 рельсобалочного стана:

1, 3 — по прямополочной калибровке; 2, 4 — по калибровке способом постепенного сгибания.

равна $G = 609,16 \text{ кг/пог. м}$, можно рассчитать расход энергии на 1 т при прокатке на I и II клетях по формуле

$$W_{\text{r1}} = \frac{W_{\text{ср}}}{G l_{\text{ср}}} = \frac{55,372}{609,16 \cdot 3,583} = 25,45 \text{ кВт} \cdot \text{ч/т}. \quad (35)$$

Выполнив тот же расчет для калибровки способом постепенного сгибания, для которой $W'_{\text{ср}} = 52,686 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$ (см. табл. 9) получим расход энергии

$$W'_{\text{r1}} = \frac{W'_{\text{ср}}}{G l_{\text{ср}}} = \frac{52,686}{609,16 \cdot 3,583} = 24,12 \text{ кВт} \cdot \text{ч/т}.$$

Коэффициенты вытяжки по калибрам швеллера № 30 калибровки способом постепенного сгибания значительно больше и кривая коэффициентов вытяжки этой калибровки расположена выше (рис. 42, а). Суммарный коэффициент вытяжки при прокатке швеллера № 30 по калибровке способом постепенного сгибания на чистовой линии стана равен

$$\mu'_{\Sigma} = \mu_1 \mu_2 \mu_3 \mu_4 \mu_5 \mu_6 \mu_7 = 1,045 \cdot 1,075 \cdot 1,200 \cdot 1,290 \cdot 1,383 \cdot 1,518 \cdot 1,473 = 5,378.$$

Суммарный коэффициент вытяжки швеллера № 30 на чистовой линии стана по прямополочной калибровке равен

$$\mu_{\Sigma} = 1,037 \cdot 1,070 \cdot 1,209 \cdot 1,200 \cdot 1,311 \cdot 1,311 \cdot 1,390 = 3,526.$$

Увеличение суммарной вытяжки в калибровке швеллера № 30 способом постепенного сгибания относительно прямополочной калибровки составляет

$$\Delta \mu_{\Sigma} = \frac{\mu'_{\Sigma} - \mu_{\Sigma}}{\mu_{\Sigma}} \cdot 100 = \frac{5,378 - 3,526}{3,526} \cdot 100 = 52,5 \%.$$

В то же время расход энергии на тонну проката на I и II клетях трио 850 чистовой линии стана по калибровке способом постепенного сгибания в сравнении с прямополочной калибровкой швеллера № 30 снизился (рис. 42, б) на

$$\Delta W_r = \frac{W_{\text{r1}} - W'_{\text{r1}}}{W_{\text{r1}}} \cdot 100 \% = \frac{25,45 - 24,12}{25,45} \cdot 100 \% = 5,2 \%$$

Снижение расхода энергии на тонну при прокатке швеллера № 30 по калибровке способом постепенного сгибания объясняется уменьшением работы сил трения благодаря уменьшению разности скоростей по периметру калибров, более равномерной деформации по ширине полосы и в связи с этим уменьшением перетекания металла из одной части калибра в другую и действию ряда других факторов.

Из рис. 42, а видно также, что при прокатке в калибрах II, III и IV, которые расположены в валках II клетки трио 850, средняя мощность в случае прямополочной калибровки (кривая 1) несколько выше, чем в калибровке способом постепенного сгибания (рис. 42, а, 2), хотя кривые коэффициентов вытяжки расположены наоборот. Это также объясняется действием вышеуказанных факторов.

Кроме того, из рис. 42,б видно, что кривая среднего расхода энергии при прокатке по калибровке способом постепенного сгибания находится в основном ниже кривой среднего расхода энергии по прямополочной калибровке. Исключением является только VI калибр, где средний расход энергии при прокатке по калибровке способом постепенного сгибания выше, чем по прямополочной. Это объясняется значительно более высоким коэффициентом вытяжки, который в этом калибре по калибровке способом постепенного сгибания равен: $\mu'_6 = 1,518$, а в прямополочной калибровке $\mu_6 = 1,311$.

Из рис. 42,б видно также, что кривая среднего времени прокатки одного бляма в случае применения калибровки способом постепенного сгибания проходит ниже (кривая 4), чем при прокатке по прямополочной калибровке (кривая 3), что позволяет сократить цикл прокатки в клетях трио 850 примерно на 5 сек.

Для исследования энергоскоростных параметров прокатки швеллера № 30 на обжимной клети 900 было снято 15 осциллограмм. Семь осциллограмм характеризуют прокатку швеллера № 30 по калибровке с увеличенным до 15—20% выпуском полок и восемь осциллограмм — прокатку того же профиля по калибровке способом постепенного сгибания полок.

Для обработки было выбрано по пять блямов, запись которых не имела никаких дефектов. Для сравнимости результатов общая длина пяти блямов, прокатанных по прямополочной калибровке и калибровке способом постепенного сгибания, подобрана одинаковой и равной 18,2 м.

Таким образом, для каждой из калибровок исследована прокатка пяти блямов в семи проходах, всего 35 проходов по калибровке с увеличенным до 15—20% выпуском полок и 35 проходов по калибровке способом постепенного сгибания полок. Обработанные данные осциллограмм для каждого бляма приведены в табл. 10 и 11.

Средний расход энергии для прокатки одного бляма, равный для прямополочной калибровки $W_{пр.сп} = 19,53 \text{ квт} \cdot \text{ч}$ (см. табл. 10), относится к бляму средней длины $l_{сп} = 18,1 : 5 = 3,64 \text{ м}$.

Зная массу 1 пог. м бляма, рассчитываем по формуле (35) расход энергии на 1 т при прокатке на обжимной клети 900:

$$W_{01} = \frac{W_{пр.сп}}{Gl_{сп}} = \frac{19,53}{609,16 \cdot 3,64} = 8,837 \text{ квт} \cdot \text{ч/т}.$$

Взяв из табл. 11 средний расход энергии для прокатки одного бляма по калибровке способом постепенного сгибания, который равен $W'_{пр.сп} = 18,257 \text{ квт} \cdot \text{ч}$, определим расход энергии на одну тонну:

$$W'_{01} = \frac{W'_{пр.сп}}{Gl_{сп}} = \frac{18,257}{609,16 \cdot 3,64} = 8,237 \text{ квт} \cdot \text{ч/т}.$$

Снижение расхода энергии на 1 т проката при прокатке по калибровке способом постепенного сгибания на обжимной клети 900 составляет

$$\Delta W_{01} = \frac{W_{01} - W'_{01}}{W_{01}} \cdot 100\% = \frac{8,837 - 8,237}{8,837} \cdot 100\% = 6,8\%.$$

Из табл. 10 и 11 видно также, что при прокатке по калибровке способом постепенного сгибания уменьшилось среднее время цикла прокатки на клети 900 и составляет $t'_ц = 51,00 \text{ сек}$. При работе по прямополочной калибровке среднее время цикла прокатки на клети 900 было равно $t_ц = 55,18 \text{ сек}$.

Уменьшение цикла прокатки на клети 900 с внедрением калибровки способом постепенного сгибания составило

$$\Delta t_ц = \frac{t_ц - t'_ц}{t_ц} \cdot 100\% = \frac{55,18 - 51,0}{55,18} \cdot 100\% = 7,58\%.$$

Среднее время цикла прокатки на клети 900 по калибровке способом постепенного сгибания снижается вследствие уменьшения общего коэффициента вытяжки, который равен $\mu'_0 = 3,563$. При прокатке по прямополочной калибровке общий коэффициент вытяжки на клети 900 составил $\mu_0 = 5,434$. Кроме того, на клети 900 сократили число фасонных калибров с трех до одного, в связи с чем уменьшилось число передач из калибра в калибр (табл. 12). Вместе с тем, как видно из табл. 12, при прокатке по калибровке способом постепенного сгибания добавилась одна кантовка, что увеличило цикл прокатки. Анализ хронометражных замеров процесса прокатки показал, что производительность стана в целом при прокатке швеллера № 30 по калибровке способом постепенного сгибания определяется работой обжимной клети 900, где цикл прокатки равен 51 сек. Изменение размеров исходного бляма на $230 \times 340 \text{ мм}$ позволило при той же площади поперечного

Таблица 12

Режим обжатий на клети 900 при прокатке швеллера № 30

Номер		Показание стрелы	Толщина полосы	Обжатие	Ширина полосы	Уширение
калибра	прохода					
мм						
По прямополочной калибровке						
Кантовка 90°			320	—	245	—
II	1	120	280	40	255	10
	2	70	230	50	265	10
	3	20	160	50	275	10
III	4	55	101	64	280	5
	5	0	46	55	285	5
IV	6	0	34,5	11,5	300	15
V	7	0	23,5	11	310	10

По калибровке способом постепенного сгибания полок

I	1	95	245	—	320	—
	2	50	215	30	330	10
	3	10	170	45	340	10
Кантовка на 90°			130	40	350	10
II			350	—	130	—
II	4	130	340	10	130	0
	5	60	100	30	360	20
III	6	30	70	30	380	20
	7	0	40	30	400	20

сечения, сократить число проходов в клети 900 до пяти (табл. 13). Цикл прокатки теперь уже определяется клетями трио 850 и становится равным 42 сек, что соответственно повысило производительность стана. Таким образом фактическая производительность в час при прокатке швеллера № 30 по калибровке способом постепенного сгибания составила 175 т, а в смену достигла 1220 т.

Средний расход энергии на прокатку одного бруса во втором и третьем проходах по калибровке способом постепенного сгибания несколько выше, чем по прямополочной калибровке (рис. 43,а). Это объясняется большей шириной полосы. То же самое можно сказать относительно кривых средней мощности.

Таблица 13

Рекомендованный режим обжатий в клети дуо 900 при прокатке швеллера № 30 по калибровке способом постепенного сгибания

Номер		Показание стрелки	Толщина полосы	Обжатие	Ширина полосы	Уширение
калибра	прохода					
Исходные						
I	1	60	230		340	
	2	10	180	50	350	10
Каптовка на 90°			130	50	365	15
			365	—	130	—
II	3	130	340	25	130	—
			130	—	340	—
Каптовка на 90°						
III	4	40	80	50	370	30
	5	0	40	40	400	30

Согласно данным рис. 43,б кривые средних из максимальных значений тока по прямополочной калибровке

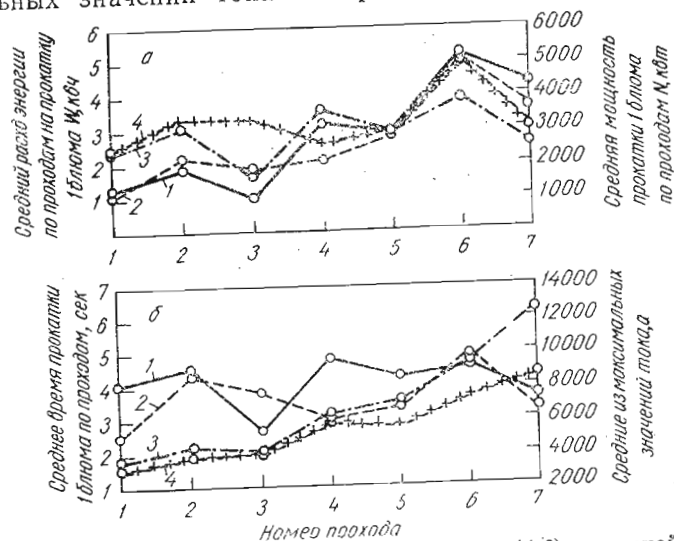


Рис. 43. Кривые среднего расхода энергии (1,2) и средней мощности (3,4) (а), максимальных значений тока (1,2) и среднего времени прокатки (3,4) (б) по проходам при прокатке швеллера № 30 на обжимной клети 900:
1,3 — по прямополочной калибровке; 2,4 — по калибровке способом постепенного сгибания

и развернутой калибровке способом постепенного сгибания переплетаются, но ни одна из точек кривых не лежит выше 10000 а. Из рис. 43,б видно также, что кривая среднего времени прокатки одного бляма по проходам в случае применения калибровки способом постепенного сгибания проходит ниже (кривая 4), чем при прокатке по прямополочной калибровке (кривая 3). Наибольшее различие во времени прокатки наблюдается в последних трех проходах.

Суммарный расход энергии на 1 т проката на обжимной клети 900, а также на I и II клетях трио 850 при прокатке по прямополочной калибровке равен:

$$\Sigma W_1 = W_{01} + W_{11} = 25,45 + 8,837 = 34,287 \text{ квт} \cdot \text{ч/т.}$$

Суммарный расход энергии на 1 т проката на обжимной клети 900 и на I и II клетях трио 850 при прокатке по калибровке способом постепенного сгибания составляет:

$$\Delta W'_1 = W'_{01} + W'_{11} = 24,12 + 8,237 = 32,357 \text{ квт} \cdot \text{ч/т.}$$

Снижение расхода энергии на обжимной клети дуо I и II клетях трио на 1 т при прокатке по калибровке способом постепенного сгибания будет

$$\Delta \Sigma W = \frac{\Sigma W_1 - \Sigma W'_1}{\Sigma W_1} \cdot 100\% = \frac{34,287 - 32,357}{34,287} \cdot 100\% = 5,5\%.$$

Экономия электроэнергии при прокатке швеллера № 30 по калибровке способом постепенного сгибания подтверждается также показаниями счетчиков обжимной и чистой линии стана. По показаниям счетчиков, которые снимались за период прокатки швеллера № 30 по прямополочной калибровке в количестве 10616 т, расход энергии на тонну составляет: $\Sigma W_{1\phi} = 42,21 \text{ квт} \cdot \text{ч/т}$, а при прокатке по калибровке способом постепенного сгибания в количестве 9555 т расход энергии на 1 т составляет $\Sigma W'_{1\phi} = 38,62 \text{ квт} \cdot \text{ч/т}$.

Снижение расхода энергии на 1 т швеллера № 30 при прокатке по калибровке способом постепенного сгибания по показаниям счетчиков составляет

$$\Delta \Sigma W'_{\phi} = \frac{\Sigma W_{1\phi} - \Sigma W'_{1\phi}}{\Sigma W_{1\phi}} \cdot 100\% = \frac{42,21 - 38,62}{42,21} \cdot 100\% = 8,5\%.$$

Увеличение абсолютных значений расхода энергии на 1 т проката по показаниям счетчиков в сравнении с рас-

ходом энергии, полученным из осциллограмм, объясняется тем, что в расход энергии, полученной из осциллограмм, входит расход энергии двигателем чистой (III) клети, а также расход энергии на разгон и холостой ход.

Таким образом, проведенное в производственных условиях сопоставительное исследование энергоскоростных параметров при получении швеллера № 30 по двум способам прокатки показывает, что применение развернутой калибровки способом постепенного сгибания полок наряду с ее высокой технологичностью обеспечивает снижение расхода энергии более, чем на 5%.

Кроме того, сокращение числа фасонных калибров с пяти до восьми позволило сократить цикл прокатки одного бляма, что обеспечило увеличение производительности фасонного стана при прокатке швеллера № 30 по калибровке способом постепенного сгибания на 15—20%.

2. ОПЫТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПЕРЕЖЕНИЯ И ОТСТАВАНИЯ В КАЛИБРАХ ПРИ ПРОКАТКЕ ШВЕЛЛЕРА № 30

Экспериментальные исследования опережения и характера скольжения прокатываемого металла в фасонных калибрах в производственных условиях сравнительно мало численны [10, 8, 11, 34 и др.]. Характер и величина скольжения прокатываемого металла в чистовых угловых и швеллерных калибрах определяли измерением опережения и вычислением коэффициента вытяжки. Опережение определяли керновым и электроконтактными методами. Известны и другие методы определения опережения [41, 42].

Керновым методом не получается достаточно точных результатов для горячей прокатки, а электроконтактные методы, применявшиеся в работах [40—42] хотя и дают хорошие результаты, но, к сожалению их трудно использовать в производственных условиях.

Учитывая недостатки применявшихся методов определения опережения, были использованы наиболее рациональные элементы этих методов [50]. Так, при измерении числа оборотов валков использовали специальный отметчик 5 (рис. 44), при помощи которого с достаточной точностью определяли расстояние, которое проходит любая точка калибра за данный промежуток времени [42].

Измерение опережения по данной методике заключается в следующем: на рольганге устанавливают на определенном расстоянии два фотоспротивления 2 и 3 типа ФСК-2, помещенные в металлические трубки длиной 350 мм. Оси трубок направлены на металл перпендикулярно линии его перемещения (см. рис. 44). При прохождении переднего конца горячей полосы 1 мимо первой трубки 3 засвечивается ФСК-2 и его сопротивление резко уменьшается, что фиксируется осциллографом 4. То же самое происходит при прохождении переднего конца полосы мимо второй трубки 2. За этот промежуток времени с помощью отметчика достаточно малых частей оборота валков на осциллограмме фиксируется расстояние, пройденное данной точкой калибра. Зная расстояние между осями трубок с фотоспротивлениями, т. е. расстояние, пройденное полосой, и расстояние, пройденное за это же время любой точкой калибра, можно вычислить опережение в данной точке. Этот способ позволяет также определить отставание при прокатке

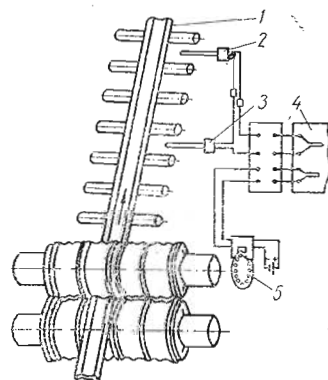


Рис. 44. Схема установки и подключения аппаратуры для измерения опережения металла при прокатке швеллера

В последнем случае измеряют движение заднего конца полосы.

Из стали Ст. 3 сп прокатывали швеллер № 30 по калибровке с увеличенным до 15—20% выпуском полок на рельсобалочном стане со средним диаметром валков $D_{cp} = 775$ мм при температурах:

Средняя температура, °C	1100	1090	1080
Номер прохода	1	2	3
Номер калибра	VII	VI	V

В процессе прокатки на фотопленку записывались части оборотов валков и при помощи фотоспротивления ФСК-2 отмечался момент прохождения переднего конца полосы через оси трубок, в которые вмонтированы фотоспротивления. Расстояние между осями трубок равнялось $l = 7280$ мм.

Для определения пути валков в промежуток времени, когда передний конец полосы проходит расстояние между осями трубок с фотоспротивлениями, на фотопленку осциллографа записывались части оборота валков, которые на фотопленке имеют вид зубцов. Всего на фотопленке была записана прокатка 28 полос. Среднее число зубцов, соответствующее расстоянию между осями трубок с фотоспротивлениями при прохождении полосы в соответствующем калибре, равно: 35,57 — в VII калибре; 46,50 — в VI и 35,29 — в V. Поскольку расстояние между двумя зубцами соответствует 1/12 части оборотов валков, то, разделив число зубцов на 12, получим число оборотов валков n в каждом калибре при прохождении передним концом полосы расстояний между осями трубок: $n_7 = 35,57 : 12 = 2,964$ оборотов, $n_6 = 46,5 : 12 = 3,875$ оборота; $n_5 = 35,29 : 12 = 2,941$ оборота.

Зная эти данные, можно определить диаметры, со скоростью которых выходит полоса из VII и V исследуемых калибров (для VI калибра определяется диаметр, со скоростью которого полоса входит в валки), по формуле:

$$D_{on} = \frac{l}{\pi n_n}, \quad (36)$$

где индекс n — номер калибра.

Для VII калибра указанный диаметр будет

$$D_{07} = \frac{l}{\pi n_7} = \frac{7280}{3,142 \cdot 2,964} = 782 \text{ мм.}$$

Для VI и V калибров эти диаметры, рассчитываемые по формуле (36), будут: $D_{06} = 599$ мм, $D_{05} = 795$ мм.

Для расчета среднего опережения S_h и отставания S_H определим средние рабочие диаметры D_{pn} калибров по формуле (20); при этом приведенная высота полосы после прохода по калибрам составит: $h_{n7} = 32,3$ мм; $h_{n6} = 24,5$ мм; $h_{n5} = 18,5$ мм.

Для VII калибра средний рабочий диаметр будет $D_{p7} = D_{cp} - h_{n7} = 775 - 32,3 = 742,7$ мм, для VI и V калибров, рассчитываемые аналогично по формуле (20), $D_{p6} = 750,5$ мм; $D_{p5} = 756,5$ мм. Тогда среднее опережение в VII и V калибрах и отставание в VI калибре можно найти по формуле:

$$S_{h,n} = \frac{D_{on} - D_{pn}}{D_{pn}} 100\%. \quad (37)$$

Для VII калибра среднее опережение будет:

$$S_{h7} = \frac{D_{07} - D_{p7}}{D_{p7}} 100\% = \frac{782 - 742,7}{742,7} 100\% = 5,29\%.$$

Рассчитанное по формуле (37) среднее опережение в калибре составит $S_{h5} = 5,09\%$ и среднее отставание в калибре $S_{h6} = 20,19\%$.

Для определения среднего опережения в VI калибре находим диаметр, со скоростью которого полоса выходит из VI калибра, по формуле

$$D_{06} = D'_{06} \mu_6,$$

где μ_6 — вытяжка в VI калибре.

Таблица

Скольжение металла на выходе (S) и входе (S') при прокатке в швеллерных калибрах по прямополочной калибровке и по калибровке способом постепенного сгибания полок

Номер калибра	Значения скольжения металла в точках					
	1	2	3	4	5	6
<i>Прокатка по прямополочной калибровке</i>						
VII	+20,8 +67,9	-13,5 +20,1	-3,4 +34,1	-2,4 +35,6	+0,5 +39,6	-23,1 +6,8
VI	+9,8 +43,9	-11,9 +15,5	-2,7 +27,5	-2,9 +27,2	+0,8 +32,1	-21,3 +43,9
V	-17,2 +53,6	-12,2 +15,4	-3,4 +26,7	-3,9 +26,0	+0,1 +31,4	-22,5 +53,6
<i>Прокатка по калибровке способом постепенного сгибания полок</i>						
VII	+0,8 +48,7	-13,8 +27,2	-1,9 +44,7	-4,4 +41,0	-1,0 +45,9	-8,0 +35,6
VI	-0,8 +53,0	-14,3 +30,0	-3,1 +47,0	-6,6 +41,8	-1,7 +49,2	-10,1 +30,2
V	+8,3 +49,7	-12,5 +21,2	-2,4 +35,1	-3,4 +33,6	+2,1 +41,2	-13,0 +19,0

Примечания. 1. В числителе указаны значения S, в знаменателе S', соответствующие точкам со штрихом на рис. 45. 2. Точки калибра, где валок отстает от металла, имеют знак минус, а где опережает — знак плюс.

Для нашего случая $D_{06} = D'_{06} \cdot \mu_6 = 599 \cdot 1,311 = 785 \text{ мм}$. Тогда по формуле (37) среднее опережение в VI калибре будет

$$S_{h6} = \frac{785 - 750,5}{750,5} 100\% = 4,6\%.$$

Теперь находим скольжение на входе и выходе в характерных точках 1—6 исследуемых калибров по формулам (27) и (28). При этом вытяжки $\mu_7 = 1,39$; $\mu_6 = 1,311$; $\mu_5 = 1,311$. Результаты расчетов приведены в табл. 14.

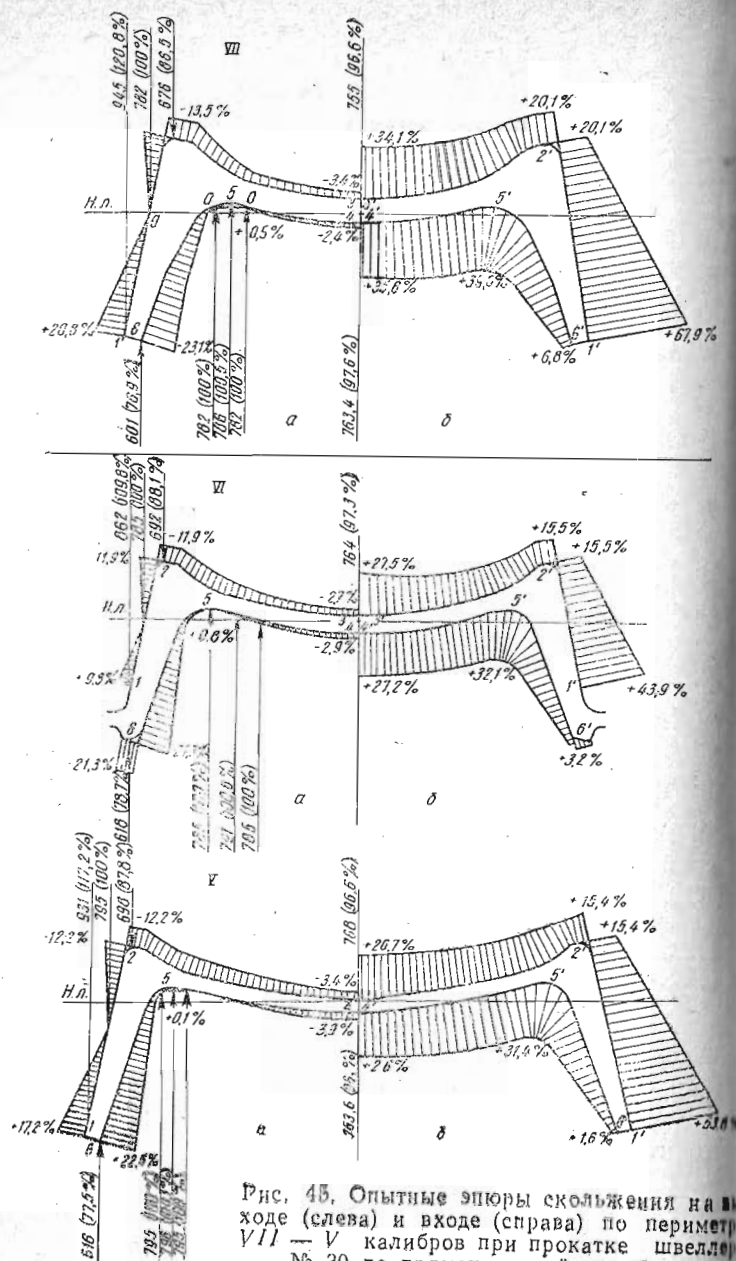
По опытным данным табл. 14 построены эпюры скольжения металла на входе и выходе в VII, VI и V калибрах (рис. 45).

Из схемы скольжения металла по периметру VII калибра следует, что максимальное скольжение на выходе составляет —23,1% (точка 6, рис. 45). В этой точке валки отстают от прокатываемого металла на 23,1%, а на входе (6') валки опережают металл, создавая скольжение, равное +6,8%. Это скольжение на входе является минимальным. На входе наибольшее скольжение в точке 1' и составляет +67,9%. На входе в точке 1 скольжение тоже достаточно большое и равно +20,8%. Следует отметить, что в точках 1—1' валки на всей длине очага деформации обгоняют прокатываемый металл, создавая относительно большое скольжение, что свидетельствует о большой работе сил трения и повышенном износе этих частей калибра.

Разница между максимальным и минимальным скольжением по периметру VII прямополочного калибра на входе составляет $67,9 - 6,8 = 61,1\%$. Это характеризует в известной мере и разность в относительной величине износа данных точек калибра.

Из схемы скольжения металла по периметру VI калибра (рис. 45), следует, что максимальное скольжение на выходе составляет —21,3%. В этой точке (6) валки отстают от прокатываемого металла на 21,3%. Максимальное скольжение валков относительно металла наблюдается на входе в точке 1 и равно +43,9%. Разница между максимальным и минимальным скольжением на входе VI калибра составит $43,9 - 3,2 = 40,7\%$.

Схема скольжения металла по периметру V калибра показывает, что максимальное скольжение на выходе в точке 6 равно —22,5%, а на входе в точке 1 составляет +53,6%. Разница между максимальным и минимальным



скольжениями на входе V калибра, влияющая на неравномерность износа валков, составляет $53,6 - 1,6 = 52,0\%$.

Для определения характера распределения работы сил трения по периметру прямополюсчатого швеллерного калибра необходимо построить опытные эпюры скольжения металла по длине очага деформации в ряде характерных точек периметра калибра. Для этого площади эпюр скольжения металла принимают пропорциональными работе сил трения.

Чтобы построить эпюры скольжения металла по длине очага деформации, нужно знать фактическую длину очага деформации в характерных точках периметра калибра и опытную величину скольжения металла в этих же точках на входе и выходе очага деформации. Последнее для случая прокатки в VII, VI и V калибрах I клетки трио 850 рельсобалочного стана по прямопальной калибровке приведено выше. Фактическую длину очага деформации в характерных точках исследуемых калибров определяют, как и ранее, графоаналитическим методом.

Чтобы найти фактическую длину очага деформации в характерных точках периметра прямополичного швеллерного калибра определяем обжатие в этих точках наложением исходной полосы на калибр, в котором она будет

прокатываться (рис. 46) при совмещении нейтральных линий полос и калибров. Данные определения обжатий от верхнего или нижнего валков в точках 1—6 приведены в табл. 15.

Для определения длины очага деформации нужно знать рабочие диаметры в выбранных точках. Затем по формуле

Таблица 15

Обжатия, рабочие диаметры и длина очага деформации в характерных точках исследуемых калибров

Номер калибра	Характерные точки исследуемых калибров					
	1	2	3	4	5	6
Обжатия, мм						
VII	3,3 —	9,2 9,0	3,3 5,0	3,3 5,0	8,2 15,0	3,3 10,0
VI	0,1 3,5	7,0 6,8	2,0 4,0	2,0 4,0	6,5 13,2	7,5 5,0
V	1,6 2,0	5,0 7,2	2,0 2,0	2,0 2,0	4,5 7,5	1,6 2,0
Рабочие диаметры, мм						
VII	945 —	676 726	775 826	763,4 805	786 833	601 775
VI	862 872	692 741	764 838	762 808,4	791 850	618 776
V	931 922	698 746	768 832	763,6 822,8	796 870	616 736
Длина очага деформации, мм						
VII	56 —	79 81	50 64	50 63	80 112	45 88
VI	9 55	70 71	39 58	39 57	72 106	68 63
V	38 43	59 73	39 41	39 41	60 81	31 38

Примечание. В числителе—способ калибровки прямополючный, в знаменателе—постепенным сгибанием.

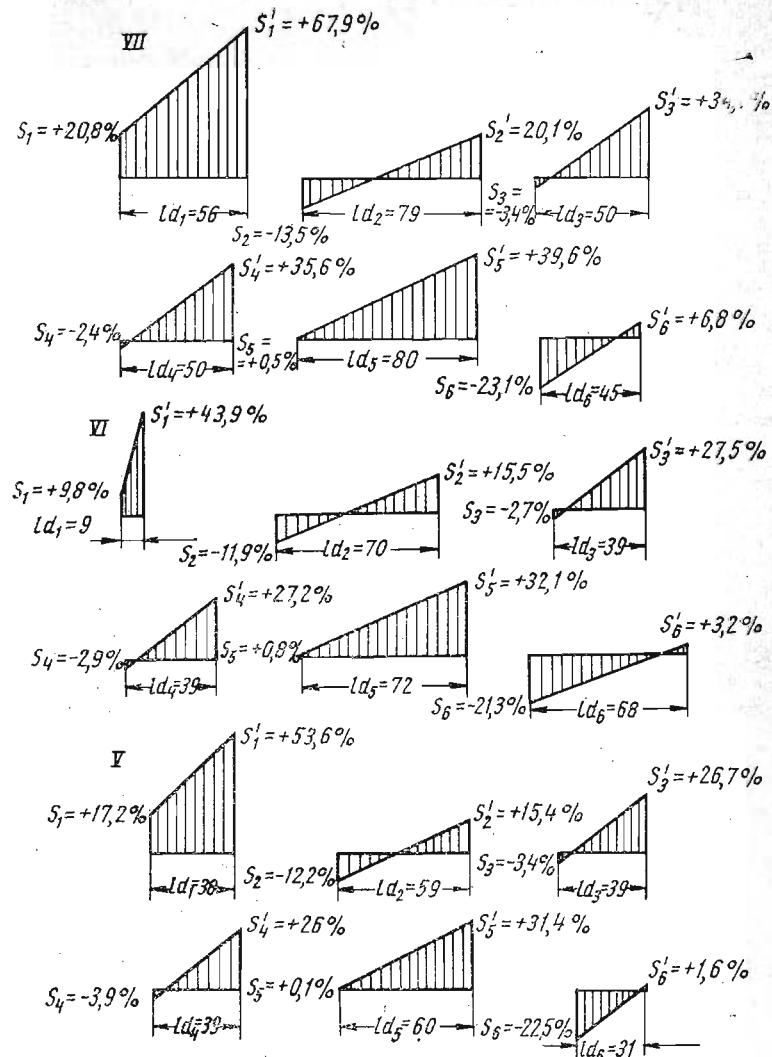


Рис. 47. Эпюры скольжения металла относительно валков по длине очага деформации в характерных точках VII — V калибров при прокатке швеллера № 30 по прямополючной калибровке

Таблица 16

Длина зон опережения и отставания и площади эпюр скольжения металла

Номер калибра	Точка	Длина зоны, мм		Суммарная площадь заштрихованных участков, мм ²
		опережения l_{Sh}	отставания l_{SH}	
VII	1	—	—	2484
	2	$\frac{31,7}{27,2}$	$\frac{47,3}{53,8}$	$\frac{688}{920}$
	3	$\frac{4,5}{2,6}$	$\frac{45,5}{61,4}$	$\frac{783}{1375}$
	4	$\frac{3,2}{6,1}$	$\frac{46,8}{56,9}$	$\frac{837}{1180}$
	5	$\frac{—}{2,4}$	$\frac{—}{109,6}$	$\frac{1604}{2516}$
	6	$\frac{34,8}{16,1}$	$\frac{10,2}{71,9}$	$\frac{437}{1348}$
	1	—	—	$\frac{241}{1479}$
	2	$\frac{30,4}{22,9}$	$\frac{39,6}{48,1}$	$\frac{488}{885}$
	3	$\frac{3,5}{3,6}$	$\frac{35,5}{54,4}$	$\frac{493}{1284}$
	4	$\frac{3,8}{7,8}$	$\frac{35,2}{49,2}$	$\frac{484}{1054}$
	5	$\frac{—}{3,5}$	$\frac{—}{102,5}$	$\frac{1184}{2524}$
	6	$\frac{59,2}{14,1}$	$\frac{8,8}{48,9}$	$\frac{644}{975}$
V	1	—	—	$\frac{1345}{1247}$
	2	$\frac{26,0}{27,1}$	$\frac{33,0}{45,9}$	$\frac{413}{656}$

Продолжение табл. 16

Номер калибра	Точка	Длина зоны, мм		Суммарная площадь заштрихованных участков, мм
		опережения l_{Sh}	отставания l_{SH}	
	3	$\frac{4,4}{2,6}$	$\frac{34,6}{38,4}$	$\frac{469}{677}$
	4	$\frac{5,1}{3,8}$	$\frac{33,9}{37,2}$	$\frac{451}{631}$
	5	—	—	$\frac{945}{1753}$
	6	$\frac{29,0}{15,6}$	$\frac{2,0}{22,4}$	$\frac{328}{324}$

Примечание. В числителе способ калибровки прямополочный, в знаменателе — постепенным сгибанием.

(31) находим фактическую длину очага деформации в точках 1—6 исследуемых калибров (табл. 15).

Опытные величины скольжения металла в точках 1—6 на входе и выходе исследуемых прямополочных калибров берем из табл. 14 и строим эпюры скольжения металла полосы относительно валков в характерных точках по длине очага деформации (рис. 47).

Принимаем работу сил трения пропорциональной площадям заштрихованных участков эпюр скольжения металла по длине очага деформации. Эти площади определяют, исходя из длины зоны опережения l_{Sh} и зоны отставания l_{SH} , которые рассчитываем по формулам (32) и (33). Результаты расчета длины зоны опережения и зоны отставания и площадей эпюр скольжения металла приведены в табл. 16.

На основании опытных данных по измерению скольжения в VII, VI и V прямополочных швеллерных калибрах и произведенных расчетов строим схемы распределения работы сил трения по периметрам исследуемых прямополочных калибров (рис. 48).

Если принять, что работа сил трения пропорциональна величине износа, построенные эпюры могут характеризовать износ прямополочных швеллерных калибров при

воздействии на них только скольжения прокатываемого металла в очаге деформации.

Из рис. 48 видно, что износ калибров в результате скольжения металла неравномерный из-за неравномерного распределения работы сил трения по периметру калибра. Максимального износа в VII и V калибрах от скольжения металла следует ожидать в точке 1 и в прилегающей к ней области на конце полки по верхнему валку и в точке 5 по гребню нижнего валка. В VI калибре максимальный износ можно ожидать в точке 5 и в прилегающей к ней области.

Скольжение металла при прокатке швеллера № 30 из стали Ст. 3 сп по калибровке способом постепенного сгибания полок исследовали на той же клети трио 850 рельсобалочного стана, что и по прямополочной калибровке. Средний диаметр валков $D_{cp} = 838$ мм. Температура после соответствующих проходов:

Средняя температура, °C	1120	1110	1100
Номер прохода	1	2	3
Номер калибра	VII	VI	V

Путь валков и полосы записывали с помощью осциллографа на фотопленку так же, как и при прокатке швеллера № 30 по прямополочной калибровке. Разделив число зубцов, зафиксированное отметчиком частей оборота валка на осциллограмме, на 12, получим число оборотов валков в каждом калибре при прохождении передним концом полосы расстояния между осями трубок с фотосопровождениями: $n_7 = 13,86$; $12 = 1,55$ оборота; $n_6 = 20,5$; $12 = 1,708$ оборота; $n_5 = 13,71$; $12 = 1,142$ оборота.

Определив по формуле (36) диаметры, со скоростью которых полоса выходит из VII и V калибров и входит в VI калибр при расстоянии между осями трубок $l = 3055$ мм, получим $D_{07} = 842$ мм, $D_{06} = 570$ мм и $D_{05} = 852$ мм. Затем для расчета среднего опережения и отставания найдем средние рабочие диаметры исследуемых калибров по формуле (20) при приведенных высотах полосы после прохода по калибрам $h_{п7} = 35,6$ мм; $h_{п6} = 23,6$ мм; $h_{п5} = 18,4$ мм. Тогда $D_{p7} = 802,4$ мм; $D_{p6} = 814,4$ мм; $D_{p5} = 819,6$ мм.

Среднее опережение в VII и V калибрах и отставание в VI калибре, рассчитываемое по формуле (37), будет равно: $S_{н7} = 4,94\%$; $S_{н5} = 3,95\%$ и $S_{Н6} = 29,97\%$.

Диаметр, со скоростью которого полоса выходит из VI калибра, определим по формуле (38) при $\mu_6 = 1,518$; он будет равен $D_{06} = 865$ мм. Далее по формуле (37) находим среднее опережение в этом калибре, оно равно 6,21%.

Теперь, как и выше, находим скольжение на входе и выходе в характерных точках 1—6 исследуемых калибров. При этом значения вытяжек следующие: $\mu_7 = 1,473$; $\mu_6 = 1,518$; $\mu_5 = 1,383$. По опытным данным табл. 14 построены эпюры скольжения металла на выходе и входе в VII, VI и V калибрах (рис. 49).

Из эпюры скольжения металла по периметру VII швеллерного калибра при прокатке по калибровке способом постепенного сгибания следует, что максимальная величина скольжения на выходе равна 13,8% (точка 2). В этой точке валки отстают от прокатываемого металла на 13,8%, а на входе в этой же точке (точка 2') опережают металл, создавая скольжение, равное 27,2%. На входе это скольжение является наименьшим. В точках 1-1', наоборот, на выходе величина скольжения имеет наименьшее значение 0,8%, а на входе — наибольшее +48,7%. Разница между максимальным и минимальным скольжением по периметру VII развернутого калибра на входе составляет

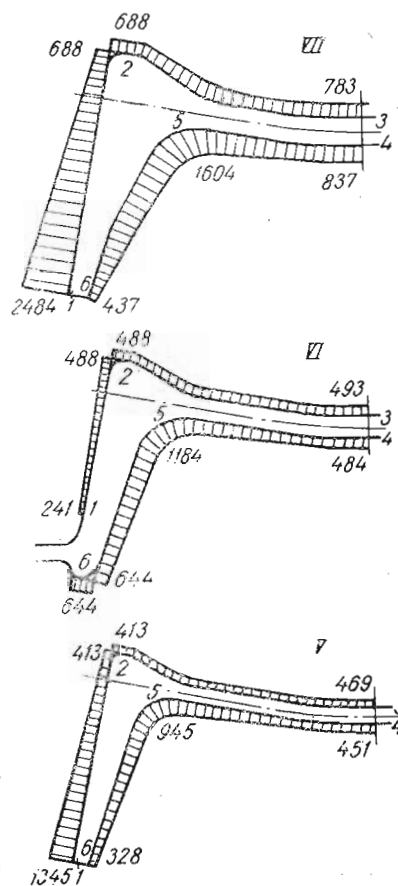


Рис. 48. Схемы эпюр распределения работы сил трения по периметрам VII—V калибров при прокатке швеллера № 30 по прямополочной калибровке

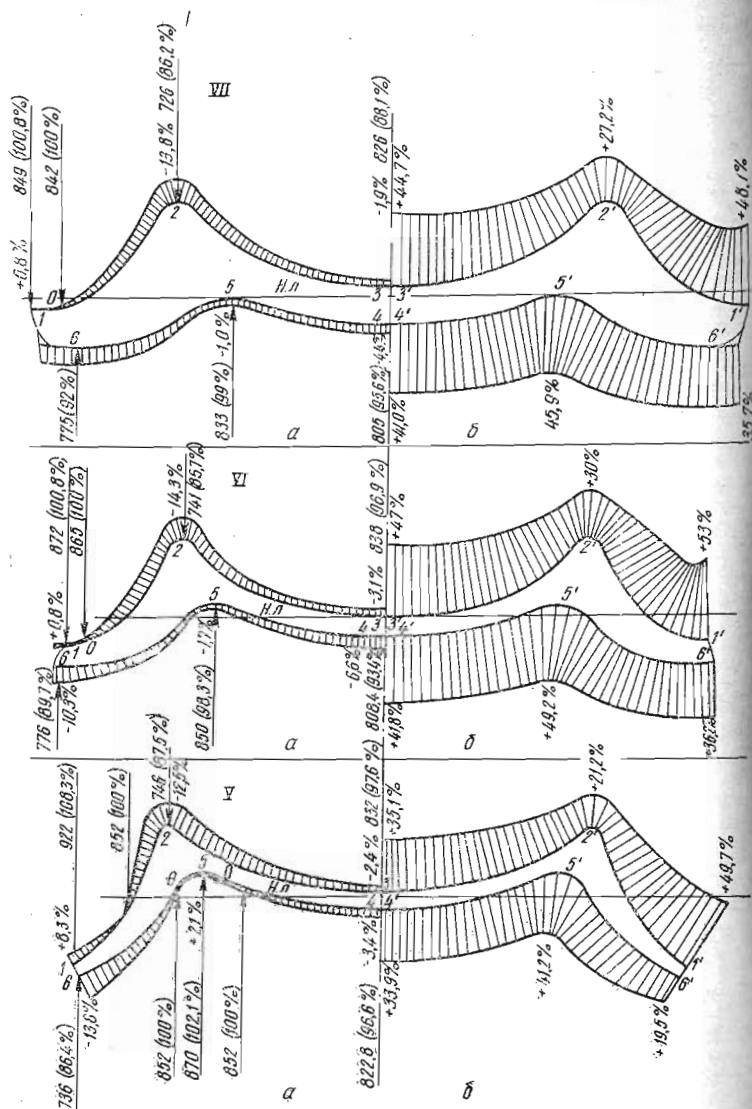


Рис. 49. Опытные эпюры скольжения металла относительно валков на выходе (а) и входе (б) по периметру VII — V калибров при прокатке швеллера № 30 при калибровке способом постепенного сгибания

18,7—27,2 — 21,5% против 61,1% в VII прямополочном калибре.

Кроме того, сравнивая эпюры распределения скольжения металла по периметру VII прямополочного швеллерного калибра (см. рис. 45) и развернутого (рис. 49), можно отметить, что на выходе величина скольжения металла относительно валков в прямополочном калибре имеет наибольшее значение на конце полки: в точке 1 оно равно 20,8% и в точке 6 соответственно —23,1%. В этих же точках в случае развернутого калибра скольжение соответственно равно -0,8% и -8,0%. На входе прямополочного калибра наибольшее скольжение так же наблюдается в точке 1' и равно +67,9%, а в случае развернутого калибра оно составляет +48,7%. Все это указывает на существенное уменьшение скольжения металла в развернутых калибрах в сравнении с прямополочными.

Аналогичная картина получается при сравнении эпюры распределения скольжения по периметру VI и V прямополочных (см. рис. 45) и развернутых (см. рис. 49) швеллерных калибров.

Таким образом, экспериментальное сопоставительное исследование скольжения металла при прокатке швеллеров по двум способам прокатки показывает, что по способу постепенного сгибания полок скольжение металла полосы относительно валков меньше, чем по прямополочному вследствие меньшего различия рабочих диаметров валков по периметру калибра. Важно отметить, что по ширине калибра развернутой калибровки разница величины максимального и минимального скольжений в два — три раза меньше, чем при прямополочной калибровке. Следовательно, в случае развернутой калибровки износ по периметру калибра в зависимости от скольжения металла относительно валков будет более равномерным. Последнее, по мере износа калибра, позволяет путем настройки валков сохранить размеры профиля без нарушения режима обжатия (калибровки) и добиться экономии массы погонного метра швеллера.

Из рассмотренного следует, что применением развернутой калибровки способом постепенного сгибания полок достигается, во-первых, уменьшение скольжения металла относительно валков, что способствует повышению их стойкости и, во-вторых, благодаря более равномерному распределению скольжения по периметру калибра по мере

износа валков появляется возможность поддерживать размеры профиля путем настройки (подъема нижнего и опускания верхнего валков) без нарушения режима обжатия по проходам.

Исследование распределения сил трения по периметру швеллерных калибров при прокатке по способу постепенного сгибания полос выполнено по той же методике, что и для прямополочной калибровки, при этом наложенные исходных сечений полос на соответствующие калибры

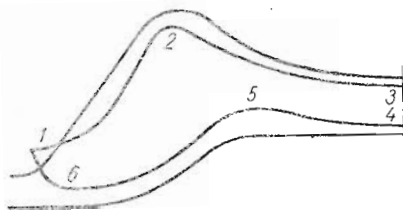


Рис. 50. Схема распределения обжатий в VII калибре при прокатке швеллера № 30 по калибровке способом постепенного сгибания

полос (см. табл. 14), строим эпюры скольжения металла полосы относительно валков в характерных точках по длине очага деформации (рис. 51). Определив, как и выше, длину зоны опережения l_{Sh} и зоны отставания l_{SH} и рассчитав площади эпюр скольжения металла (см. табл. 16), строим схемы эпюр распределения работы сил трения по периметру соответствующих развернутых и переходного калибров (рис. 52).

Принимая, что величина износа элементов калибров пропорциональна работе сил трения, построенные эпюры могут характеризовать износ развернутых и переходного кривополочного швеллерных калибров при воздействии на них только одного фактора — скольжения прокатываемого металла относительно валков в очаге деформации.

Из сравнения эпюр распределения работы сил трения по периметрам прямополочных (см. рис. 48) и развернутых (см. рис. 52) швеллерных калибров можно сделать вывод, что в развернутых калибрах распределение работы сил трения по периметру более равномерное, чем у прямополочных. Следовательно, при применении калибровки

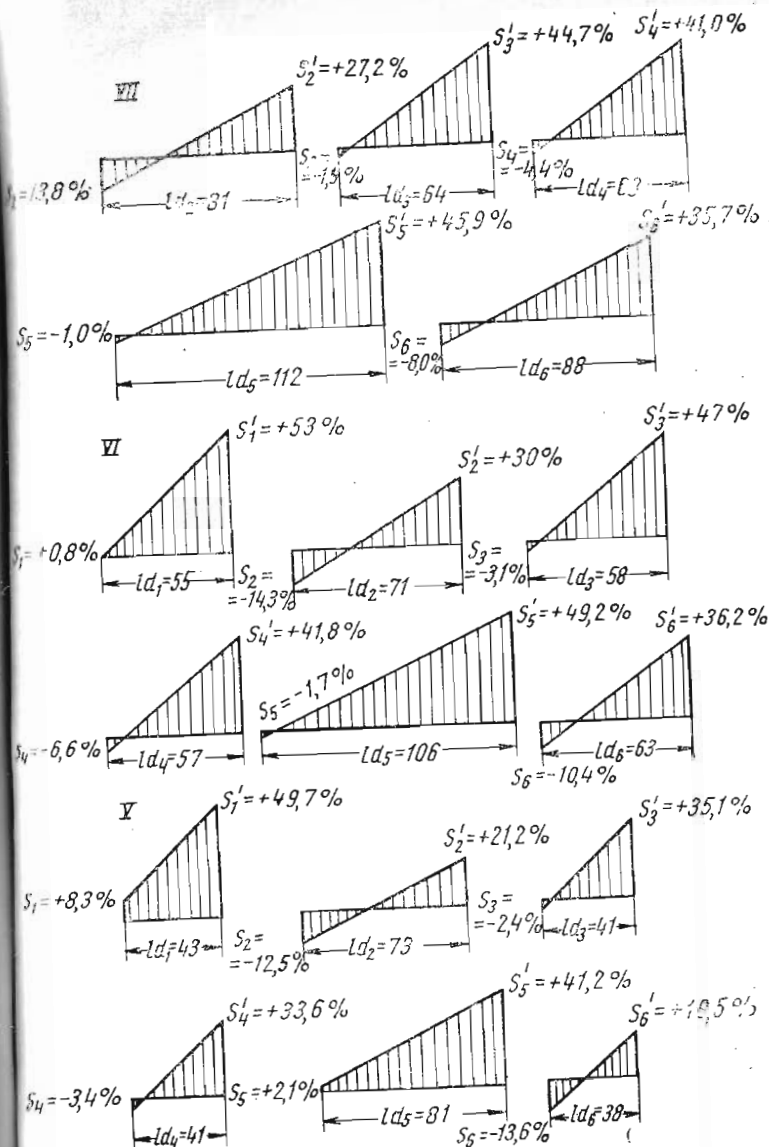


Рис. 51. Эпюры скольжения металла относительно валков по длине очага деформации в характерных точках VII — V калибров при прокатке швеллера № 30 по калибровке способом постепенного сгибания

способом постепенного сгибания следует ожидать более равномерного износа калибров, который к тому же может быть компенсирован сближением валков, так как элементы швеллерного калибра располагаются в этом случае почти горизонтально.

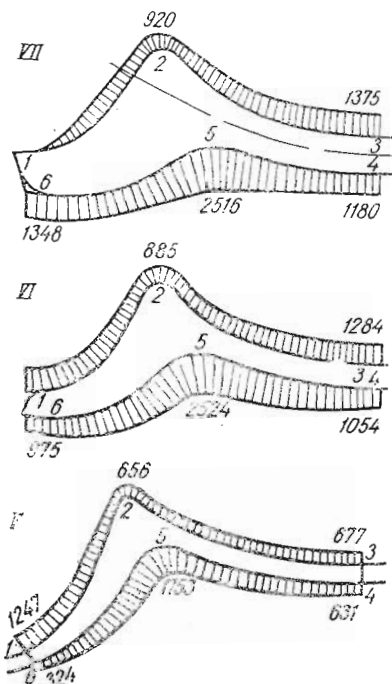


Рис. 52. Схемы эпюр распределения работы сил трения по периметру VII — V калибров при прокатке швеллера № 30 по калибровке способом постепенного сгибания

развернутой калибровке способом постепенного сгибания полок по сравнению с прямополочной калибровкой получается более равномерное распределение сил трения по периметру развернутого калибра. Последнее должно привести к большей равномерности износа этих калибров.

Проведенное исследование показало также, что экспериментальное определение характера распределения и величины скольжения при прокатке способом постепенного сгибания полок позволяет определить работу сил трения

и возможный износ калибра и учесть этот износ путем соответствующего изменения размеров калибров при их рас-

чете и последующих переточках. Кроме того, найденные экспериментальным путем значения скольжения металла и распределения работы сил трения по периметру калибра при прокатке швеллеров позволяют оценить приемлемость расчетного определения этих показателей в тех же калибрах. Сопоставление экспериментальных и расчетных значений скольжения металла и работы сил трения в характерных точках соответствующих калибров указывает на удовлетворительное их совпадение. Это свидетельствует о возможности применения этой методики для определения расчетного характера распределения и величины скольжения металла и работы сил трения в швеллерных калибрах.

Таким образом, при прокатке швеллеров больших номеров по

и возможный износ калибра и учесть этот износ путем соответствующего изменения размеров калибров при их рас-

чете и последующих переточках. Кроме того, найденные экспериментальным путем значения скольжения металла и распределения работы сил трения по периметру калибра при прокатке швеллеров позволяют оценить приемлемость расчетного определения этих показателей в тех же калибрах. Сопоставление экспериментальных и расчетных значений скольжения металла и работы сил трения в характерных точках соответствующих калибров указывает на удовлетворительное их совпадение. Это свидетельствует о возможности применения этой методики для определения расчетного характера распределения и величины скольжения металла и работы сил трения в швеллерных калибрах.

3. ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНОСА ВАЛКОВ ПРИ ПРОКАТКЕ ШВЕЛЛЕРА № 30

Исследования износа валков в производственных условиях при прокатке фасонных профилей также малочисленны [10, 8, 28, с. 275, 44]. В данной работе изучали износ валков при прокатке швеллера № 30 на I и II клетях трио 850 рельсобалочного стана по прямополочной калибровке с увеличенным до 15—20% выпуском полок и для тех же калибров при прокатке по калибровке способом постепенного сгибания.

Для определения износа швеллерных калибров были изготовлены специальные составные шаблоны (рис. 53). Рабочие части этих шаблонов подгоняли по действующим контршаблонам. По краям шаблонов привинчивали установочные планки с пазами, вдоль которых они свободно могли передвигаться и при помощи винтов их укрепляли.

Перед закладкой валков в рабочую клеть шаблоны плотно устанавливали по контуру ручья и с помощью средних установочных планок и винтов плотно скрепляли обе половинки шаблона. Крайние установочные планки закрепляли винтами так, чтобы их нижние грани плотнее лежали на буртах вала. Во время предварительной установки шаблонов проверяли правильность расточки калибров, а щупами в заранее определенных точках фиксировали все зазоры. При этом отмечали: номер комплекта вала, калибра и место расположения шаблона на валке. После

работы и износа калибров валки удаляли из клетки и шаблоны устанавливали на место предварительной установки, и измеряли зазоры по контуру ручья в тех же точках. Износ измеряли в 19—26 точках периметра калибра; точки измерений отмечены цифрами и равномерно распределены по периметру калибра (рис. 54). Число точек зависит от протяженности контура ручья. Разница в измерениях до и после прокатки дает величину износа в данной точке калибра.

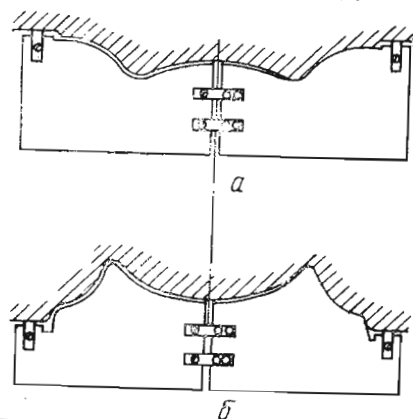


Рис. 53. Составные шаблоны для измерения износа валков: а — для открытой части калибра; б — для закрытой части калибра

Износ калибров по обеим калибровкам измеряли в течение нескольких кампаний. Вместе с тем отмечали количество прокатанного на данном калибре металла.

Износ валков при прокатке является процессом, зависящим от многих факторов. Характер износа валков служит объективным критерием рациональности калибровки, от-

ражающим взаимодействие параметров деформации металла, заложенных в том или ином варианте калибровки, с целым рядом технологических параметров.

Основными факторами, определяющими степень износа валков по результатам ряда исследований [45, 46, 10, 8, 6, 28, с. 275; 44] являются: скольжение металла в очаге деформации, режим обжатия, температурные условия прокатки, химический состав и качество материала валков, химический состав прокатываемого металла и др. При этом различают абсолютный износ калибров, представляющий собой изменение их размеров в ходе эксплуатации валков, и неравномерный износ, т. е. неравномерное по периметру увеличение размеров калибра, которое не может быть исправлено настройкой стана.

Применительно к прокатке швеллеров абсолютный износ зависит от способа прокатки, определяющего скольжение прокатываемого металла относительно валков, рас-

пределение работы сил трения по периметру калибра и неравномерность деформации в калибре, а также от химического состава и температуры прокатываемого металла, твердости поверхностного слоя валков и других факторов. Неравномерность износа, как и выше, зависит от способа прокатки, т. е. неравномерности распределения по периметру калибра скольжения металла и работы сил трения, а также неравномерности деформации в калибре; кроме того, на неравномерность износа калибра оказывает влия-

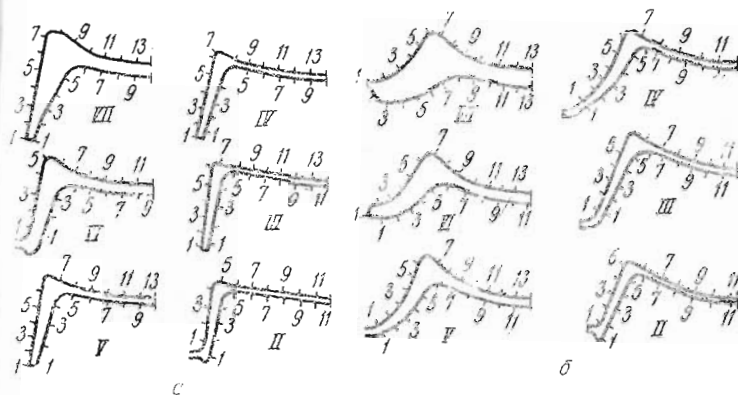


Рис. 54. Расположение точек измерения износа по контуру прямополочных (а) и развернутых способом постепенного сгибания (б) калибров при прокатке швеллера № 30

ние неравномерный нагрев прокатываемого металла по сечению полосы, неравномерная твердость металла валков по периметру калибра, неудовлетворительная настройка стана и другие факторы.

При сравнении двух способов прокатки следует учитывать, что химический состав прокатываемой стали, материал валков, их твердость, неравномерность нагрева заготовки и другие факторы остаются в среднем неизменными.

Способ прокатки вносит изменения в режим обжатия, изменяет характер неравномерности деформации и работы сил трения по периметру калибров, а также в температурные условия прокатки. Анализируя изменение именно этих условий, можно судить о характере износа системы предлагаемых кривополочных калибров.

Фактический износ дает общую картину взаимодействия всех факторов, из которой трудно выделить отдельное влияние той или иной причины износа калибров. Однако при расчете калибровки можно и нужно учитывать влияние отдельных факторов, но пока не представляется возможным аналитически создать общую картину износа. Поэтому представляет интерес сопоставление фактической картины износа валков и аналитического исследования тех факторов, способствующих износу калибров, действие которых предопределено способом прокатки. В частности, при прокатке швеллеров по прямополочной и развернутой калибровкам рассмотрим здесь неравномерность работы сил трения по периметру калибра и температурные условия прокатки.

Для калибровки швеллеров способом постепенного сгибания в сравнении с прямополочной, характерна меньшая глубина вреза калибров, что уменьшает разницу окружных скоростей по периметру калибра и обуславливает меньшее скольжение и более равномерное распределение по периметру калибра работы сил трения. По мере спрямления полок возрастает глубина вреза калибров в валки и соответственно уменьшается различие с точки зрения величины и характера износа между прямополочной калибровкой и калибровкой способом постепенного сгибания, которое практически сходится на нет в последних по ходу прокатки калибрах.

Из эпюр распределения работы сил трения в прямополочных и развернутых швеллерных калибрах (см. рис. 48 и 52) видно, что для прямополочной калибровки отмечается максимум работы сил трения, соответствующий верхнему ручью калибра со стороны полки профиля.

Для сравнения неравномерности работы сил трения по элементам профиля принимаем за единицу ее величину в точке 2. Тогда для прямополочной калибровки (см. рис. 48) по верхнему ручью максимум со стороны полки (точка 1) будет для VII калибра в 3,6 раза, а для V в 3,26 раза выше (рис. 55). Для развернутой калибровки способом постепенного сгибания эти показатели неравномерности работы сил трения ниже и составляют 1,0 для VII и 1,9 для V калибров.

По нижним ручьям неравномерность распределения работы сил трения существенно не отличается.

Для калибровки способом постепенного сгибания по мере спрямления и оформления полок неравномерность распределения сил трения по периметру калибра будет непрерывно возрастать за счет увеличения ее в точке 1. Так, если в VII калибре она равна 1,0, то в VI и V соответственно в 1,67 и 1,90 раза выше, чем в точке 2 соответствующего калибра (см. рис. 52 и 55). Различие в неравномерности скольжения прокатываемого металла в очаге деформации для прямополочной калибровки и калибровки способом постепенного сгибания, значительное для I кле-

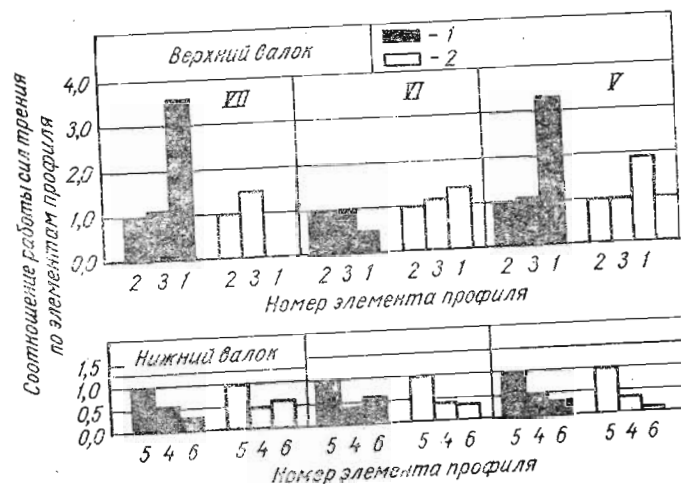


Рис. 55. Соотношение работы сил трения по элементам профиля при прокатке в I клети 850:
1 — по прямополочной калибровке; 2 — по развернутой

ти трио, затем по ходу прокатки постепенно уменьшается и на II клети трио сходится на нет. В связи с этим можно ожидать значительно большего износа прямополочных калибров валков I клети трио по сравнению с износом развернутых калибров этой же клети.

Второй фактор, значительно влияющий на износ, это температурные условия прокатки.

В процессе прокатки происходит постоянное изменение температурных условий деформации, которое характеризуется понижением средней температуры полосы от одного прохода к другому, а также постепенным увеличением раз-

ницы температуры между отдельными элементами профиля.

При понижении средней температуры металла его сопротивление пластической деформации, а также коэффициент внешнего трения увеличивается, что вызывает повышение удельного давления и абсолютного износа валков.

Фланцевые профили в отличие от сортовых имеют неравномерную толщину и площадь поперечного сечения отдельных элементов. Так, например, готовый швеллерный профиль № 30 в горячем состоянии (с учетом минусовых допусков) имеет: высоту стенки $h = 300,3$ мм, толщину стенки $d = 6,5$ мм, ширину полки $b = 101$ мм и среднюю толщину $t = 11$ мм; при этом толщина полки у основания $14,5$ мм, а у вершины $6,0$ мм. Площадь полки $1052,5$ мм², а стенки 1955 мм². Соответствующая неравномерность толщины и площадей полок и стенки имеется у предчистовых и черновых швеллерных профилей. Естественно, что длинная и тонкая стенки, а также тонкий конец полки охлаждаются быстрее, чем массивное основание полки. Вследствие этого можно ожидать, что температура по сечению прокатываемого швеллерного профиля будет очень неравномерной. Специально проведенным исследованием при прокатке швеллера № 10 установлено [8], что в чистовом калибре перепад температуры между основанием и краем полки составил 30 град, а между серединой стенки и закруглением в месте перехода от полки к стенке — примерно 60 град.

Поскольку температура краев полок и середины стенки более низкая по сравнению с остальными частями швеллерного профиля, то их сопротивление пластической деформации выше. Кроме того, в связи с понижением температуры краев полок и середины стенки коэффициент трения между этими элементами профиля и теми частями калибра, которые их обрабатывают, также будет большим, чем в остальной части калибра. Это приводит к соответствующему повышению износа фланцев и шейки калибра по сравнению с теми частями, которые обрабатывают основание полки швеллера.

Следовательно, ввиду неравномерного распределения температуры по сечению профиля износ швеллерных калибров оказывается также неравномерным, в частности наблюдается усиленный износ участков калибра, обрабатывающих края полок и середину стенки швеллера [8].

Влияние температурных условий прокатки как показывают опытные данные, в ряде случаев очень значительно. Поэтому изыскание более благоприятных температурных условий прокатки — важное обстоятельство, обеспечивающее уменьшение износа калибров валков.

На температурные условия прокатки оказывают влияние не только внешний и внутренний тепловой поток в процессе понижения температуры металла при деформации, но и отношение площади поверхности полосы к ее объему $\left(\frac{F}{V}\right)$ или периметра сечения к его площади $\left(\frac{P}{S}\right)$. Внешний тепловой поток определяется интенсивностью лучеиспускания, зависящей от температурного перепада Δt между обрабатываемым металлом t_m и окружающей средой $t_{o.c.}$, а внутренний — теплопроводностью металла. Последнее зависит от химического состава металла и при различных условиях процесса прокатки для одного и того же обрабатываемого металла является постоянным.

Следовательно, для данных условий процесса температурные условия будут определяться температурным перепадом Δt и отношением площади поверхности к ее объему $\left(\frac{F}{V}\right)$, называемым удельной поверхностью. Опытные данные показывают, что чем больше температурный перепад и удельная поверхность, тем больше интенсивность охлаждения металла.

Удельный вес влияния обоих факторов на интенсивность охлаждения металла определяется их степенью изменения в процессе прокатки. Так, при прокатке швеллера № 30 температура заготовки при подаче к стану составляет 1220°C , а температура конца прокатки 800°C . Тогда температурный перепад, определяемый как $\Delta t = t_m - t_{o.c.}$, будет для начала прокатки $\Delta t_n = 1220 - 20 = 1200^\circ\text{C}$, а для конца прокатки $\Delta t_k = 800 - 20 = 780^\circ\text{C}$. Их отношение, характеризующее степень изменения температурного перепада в процессе прокатки (без учета повышения температуры благодаря деформации металла), будет

$$\frac{\Delta t_n}{\Delta t_k} = \frac{1200}{780} = 1,54.$$

Удельная поверхность прокатываемой полосы зависит от способа прокатки швеллеров. При прокатке швеллера

№ 30 по прямополочной калибровке с увеличенным до 15–20% выпуском полок удельная поверхность $F/V = \frac{pL}{Sl} = \frac{p}{S}$ по проходам будет иметь большие значения, чем по развернутой калибровке способом постепенного сгибания полок, что видно из данных рис. 56. При этом

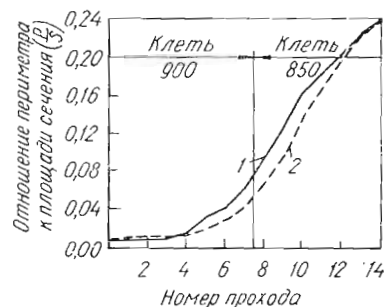


Рис. 56. Изменение отношения периметра к площади сечения полосы (p/S) по проходам при прокатке швеллера № 30 по прямополочной (1) и развернутой (2) калибровкам

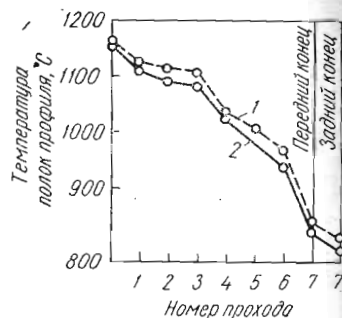


Рис. 57. Изменение температуры полки профиля по проходам при прокатке швеллера № 24 на чистовой линии стана по прямополочной (2) и развернутой (1) калибровкам

для исходного блюма сечением 280×340 мм и периметром 1240 мм удельная поверхность $\left(\frac{p}{S}\right)_н = 0,013$, а для конечного швеллерного профиля сечением 4060 мм² и периметром 915 мм его значение будет $\left(\frac{p}{S}\right)_к = 0,225$. Следовательно, степень изменения удельной поверхности $\left(\frac{p}{S}\right)_к : \left(\frac{p}{S}\right)_н = \frac{0,225}{0,013} = 17,3$.

Из этого следует, что общее увеличение удельной поверхности полосы к концу прокатки составляет более чем в 17 раз, т. е. оно превышает температурный перепад и является определяющим.

Важно отметить, что в процессе прокатки в черновых швеллерных калибрах степень увеличения удельной поверхности по прямополочной калибровке в среднем на 25% больше, чем по развернутой калибровке способом

постепенного сгибания (см. рис. 56). Это должно привести к более интенсивному охлаждению полосы при получении швеллера по первому способу прокатки.

Для проверки этого положения были проведены измерения температуры металла при прокатке швеллера № 24 на рельсобалочном стане по прямополочной калибровке с увеличенным выпуском полок и по развернутой калибровке способом постепенного сгибания полок¹.

При прокатке по прямополочной калибровке измерения проводили в начале, середине и конце смены при установившемся темпе прокатки в течение трех кампаний, а по развернутой калибровке — в течение двух кампаний. Всего по прямополочной калибровке проведено 893 измерений, а по развернутой 457. При этом температуру полосы измеряли при прокатке на дуо-реверсивной клети 900 после пятого прохода фотоэлектрическим пирометром, а при прокатке в черновых клетях трио 850 — после каждого прохода по полкам в средней части полосы (в момент выхода ее из валков) с помощью оптического пирометра ОППИР-09. После чистовой клети дуо 850 температуру переднего и заднего концов измеряли по полкам. Данные измерений приведены в табл. 17 и на рис. 57.

Из полученных данных следует, что суммарное падение температуры на чистовой линии стана составляет по прямополочной калибровке 343–373 град, а по развернутой 325–357 град. При длине полос после чистовой клети 65–70 м температура заднего конца полосы в среднем на 30–32 град ниже температуры переднего конца.

Приведенные данные отчетливо показывают, что при прокатке швеллера № 24 по калибровке способом постепенного сгибания температура металла во всех проходах в клетях чистовой линии в среднем на 20 град выше, чем при прокатке по прямополочной калибровке. Это подтвердило вывод, сделанный ранее, исходя из степени увеличения удельной поверхности полосы. Как и следовало ожидать, охлаждение металла при прокатке по прямополочной калибровке оказалось более интенсивным.

Температура металла обусловлена формой и размером первых по ходу прокатки прямополочных и развернутых калибров. При прокатке швеллера № 24 по развернутой калибровке в обжимной клети 900 первые четыре прохода

¹ Измерения температуры проводились прокатной лабораторией ЦЗЛ завода «Азовсталь».

Таблица 17

Данные измерений температуры полок профиля по проходам при прокатке швеллера № 24 по прямополочной (числители) и развернутой (знаменатели) калибровке

Номер прохода	Число измерений	Сумма температур, °С	Средняя температура, °С	Пределы колебаний, °С
После клетки 900	106	123095	1161	1200—1140
	63	73430	1165	1200—1140
1	104	115200	1108	1140—1070
	50	56330	1127	1150—1100
2	103	112305	1090	1130—1055
	50	55795	1116	1140—1090
3	108	116905	1082	1115—1050
	48	53370	1110	1130—1085
4	101	102700	1017	1050—990
	49	50560	1032	1050—1010
5	100	97375	974	1000—940
	49	59380	1007	1020—980
6	104	97365	936	970—900
	49	47380	966	990—940
7 (передний край)	101	82630	818	850—780
	49	41175	840	860—810
7 (задний край)	66	52030	788	820—760
	50	40385	808	830—780

производятся в ящичных калибрах и только в пятом проходе начинается оформление черного швеллерного профиля. При прокатке же по прямополочной калибровке оформление черного профиля начинается уже с четвертого прохода и происходит более интенсивно, вследствие чего отношение $\frac{p}{S}$, начиная с четвертого прохода, в обжимной клетки 900 для прямополочной калибровки выше, чем для развернутой (см. рис. 56). Поэтому при одинаковых исходных условиях температура полосы, прокатываемой по прямополочной калибровке, снижается быстрее, чем по развернутой (см. рис. 57). Следовательно, полосы,

прикатываемые по развернутой калибровке способом постепенного сгибания и имеющие меньшую, чем по прямополочной калибровке, удельную поверхность теплоизлучения, сохраняют тепло в первых калибрах, тем самым создается его запас при прокатке в последующих калибрах.

Повышение температуры прокатки по развернутой калибровке способствует уменьшению сопротивления металла деформации, позволяет интенсифицировать режим деформации, создает лучшие условия для прокатки швеллеров в пределах минусового допуска

При прокатке швеллеров по развернутой калибровке наблюдается также некоторый перепад температур между отдельными элементами профиля; в частности, температура края полки и посередине стенки ниже, чем у основания полки. Однако величина перепада меньше, чем это отмечено в работе [8] при прокатке швеллеров по прямополочной калибровке. Последнее показывает, что при прокатке по развернутой калибровке удалось не только сохранить более высокую температуру полосы, но благодаря более позднему оформлению профиля и более высокой средней температуре металла уменьшилось различие температуры отдельных элементов профиля, а это должно способствовать уменьшению неравномерности износа развернутых швеллерных калибров.

В практике изучения износа калибров обычно пользуются его абсолютной величиной, выраженной в миллиметрах. Этот показатель удобен при описании общей картины износа. Однако при сравнительной оценке двух калибровок это не совсем удобно, так как трудно, чтобы партии прокатываемого металла были одинаковой массы. Поэтому в данной работе для сравнения взят показатель износа, отнесенный к 1 т прокатанного металла. Износ калибров измеряли после каждой закладки металла в течение пяти кампаний, прокатавших по прямополочной калибровке в сумме на I клетки трио 9860 т и на II клетки трио 8650 т.

При прокатке по калибровке способом постепенного сгибания измерения износа производились после каждой закладки в течение трех кампаний, в период которых на I клетки трио было прокатано 7350 т и на II клетки трио — 5800 т проката. Валки для прямополочной и развернутой калибровки были изготовлены из стали 55Х.

На шаблоне по левой и правой части контура ручья калибра симметрично намечалось равное число точек измерений (см. рис. 54). Результаты измерений в симметричных точках правой и левой частей калибров усреднялись. Полученные после каждой закладки валков абсолютные величины износа приводились к 1 м прокатанного металла данным комплектом валков и затем усреднялись для одинаковых точек контура калибра. Средние значения в точ-

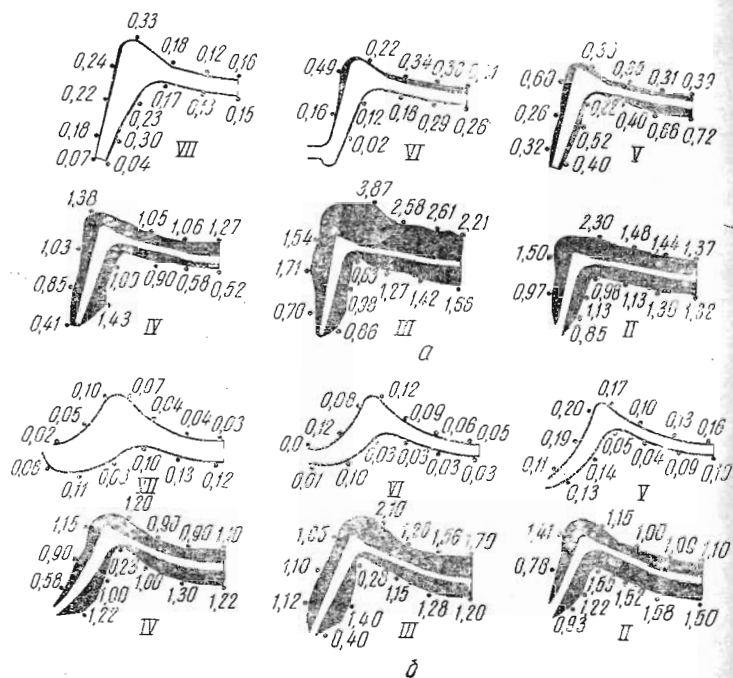


Рис. 58. Эпиюры износа калибров при прокатке швеллера № 30 по прямопослойной (а) и развернутой способом постепенного сгибания (б) калибровкам. Цифры у точек — износ калибра, мм/м. $\times 10^3$

как контура калибров для прямопослойной и развернутой калибровок приведены в табл. 18 и 19. По результатам измерений построены эпиюры износа калибров (рис. 58).

Отличительная особенность швеллерных калибров — значительный износ со стороны краев полок и середины стенки по верхнему и нижнему ручью и минимум износа

в месте перехода стенки в полку со стороны нижнего ручья. Такой характер износа в общем отвечает распределению скольжения металла (см. рис. 45 и 49) и работы сил трения (см. рис. 48 и 52) в рассматриваемых калибрах, за исключением гребней нижнего валка при переходе от стенки к полке. Это можно объяснить влиянием температурного фактора, так как изменение температуры обуславливает изменение коэффициента трения и удельного давления. Температура прокатки по развернутой калибровке в среднем выше на 20 град, чем по прямопо-

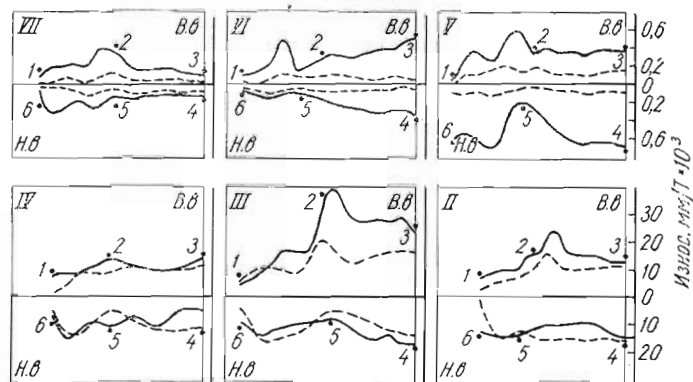


Рис. 59. Сравнение износа калибров наложением разверток выработки контуров калибров:

сплошные линии — прямопослойная калибровка; штриховые — калибровка способом постепенного сгибания; В. в. — верхний валок; Н. в. — нижний валок

лойной. Фактически картина износа при прокатке по обоим способам прокатки имеет максимум в местах минимума температуры — по стенке и краям полок. Но по развернутой калибровке его абсолютные значения меньше, чем по прямопослойной. Это соответствует также распределению скольжения металла на входе в очаг деформации и распределению работы сил трения по верхнему валку.

Для сравнения износа валков исследуемых калибровок на рис. 59 приведены графики износа в виде наложенных одна на другую разверток контура калибров с отложенными в соответствующих точках величинами износа. Эти данные показывают выработку калибров при прокатке по прямопослойной калибровке и развернутой калибровке

Таблица 18

Номер		Число закла- док	Прока- тано метал- ла, т	Износ в точках контура				
клетки	калиб- ра			1	2	3	4	5
I	VII	5	9860	0,07	0,18	0,20	0,22	0,18
				0,04	0,30	0,20	0,23	0,17
				0,11	0,16	0,21	0,49	0,17
				0,02	0,14	0,12	0,11	0,18
				0,06	0,32	0,37	0,26	0,49
II	VI	5	6850	0,40	0,35	0,52	0,22	0,20
				0,41	0,73	0,85	0,85	1,03
				0,64	1,43	0,89	1,00	0,71
				0,31	0,70	0,98	1,71	1,66
				0,86	1,42	0,98	0,90	0,63
	V	5	6850	0,64	0,97	1,05	1,50	1,48
				0,85	1,02	1,13	1,06	0,98

Примечание. В числителе—верхнее расположение валков, в знамена

прямоугольной калибровке (рис. 58,а)

калибра, мм/т × 103								
6	7	8	9	10	11	12	13	14
0,24	0,34	0,33	0,17	0,18	0,19	0,12	0,11	0,16
0,17	0,17	0,13	0,14	0,15	—	—	—	—
0,22	0,30	0,34	0,30	0,36	0,39	0,41	—	—
0,23	0,29	0,28	0,26	—	—	—	—	—
0,60	0,35	0,39	0,35	0,35	0,31	0,38	0,39	—
0,40	0,59	0,66	0,65	0,72	—	—	—	—
1,38	1,38	1,22	1,05	0,97	1,06	1,14	1,27	1,28
0,90	0,55	0,58	0,50	0,52	—	—	—	—
1,54	3,21	3,87	3,00	2,58	2,67	2,61	2,83	2,21
1,04	1,27	1,19	1,42	1,65	1,66	—	—	—
2,30	1,59	1,48	1,44	1,44	1,38	1,37	—	—
1,07	1,13	1,28	1,30	1,25	1,32	—	—	—

теле—нижнее.

Таблица 19

Номер		Число закла- док	Прока- тано метал- ла, т	Износ в точках контура				
клетки	калиб- ра			1	2	3	4	5
I	VII	3	7350	0,00	0,02	0,07	0,05	0,07
				0,05	0,06	0,06	0,10	0,11
				0,05	0,00	0,05	0,12	0,09
				0,01	0,05	0,10	0,09	0,03
				0,00	0,12	0,11	0,16	0,19
II	VI	3	5800	0,08	0,13	0,12	0,14	0,08
				0,05	0,58	0,82	0,90	0,78
				0,38	1,22	1,51	1,00	0,40
				0,60	1,12	1,20	1,10	0,95
				0,40	1,48	1,40	1,05	0,28
	V	3	5800	0,30	0,57	0,78	0,90	1,41
				0,00	0,93	1,22	1,00	1,50

Примечание. В числителе—верхнее расположение валков, в знамена

способом постепенного сгибания (рис. 58,б)

калибра, мм/т × 103								
6	7	8	9	10	11	12	13	14
0,10	0,07	0,08	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03	—
0,08	0,08	0,12	0,10	0,12	0,13	0,10	0,12	—
0,08	0,12	0,11	0,09	0,06	0,06	0,06	0,05	0,05
0,04	0,03	0,03	0,03	0,02	0,03	—	—	—
0,16	0,00	0,17	0,12	0,10	0,08	0,13	0,15	0,16
0,05	0,02	0,04	0,06	0,09	0,11	0,10	—	—
1,15	1,20	1,10	0,90	0,85	0,90	1,10	—	—
0,23	0,50	1,00	1,21	1,30	1,20	1,22	—	—
1,05	2,10	1,75	1,26	1,50	1,58	1,70	1,70	—
0,60	0,90	1,15	1,20	1,28	1,30	1,20	—	—
1,15	0,95	1,00	1,10	1,09	1,10	—	—	—
1,55	1,49	1,52	1,47	1,58	1,50	—	—	—

теле—нижнее.

способом постепенного сгибания. Так, при прокатке по калибровке способом постепенного сгибания износ валков I клетки трио (калибры VII — V) значительно меньше, чем при прокатке по прямополочной калибровке. При этом следует отметить, что хотя характер износа калибров в обоих случаях неравномерный, однако по калибровке способом постепенного сгибания эта неравномерность выражена значительно меньше. Колебания значений износа для калибровки способом постепенного сгибания и прямополочной соответственно составляют (см. рис. 58 и 59, табл. 18 и 19): 0,02—0,13 и 0,04—0,34 мм/м $\times 10^3$ по VII калибру; 0,01—0,12 и 0,02—0,49 по VI; 0,02—0,20 и 0,06—0,72 мм/м $\times 10^3$ по V калибру.

На II клетки трио (калибры IV — II) по мере приближения формы развернутых калибров к прямополочным износ возрастает и аналогичен износу прямополочной калибровки, оставаясь, однако, меньше последнего. Увеличению износа развернутых калибров во II клетки трио способствуют также большие коэффициенты вытяжки, применяемые в калибровке способом постепенного сгибания полок, которые, видимо, оказывают большое влияние на износ.

Таким образом, сопоставительное исследование износа швеллерных калибров показало, что при прокатке по развернутой калибровке способом постепенного сгибания, при прочих равных условиях, оказывающих влияние на износ, благодаря меньшему скольжению металла относительно валков, уменьшению и выравниванию по периметру калибра работы сил трения и некоторому улучшению температурных условий прокатки износ калибров количественно значительно меньший, чем при прокатке по прямополочной калибровке. Следует добавить, что неравномерность износа по периметру калибров развернутой калибровки также меньше, чем по периметру калибров прямополочной калибровки. Это имеет очень большое значение в связи с тем, что по мере износа развернутых калибров представляется возможным восстанавливать их размеры путем настройки стана и тем самым увеличивать срок службы валков, а также вести прокатку в минусовом поле допусков. Все это обеспечивает значительный экономический эффект при применении для прокатки швеллеров развернутой калибровки способом постепенного сгибания полок.

Исследование износа швеллерных калибров в общем подтвердило возможность определения расчетным путем скольжения металла и распределения работы сил трения по периметру швеллерных калибров для получения качественной картины износа по тому или другому способу прокатки. Кроме того, оно показало также значительное влияние на износ температурных условий прокатки.

4. ИССЛЕДОВАНИЕ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ДЕФОРМАЦИИ И ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ МЕТАЛЛА В ШВЕЛЛЕРНЫХ КАЛИБРАХ

Прокатка фасонных профилей, в том числе швеллерных, сопровождается значительной неравномерностью деформации металла. Вместе с тем степень неравномерности

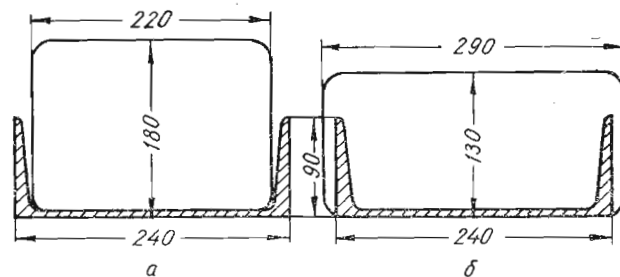


Рис. 60. Соотношение формы и размеров исходной заготовки и готового швеллерного профиля при прокатке по прямополочной (а) и развернутой калибровке способом постепенного сгибания полок (б)

деформации может быть различной в зависимости от способа прокатки.

При прокатке швеллеров с увеличенным до 15—20% выпуском прямых полок и изогнутой стенкой при сохранении прямого угла между стенкой и полками исходной заготовкой чаще всего служат полосы прямоугольного сечения с отношением высоты H_0 к ширине B_0 в пределах $0,8 \div 1,0$ (рис. 60, а). При этом высота заготовки может быть рассчитана по формулам А. П. Чекмарева [47, 28, с. 152], М. С. Мутьева [48], Б. П. Бахтинова [5] или из практических зависимостей по данным [13] $H_0 = 2b$, где b — ширина полки готового швеллерного профиля. В этом случае исходная ширина заготовки B_0 равна или несколько меньше высоты h готового профиля.

Сравнение формы и размеров, например швеллера № 24, и меньшего $h = 240 \text{ мм}$, $b = 90 \text{ мм}$ и $d = 5,6 \text{ мм}$ с формой и размерами исходной заготовки, имеющей $H_0 = 180 \text{ мм}$ и $B_0 = 220 \text{ мм}$, свидетельствует о значительной суммарной неравномерной деформации по ширине: по стенке вытяжное обжатие составляет:

$$\lambda_{\text{ст}} = \frac{H_0}{d} = \frac{180}{5,6} = 32,14; \text{ по полкам } \lambda_{\text{п}} = \frac{H_0}{b} = \frac{180}{90} = 2,0.$$

Если при этом учесть наличие простого уширения, а также вынужденной утяжки, вынужденного уширения и т. д., то неравномерная деформация по сечению прокатываемого профиля будет иметь еще более сложный характер.

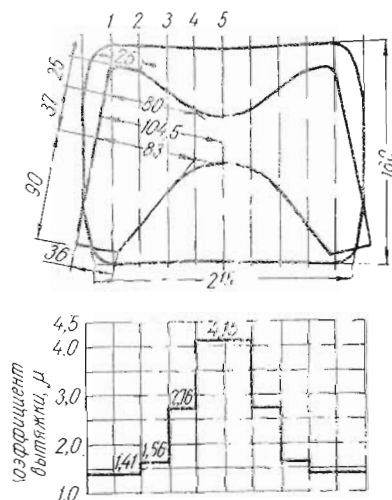


Рис. 61. Распределение вытяжек по ширине полосы при прокатке по калибровке с увеличенным выпуском полок

чению полосы [42, с. 228], что приводит к увеличению работы сил трения металла относительно поверхности калибра и износу валков. О степени неравномерности деформации металла на первой стадии прокатки швеллерного профиля по калибровке с увеличенным выпуском полок свидетельствует распределение вытяжек по ширине полосы (рис. 61), который построен следующим образом. На прямоугольную заготовку $180 \times 220 \text{ мм}$ накладываем ка-

либр и делим их на несколько (в данном случае на 10) равных частей; две крайние и две средние части объединены. Площади поперечного сечения участков заготовки и части профиля разрезного калибра, находящиеся внутри площади соответствующего участка заготовки, планиметрируем. Затем площади участков заготовки делим на соответствующие площади участков разрезного калибра, в результате чего получаем значения естественных вытяжек (отложенные по оси ординат), которые имели бы различно обжимаемые участки заготовки, если условно представить их деформацию самостоятельно, вне связи с соседними участками. Стенка, как более тонкий элемент профиля, обжимается более интенсивно и вытягивается в длину больше, чем менее обжимаемые полки. Однако благодаря взаимодействию сильно и слабо обжимаемых частей, все сечение полосы получает определенную среднюю вытяжку (в нашем случае $\mu_{\text{ср}} = 2,23$), благодаря чему крайние участки получают фактическую вытяжку, близкую к средней и значительно больше естественной, а средние — меньше естественной. Неодинаковая вытяжка стенки и полок ведет к искажению формы профиля на концах полосы. В результате такого характера неравномерной деформации по ширине полосы до формирования переднего и заднего жестких концов по стенке образуется «язык», а по полкам — высотная утяжка.

На второй стадии прокатки, связанной с превращением черного профиля в готовый швеллер заданных размеров, массивный «язык» стенки раскатывается и его длина увеличивается, достигая в ряде случаев в зависимости от номера швеллера значительных размеров; остается также большая и высотная утяжка полок. Все это приводит к повышенному отходу металла на концевую обрезь.

Следовательно, при прокатке швеллеров по калибровке с увеличенным выпуском полок ввиду значительной неравномерности деформации металла, особенно при превращении исходной прямоугольной заготовки в черновой швеллерный профиль, получают языки значительной длины и большая высотная утяжка полок.

При прокатке швеллеров по развернутой калибровке с постепенным сгибанием полок исходной заготовкой также служит прямоугольная полоса (рис. 60, б), однако с учетом характера деформации металла в развернутых калибрах отношение H_0/B_0 следует выбирать в пределах

0,35—0,65. Исходную высоту заготовки принимают $H_0 \approx 1,5 b$, а ширину $B_0 = (1,05 \div 1,25) h$, при этом для швеллеров больших размеров берут больший коэффициент при h , и наоборот. Для получения швеллера № 24 при прокатке по развернутой калибровке способом постепен-

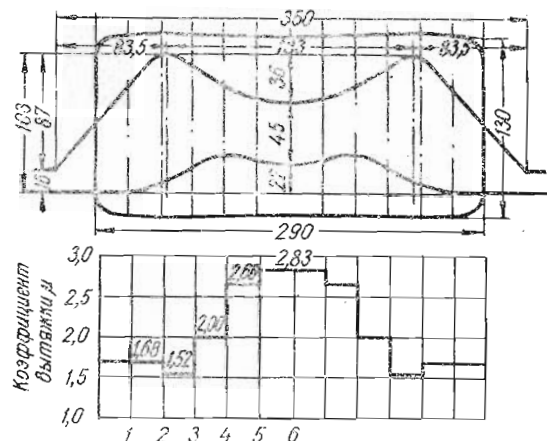


Рис. 62. Распределение вытяжек по ширине полосы при прокатке по развернутой калибровке с постепенным сгибанием полок

ного сгибания принимаем исходную прямоугольную заготовку размером 130×290 мм.

При прокатке швеллеров по способу постепенного сгибания полок первый фасонный калибр по своей форме близок к полосе (рис. 62) и хотя в этом случае также будет наблюдаться значительная суммарная неравномерная деформация по ширине ($\lambda_{ст} = \frac{130}{5,6} = 23,2$ и $\lambda_n = \frac{130}{5,6} = 1,45$), она гораздо меньше, чем при прокатке по калибровке с увеличенным выпуском полок. При этом на первой стадии прокатки, связанной с превращением исходной заготовки в черновой швеллерный профиль, различие величины вытяжек сильно и слабо обжимаемых участков полосы, примерно в 1,5 раза меньше, чем при прокатке по калибровке с увеличенным выпуском полок.

Значительно меньшее различие естественных вытяжек соседних участков предопределяет более равномерную де-

формацию по сечению полосы, вследствие чего должен уменьшаться отход металла в концевую обрезь.

Для определения количества обреза при прокатке швеллера № 24 по прямополочной калибровке с увеличенным выпуском полок и развернутой калибровке способом постепенного сгибания полок от разных плавков было отобрано по 10 концевых обрезков. Данные измерений согласно схеме рис. 63 приведены в табл. 20.

Фактическую массу кусков обреза определяли взвешиванием. Из общей массы концевых обрезков полосы вычитали массу годного металла и находили чистую массу обреза.

Из данных табл. 20 видно, что средняя масса концевой обреза швеллера № 24, прокатанного по калибровке способом постепенного сгибания, уменьшилась с 9,87 до 7,76 кг, или на 21,4% преимущественно за счет уменьшения высотной утяжки полок на концах полосы.

Это подтверждает приведенный анализ неравномерности деформации металла в швеллерных калибрах при различных способах прокатки. Развернутой калибровкой способом постепенного сгибания полок достигается более равномерная деформация металла по сечению полосы, уменьшается утяжка полок и сокращаются отходы металла в обрезь. В результате повышается выход годного и улучшаются технико-экономические показатели производства швеллеров.

С неравномерной деформацией металла в швеллерных калибрах тесно связано и его формоизменение. Для исследования формоизменения металла по проходам и определения соответствия расчетных размеров элементов профиля (швеллера № 24) фактическим при прокатке после каждого прохода были отобраны темплеты (рис. 64,б), которые сравнивали с шаблонами соответствующих калибров (рис. 64,а).

Для суждения о приемлемости предложенного метода расчета калибровки швеллеров способом постепенного сгибания и правильности исходных положений необходимо

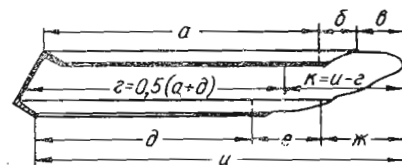


Рис. 63. Схема измерений для определения отходов в концевую обрезь при прокатке швеллера № 24

Таблица 20

Размеры концевой обрести швеллера № 24 при прокатке по прямополочной и развернутой калибровке способом постепенного сгибания полок¹

Номер		Размеры элементов обрести, мм (рис. 63)				Общая масса обрести, кг	Масса годного, кг	Чистая масса обрести, кг
обрез- ка	плавки	а	б	в	г			
По прямополочной калибровке								
1	1105	330	270	223	823	16,70	9,60	7,10
2	1110	310	520	115	945	19,50	7,32	12,18
3	1106	360	300	108	968	20,05	11,28	8,77
4	1108	550	320	98	968	19,45	11,88	7,57
5	1109	450	460	116	1026	21,65	9,05	12,60
6	1110	430	490	66	986	20,50	10,08	10,42
7	1107	110	608	132	840	16,00	5,62	10,38
8	1110	228	690	177	895	18,15	5,94	11,21
9	1107	410	380	155	945	19,40	9,36	10,04
10	1109	410	320	198	928	19,70	11,28	8,42
Сумма		3588	4158	1388	9320	191,10	92,40	98,70
Среднее		359	416	139	932	19,10	9,24	9,87
По развернутой калибровке								
1	1454	650	170	260	1010	20,15	13,80	6,35
2	1459	380	190	265	855	15,30	8,28	7,02
3	1454	735	265	344	1282	24,30	15,98	8,32
4	1457	600	240	296	1076	20,25	12,96	7,29
5	1456	480	260	243	988	18,95	12,17	6,78
6	1455	386	245	316	878	14,82	7,42	7,40
7	1459	470	200	262	912	17,65	9,84	7,81
8	1456	574	200	236	990	19,33	11,86	7,47
9	1460	410	245	225	880	17,53	9,96	7,57
10	1455	504	220	216	890	16,75	5,18	11,57
Сумма		5189	2235	2663	9711	185,08	107,45	77,58
Среднее		519	224	266	971	18,51	10,75	7,76

¹ Измерения проводились прокатной лабораторией ЦЗЛ завода «Азовсталь».

проверить заполнение калибров металлом и рассмотреть формоизменение металла в них. Швеллер № 24 прокатывают из исходного бруса 214 × 228 мм, который за два прохода в I ящичном и один проход во II ребровом калибрах валков дуо-реверсивной клетки 900 обжимают до заготовки сечением 122 × 285 мм.

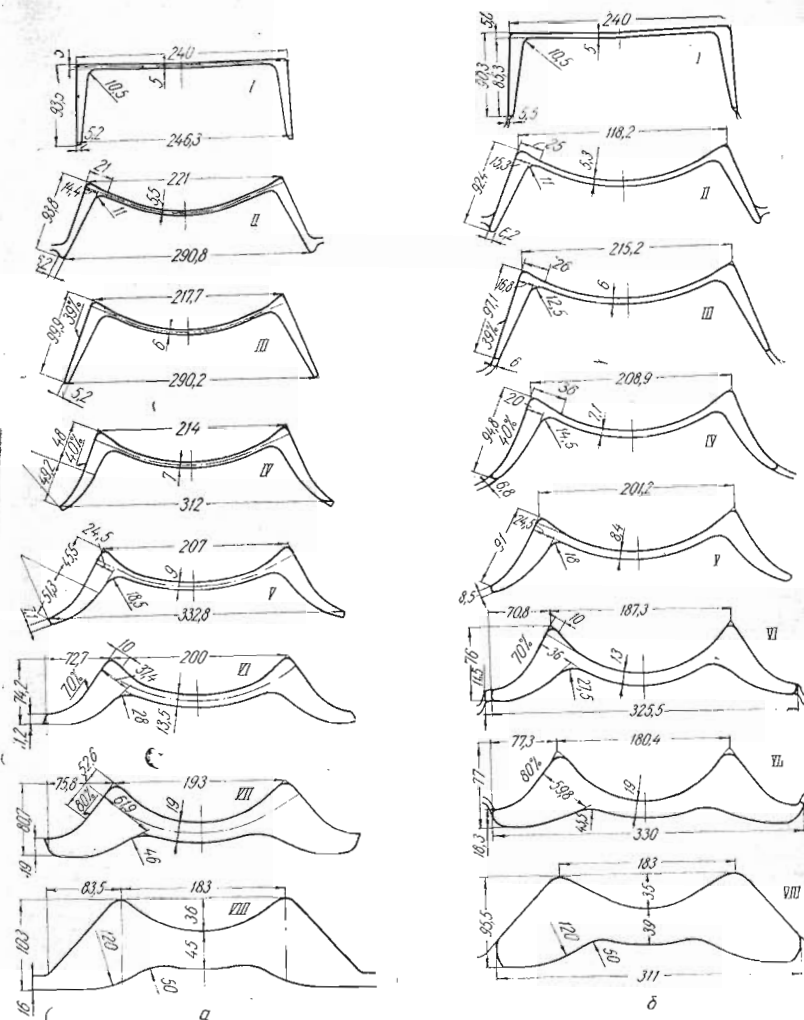


Рис. 64. Шаблоны калибров (а) и темплеты полос (б) после проходов в соответствующих калибрах при прокатке швеллера № 24 по развернутой калибровке способом постепенного сгибания полок

Полученная заготовка поступает в первый фасонный калибр (*VIII* калибр по ходу калибровки), где за два прохода прямоугольная исходная полоса при опускании верхнего вала превращается в черновую фасонную заготовку (см. рис. 64, темплет *VIII б*). При этом сравнение размеров темплета *VIII б* и шаблона калибра *VIII а* показывает вполне удовлетворительное их совпадение, за исключением отклонения по толщине стенки (-6 мм); это отклонение от расчетных размеров допускается операторами стана для большего обжатия на минус, чтобы облегчить деформацию в последующих калибрах, однако это не является дефектом калибровки.

Черновая фасонная заготовка далее передается на чистовую линию стана, где прокатывается сначала в *I*, а затем во *II* клетях трио 850 и, наконец, в чистовой клетке дуо 850. Сравнение *VII* и *VI* темплетов развернутого черного профиля с соответствующими шаблонами калибров (см. рис. 64) также свидетельствует об удовлетворительном совпадении размеров шаблонов и темплетов, за исключением утонения стенки, которое в *VII* калибре составляет -3 мм, а в *VI* $-0,5$ мм, и некоторого уменьшения ширины по гребням. Отмеченное переполнение (образование «уса») в *VII* калибре легко устраняется правильной настройкой стана.

Темплеты последующих переходных *V* и *IV* кривополючных калибров, прямополючного *III*, а также контрольного предчистового и чистового калибров (см. рис. 64) имеют вполне удовлетворительное совпадение размеров с шаблонами калибров, за исключением некоторого колебания размеров полок. При правильной настройке стана обеспечивается удовлетворительное заполнение калибров металлом, а полузакрытый (контрольный) предчистовой калибр хорошо контролирует высоту полок по длине полосы, чем и достигается стабильность размеров профиля, выходящего из чистового калибра. Минусовые отклонения размеров чистового профиля не выходят за пределы допуска и связаны с тем, что при прокатке в минусовом поле допусков уменьшается масса одного метра профиля.

Таким образом, полученные результаты подтверждают вполне удовлетворительное совпадение расчетных и фактических показателей калибровки, а также правильность исходных данных и метода расчета калибровки швеллеров способом постепенного сгибания.

Глава IV

ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННАЯ ПРОКАТКА ШВЕЛЛЕРОВ, УГОЛКОВ И ДРУГИХ ФАСОННЫХ ПРОФИЛЕЙ СПОСОБОМ ПОСТЕПЕННОГО СГИБАНИЯ ПОЛОК

1. ПРОКАТКА ШВЕЛЛЕРОВ

По предложенному методу расчета была разработана калибровка швеллера № 16 способом постепенного сгибания. Опытная прокатка на крупносортом стане 650 прошла вполне успешно. Она показала, что разработанный метод расчета обеспечивает получение профиля в пределах допусков при первом опробовании. Для хорошей работы и надежной задачи полосы в калибр оказалось достаточным применить обычные прямые вводные и выводные линейки. На *II* клетки стана 650 были опробованы фасонные вводные линейки, но оказалось, что они не имели никаких преимуществ.

Новая калибровка швеллера № 16 отличается от обычной с увеличенным выпуском полок. На обжимной клетке 800, а также на *I* и *II* клетях трио 650 были применены валки с меньшими исходными диаметрами бочек, чем при старой калибровке. Вследствие этого масса комплекта валков обжимной клетки уменьшилась с 24,76 до 21,2 т, *I* клетки трио уменьшилась с 26,08 до 22,08 т, а на *II* — с 27,4 до 23,9 т.

Уменьшение глубины вреза ручьев и высоты переходных буртов при калибровке способом постепенного сгибания позволило увеличить в опасном сечении диаметр валков *I* клетки с 527 до 603 мм, что значительно повысило момент сопротивления валков в опасном сечении. Кроме того, это позволило заменить стальные валки *I* клетки трио более дешевыми и износостойкими чугунами, модифицированными магнием. Валки *II* клетки трио по-прежнему изготавливают из полутвердого чугуна.

Прокатка швеллера № 16 по калибровке способом постепенного сгибания показала возможность получения профиля в поле минусового допуска, что обеспечило экономии металла $> 2\%$. За период освоения новой калибровки швеллера № 16, по данным прокатной лаборатории ЦЗЛ, среднее понижение массы 1 м составило $\sim 2\%$ [49].

Стойкость развернутых калибров относительно прямополочных более очевидна при рассмотрении условий деформации металла в калибрах. При прокатке швеллеров по прямополочной калибровке с выпуском полок до 20% износ калибра происходил в большей степени по полкам, чем по стенке. Номинальные размеры стенки швеллера можно поддержать настройкой стана, т. е. уменьшением зазора между валками. Однако толщина полок при этом изменяется недостаточно. Так, на II клетки трио при компенсации 9 мм толщины стенки изношенные полки восстанавливаются следующим образом: в IV калибре на 0,33 мм, в III — на 0,22 мм и во II — на 0,27 мм.

Таким образом, по старой прямополочной калибровке полки по мере износа калибров утолщаются, что приводит к нарушению режима обжатия и ускорению износа каждого последующего калибра. Особенно интенсивно изнашиваются калибры в месте, соответствующем краю полки, где толщина ее незначительная и металл охлаждается быстрее, чем в остальной массе профиля. Масса 1 м швеллера за счет утолщения полки растет. После прокатки по прямополочной калибровке 300—330 т швеллеров в одном калибре приходилось переходить на новые калибры или производить полную перевалку валков. Например, на одном комплекте стальных валков I клетки трио чистовой линии стана в 1962 г. по прямополочной калибровке прокатывали в среднем за одну закладку 2000 т швеллеров, на одном комплекте чугунных валков II клетки трио 550 т и на валках III клетки 800 т.

Деформация металла и условия работы калибров развернутой формы и прямополочных существенно различаются. Калибры I клетки трио полностью развернуты, а выпуск полок в калибрах II клетки трио увеличен до 39—40%. Такое увеличение выпуска соответственно повышает износостойкость калибров и уменьшает съем металла при ремонте валков. Края полок I клетки трио закруглены и выведены в горизонтальное положение. В этом случае износ по стенке и полкам швеллера может быть компенси-

рован уменьшением зазора между валками. При развернутой форме калибра стенка и полки по толщине изменяются примерно на одинаковую величину. Размеры и массу профиля можно поддерживать в пределах минусовых допусков.

Благодаря достоинствам развернутых калибров стойкость их относительно прямополочных калибров возросла: на валках I клетки трио за одну закладку прокатывали 2500 т металла, на II клетки трио 1150 т и на III — 1000 т.

Съем металла с валков при ремонте кривополочных калибров на обжимной и I трио клетях почти в три раза меньше, чем при ремонте валков старой калибровки. Среднее уменьшение диаметра валков швеллера № 16 за переточку составляет:

Номер калибра	I	II	III	IV	V	VI	VII
Уменьшение диаметра валков, мм:							
по прямополочной калибровке	20	12	12	12	20	20	20
по развернутой калибровке	19	8	8	8	7,5	7,5	7,5

Увеличение стойкости калибров и уменьшение съема металла при ремонте валков сокращают парк валков, а следовательно, и расходы на их приобретение и содержание.

Калибр IV кривополочный, является переходным между развернутым V и прямополочным III (см. рис. 28). Как известно, значительное формоизменение металла в двух смежных калибрах сопряжено с трудностями задачи полосы в следующий калибр. Благодаря наличию IV кривополочного калибра уменьшается разница в ширине (горизонтальной проекции) развернутого и прямополочного калибров, что исключает применение коробок с пропусками.

О преимуществах калибровки швеллера № 16 способом постепенного сгибания свидетельствуют также данные о приведенном (удельном) износе валков по калибрам на 1000 т проката (рис. 65). Увеличенный износ VII калибра (1 проход на чистовой линии стана) объясняется значительно большей степенью деформации металла (вытяжка и обжатие по стенке составляют соответственно 1,52

и 21 мм при развернутой калибровке, и 1,35 и 11 мм при прямополочной).

С переходом на новую калибровку произошло перераспределение деформаций по калибрам (см. рис. 65). В связи с тем, что в развернутых калибрах более высокая степень деформации, чем в прямополочных, она была перераспределена между обжимной клетью 800 и клетями чистовой линии. В результате в обжимной клетке, которая при прежней калибровке определяла темп прокатки, сокращено два прохода. Цикл прокатки уменьшился и обус-

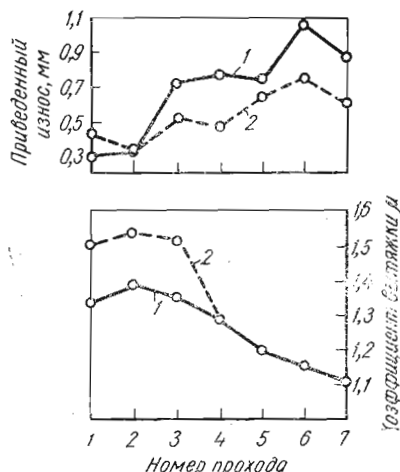


Рис. 65. Приведенный износ и коэффициенты вытяжки по проходам чистовой линии стана 650 при прокатке швеллера № 16:

1 — по прямополочной калибровке;
2 — по калибровке способом постепенного сгибания

ловливается в настоящее время пропускной способностью чистовой линии стана, в которой резерв повышения производительности получается за счет прокатки во второй клетке в «два яруса».

Прокатка в два яруса является передовым методом работы, сущность которого состоит в следующем: полосу задают в IV калибр и после того, как из него выйдет 15—20 м, во II (предчистовой) калибр, находящийся на том же верхнем горизонте, что и IV калибр, задают следующую полосу (рис. 66). После выхода полосы из IV калибра

подъемно-качающиеся столы, находящиеся в верхнем положении, опускаются вниз и вышедшую из IV калибра полосу задают в III калибр уже при нахождении подъемно-качающихся столов в крайнем нижнем положении. Поскольку полоса, прокатываемая в это время во II калибре, значительно длиннее только что заданной в III калибр, то с этого момента прокатку ведут одновременно в двух горизонтах: нижнем (в III калибре) и в верхнем (во II калибре) (см. рис. 66). Прокатка швеллеров в два

яруса повышает производительность чистовой линии стана 650 в час на 10—15 т. Эффективность данного метода повышается с увеличением длины полосы.

Анализ результатов прокатки на крупносортом стане 650 швеллеров № 18 и 18в по калибровке способом постепенного сгибания показывает, что они весьма сходны с результатами прокатки швеллера № 16.

Швеллер № 24 прокатывали на рельсобалочном стане по прямополочной калибровке следующим образом: блюм

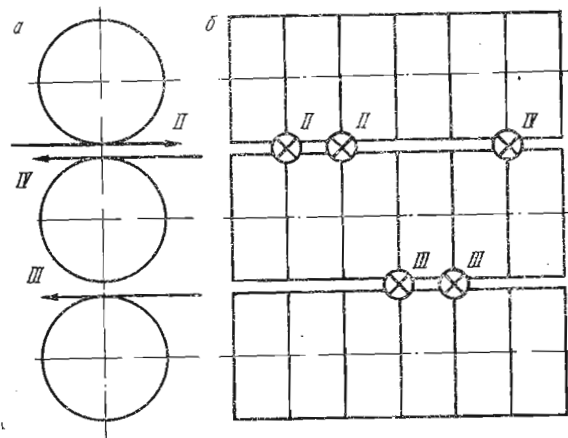


Рис. 66. Схема прокатки в два яруса:
а — вид сбоку; б — вид спереди

сечением 220 × 280 мм прокатывали на черновой линии в дуо-реверсивной клетке 900 за пять проходов по схеме:

Номер прохода	1	2	3	4	5
Номер калибра	II	II	III	III	IV
Кантовка, град	90	90	—	—	—

Затем полоса поступала на чистовую линию, где черновая швеллерная заготовка прокатывалась в готовый профиль за семь проходов по схеме 3—3—1 (по три прохода в клетях трио 850 и последний, седьмой проход в чистовой клетке дуо 850).

Форма швеллерных калибров чистовой линии стана характеризуется изогнутой стенкой с выпуском полок до 15—20%. В чистовом калибре выпуск 3,5%. При прокатке швеллеров по прямополочной калибровке не обеспе-

чивается должной стойкости валков вследствие большой выработки по полкам. Если номинальные размеры стенки швеллера можно удерживать путем настройки стана (уменьшением зазора между валками), то толщина полок при этом изменяется незначительно и масса 1 пог. м про-

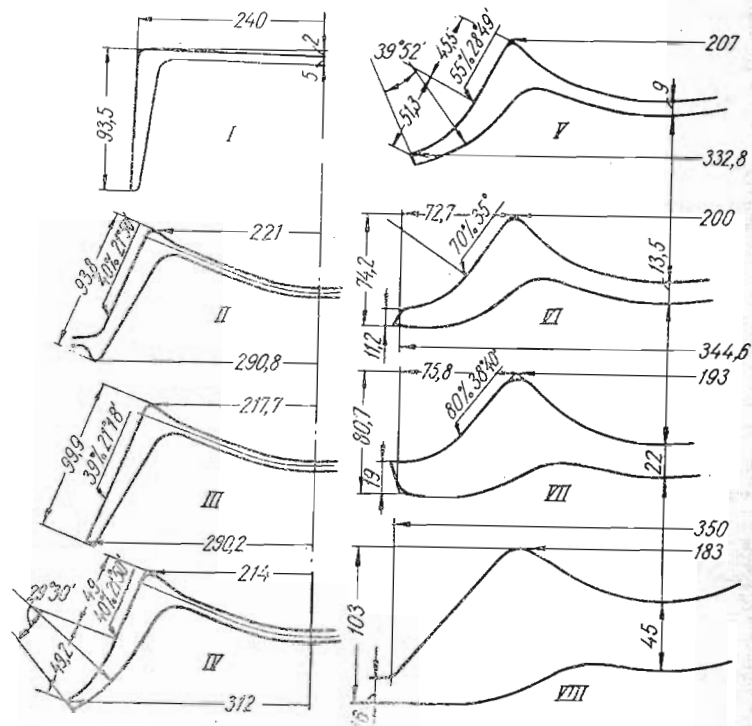


Рис. 67. Шаблоны калибров облегченного швеллера № 24 по калибровке способом постепенного сгибания полок

филя за счет утолщения полки растет. Несмотря на тщательную настройку стана, швеллер № 24 по прямополочной калибровке прокатывали в среднем по массе выше номинала на 0,2%. На комплекте валков I клетки трио в 1963 г. по прямополочной калибровке прокатали в среднем за одну закладку 2000 т, на комплекте валков II трио и III дуо клеток 1000 т.

В связи с этим освоили прокатку швеллера № 24 по калибровке способом постепенного сгибания. Шаблоны

калибров швеллера № 24 приведены на рис. 67. Применение двух переходных кривополочных калибров (калибры IV и V) при переходе от развернутого кривополочного калибра VI к прямополочному калибру III обеспечило существенное снижение разницы в горизонтальных проекциях кривополочной полосы, выходящей из IV калибра и поступающей в III прямополочный калибр (эта разность составляет $312 - 290,2 = 21,8$ мм). Вследствие этого захват полосы при передаче с IV в III калибр (см. рис. 18, а) происходит без затруднений. Проверка степени заполнения калибров и анализ формоизменения металла в калибрах по шаблонам и темплетам швеллера № 24 приведены выше.

Калибровка швеллера № 24, выполненная по методу постепенного сгибания, показала хорошие эксплуатационные качества. Профиль в пределах допусков был получен при первом опробовании и калибры чистовой линии корректировки не потребовали. Прокатка по новой калибровке показала возможность снижения средней массы 1 м профиля примерно на 1,5—2% за счет прокатки в минусовом поле допусков.

В развернутых калибрах благодаря возможности размещения в валках I клетки трио дублера V калибра, а в валках II клетки трио дублера II калибра при прокатке швеллера № 24 значительно увеличивается стойкость прокатных валков. За одну закладку комплекта валков было прокатано 2700 т, что увеличило стойкость валков примерно в 2,5 раза.

Швеллер № 30 прокатывали по прямополочной калибровке из блюма сечением 245×320 мм на черновой дуо-реверсивной клетки 900 за семь проходов по схеме:

Номер прохода	1	2	3	4	5	6	7
Номер калибра	II	II	II	III	III	IV	V
Кантовка, град	90	—	—	—	—	—	—

Затем полоса поступала на чистовую линию, где черновую швеллерную заготовку прокатывали в чистовой профиль за семь проходов по схеме 3—3—1 (по три прохода в клетях трио 850 и последний, седьмой проход в чистовой клетке дуо 850). Три фасонных калибра в обжимной дуо-реверсивной клетки для прокатки швеллера № 30 имели выпуск полок 15; 18 и 20%. Швеллерные калибры чистовой линии имели изогнутую стенку и повышенный до

15—20% выпуск полок. Валки I и II клетей трио выполнены из стали 55Х.

Опыт прокатки швеллера № 30 по прямополочной калибровке с увеличенным до 15—20% выпуском полок показал, что стойкость валков при этом была низкой вследствие большого износа по полкам. Так как при прокатке швеллера № 30 на II клетей трио использовали стальные валки, то масса 1 м профиля за счет утолщения полок увеличивалась значительно быстрее, чем при прокатке швеллера № 24 в той же клетей, где применяли чугунные валки. По этой причине швеллер № 30 прокатывали по массе в среднем на 0,5% выше номинала.

За одну закладку на валках I клетей трио прокатывали в среднем 2000 т и 1000 т на валках II клетей трио и III клетей дуо.

Опытом прокатки швеллера № 24 по калибровке способом постепенного сгибания полок было установлено, что процесс прокатки наименее устойчив в IV калибре. Это объясняется тем, что IV калибр размещен между верхним и средним валками и задача полосы в этот калибр происходит под углом. Для увеличения темпа прокатки подъемно-качающиеся столы II клетей необходимо опускать задолго до выхода заднего конца полосы из IV калибра. Таким образом, задний конец полосы, проходящий через IV калибр, на какой-то период оказывается без опоры, поэтому он изгибается и скручивается, и, следовательно, снижается устойчивость процесса прокатки. Кроме того, блюмы после нагрева в методической печи имеют разную температуру по сечению. При прокатке такого металла в I фасонном калибре полки профиля заполняются неодинаково. Небольшая разность температур и длина полок сохраняется до первого по ходу прокатки прямополочного калибра. Даже при таком хорошем центрировании полосы в калибре, которое получается при калибровке способом постепенного сгибания, первые полосы после перевалки, имеющие большую, чем при установившемся процессе прокатки, разность температур, в результате неправильного захвата иногда имеют разную ширину полок. Устойчивость процесса прокатки в IV калибре иногда ухудшается в результате искривления задаваемой полосы, которое получается из-за неправильной настройки выводной арматуры или искривления от усилия шлеппера при передаче полосы с I во II клетей трио.

На основе большого производственного опыта прокатки швеллеров № 16, 18 и 24 способом постепенного сгибания полок при разработке калибровки швеллера № 30 эти особенности были учтены. Выбраны такие радиусы раскрытия полок и длины прямых участков, которые вместе

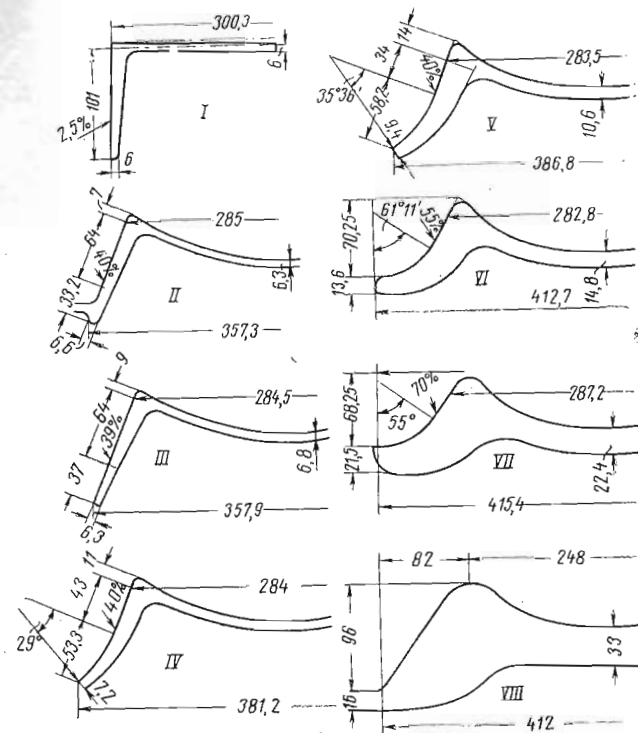


Рис. 68. Шаблоны калибров швеллера № 30 по калибровке способом постепенного сгибания полок

с одинаковым выпуском наружных граней полок (40%) и одинаковыми радиусами скругления перегиба стенки (240 мм) обеспечили минимальное подгибание полок в IV калибре (рис. 68).

Как видно из рис. 68, разница между горизонтальными проекциями V и IV калибров составляет лишь $386,8 - 381,2 = 5,6$ мм. Расчетные данные калибровки швеллера № 30 приведены в табл. 21. Однако процесс прокатки в IV

и в *III* калибрах по вышеизложенным причинам проходил не всегда достаточно устойчиво.

Устойчивость процесса прокатки в переходных *V* и *IV*, а также в первом по ходу прокатки *III* прямополочном калибре значительно возросла после применения на *I* и *II* клетях трио чугунных валков. Благодаря этому полностью исключаются случаи прокатки швеллера № 30 с большими радиусами закругления внешних углов и с разной шириной полок. По нашему мнению, повышение устойчивости процесса прокатки при использовании чугунных валков объясняется уменьшением коэффициента трения между полосой и валками, что улучшает условия самоцентрирования прокатываемой полосы в калибре.

Применению чугунных валков вместо стальных на *I* и *II* клетях трио предшествовал тщательный анализ энергоскоростных параметров прокатки, температурного режима, а также прочности валков прямополочной и развернутой калибровки способом постепенного сгибания полок.

Увеличение прочности валков *II* клетки трио 850 при калибровке швеллера № 30 способом постепенного сгибания по сравнению с калибровкой с увеличенным выпуском (рис. 69) обеспечивается за счет уменьшения глубины вреза ручьев. Используя ранее примененную методику расчета увеличения прочности валков при различных способах калибровки, получим

для верхних и нижних валков:

$$\frac{D_{\text{H}}^3}{D_{\text{H1}}^3} = \frac{D_{\text{B}}^3}{D_{\text{B1}}^3} = \frac{688^3}{646^3} = 1,208;$$

для средних валков

$$\frac{D_{\text{cp}}^3}{D_{\text{cpl}}^3} = \frac{718^3}{656^3} = 1,312$$

Следовательно, прочность валков *II* клетки трио 850 по калибровке способом постепенного сгибания соответственно больше в 1,208 и 1,312 раза, чем в случае применения калибровки с увеличенным выпуском полок.

На *I* клетки трио 850 увеличение прочности валков по калибровке способом постепенного сгибания составляет: для средних валков

$$\frac{D_{\text{cp}}^3}{D_{\text{cpl}}^3} = \frac{760^3}{693^3} = 1,316;$$

Таблица 21

Расчетные данные калибровки швеллера № 30 способом постепенного сгибания полок

Номер калибра	Обжатие Δd	Толщина d	Уширение ΔB	Ширина по оси стенки B	Радиус изгиба стенки R	Ширина кривоуго участка B
	мм					
Стенка						
I	0,3	6,0	1,3	300,3	—	—
II	0,5	6,3	1,0	299,0	200	152,30
III	1,4	6,8	1,5	298,0	200	148,60
IV	2,4	8,2	0,5	296,5	240	182,90
V	4,2	10,6	—4,0	296,0	240	182,90
VI	7,6	14,8	—5,0	300,0	240	241,27
VII	—	22,4	—	305,0	240	241,27
Номер калибра	Ширина прямого участка $B_{\text{пр}}$	Горизонтальная проекция стенки $B_{\text{Г}}$	Ширина калибра по верхним локотным фланцам $B_{\text{Ф}}$	Ширина калибра по полкам $B_{\text{П}}$	Площадь стенки (без фланц.) $F_{\text{ст}}$, мм ²	Коэффициенты вытяжки стенки $\mu_{\text{ст}}$
	мм					
Стенка						
I	—	—	—	—	1802	1,045
II	73,35	285,0	279,8	357,3	1884	1,075
III	74,70	284,5	278,0	357,9	2026	1,20
IV	56,80	284,0	275,8	381,2	2431	1,29
V	56,55	283,5	273,1	386,8	3137	1,41
VI	58,73	282,8	264,5	412,7	4425	1,54
VII	63,73	287,2	257,4	415,4	6832	—

Номер калибра	Приращение высоты Δh	Полная высо- та полки h	Высота прямо- го участка k	Высота криво- линейного участка h	Коэффициент вытяжки μ_p	Площадь полки F_p , мм ²	Толщина пол- ки на конце a
	мм						
Полка							
I	0,3	97,5	—	—	1,045	1010	6,3
II	—3,8	97,2	—	—	1,075	1055	6,6
III	0,5	101,0	—	—	1,20	1134	6,3
IV	1,5	100,5	43,0	57,5	1,29	1360	7,2
V	2	99,0	34,0	65,0	1,41	1754	9,4
VI	3	97,0	25,7	71,3	1,54	2473	13,6
VII	—	94,0	26,1	67,9	—	3308	21,5

Номер калибра	Толщина пол- ки у осно- вия b	Толщина пол- ки t_k на высо- те k	Радиус отгиба полки по сред- ней линии R_p	Угол отворота криволинейного участка φ_0	Радиус сопряже- ния полки со стенкой R'	Общая площадь швеллера F , мм ²	Общая вытяжка по плану μ
	мм						
Полка							
I	14,2	—	—	—	12,0	4050	1,045
II	15,1	—	—	—	12,5	4232	1,075
III	16,6	—	—	—	13,5	4549	1,200
IV	19,8	14,4	110	29°	15,5	5459	1,290
V	26,0	20,3	100	35°36'	19,5	7042	1,383
VI	37,4	31,1	60	61°11'	28,0	9739	1,518
VII	59,5	49,0	60	55°	45,0	14780	1,473

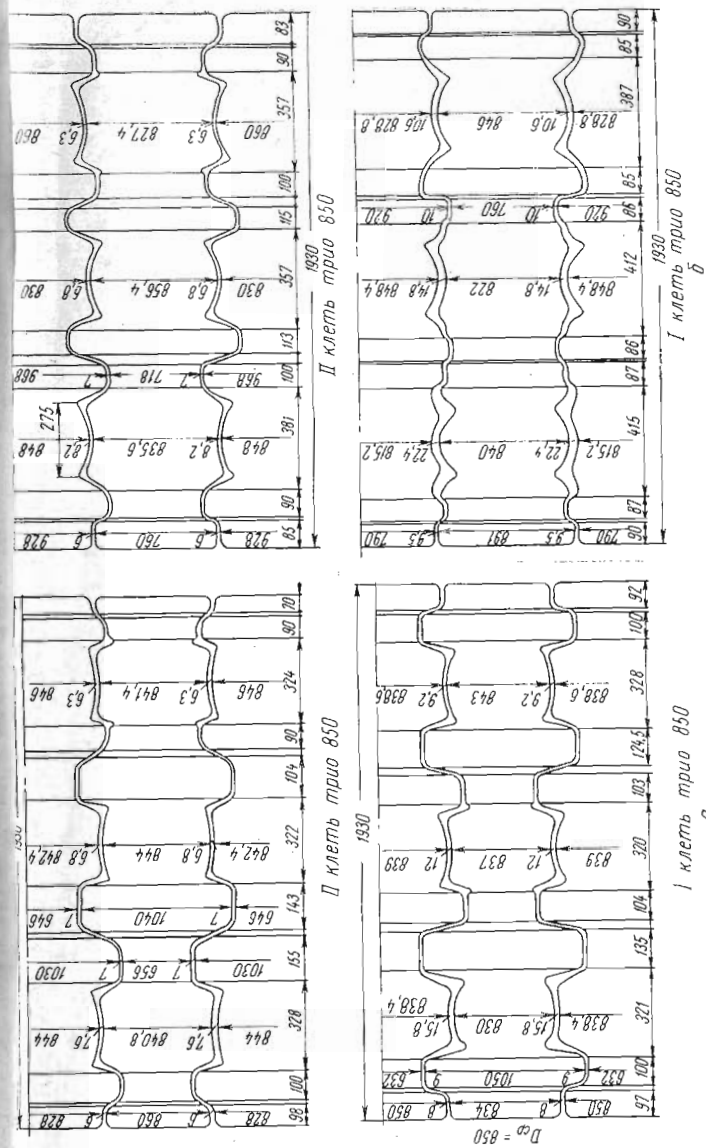


Рис. 69. Монтаж калибров в валках клетей трио чистой линии рельсобалочного стана для прокатки швеллера № 30:
 а — прямополочная калибровка; б — развернутая калибровка способом постепенного сгибания

для верхних и нижних валков

$$\frac{D_{\text{в}}^3}{D_{\text{вл}}^3} = \frac{D_{\text{н}}^3}{D_{\text{нл}}^3} = \frac{732^3}{622^3} = 1,554$$

Таким образом, прочность валков I клетки трио 850 до калибровки способом постепенного сгибания соответственно больше в 1,316 и 1,554 раза. Вместе с тем следует иметь в виду, что при прокатке швеллеров по развернутой калибровке возрастает давление металла на валки [51].

Применение чугунных валков на I и II клетях трио 850 значительно повысило эффективность прокатки. В настоящее время за одну закладку на валках I клетки трио 850 прокатывают в среднем 3500 т швеллера № 30 и 1700 т на валках II клетки трио 850 и III клетки дуо. Кроме того, более дешевые и износостойкие чугунные валки позволяют вести прокатку профиля в минусовом поле допуска; поверхность проката получается более чистой, а стойкость валков за одну закладку увеличивается более чем в 1,5 раза. В связи с этим расход металла на 1 т проката снизился на 10 кг, или на 1%.

Применение способа постепенного сгибания полок при прокатке швеллерных профилей позволило использовать прогрессивную развернутую калибровку на современных высокопроизводительных станах для производства швеллеров больших номеров, которые до сих пор по развернутой калибровке не прокатывали на наших заводах.

2. ПРОКАТКА УГЛОВОЙ СТАЛИ

При изготовлении и эксплуатации конструкций, сваренных из уголков $200 \times 200 \times 25 \div 30$ мм, прокатанных на крупносортом стане 650, были случаи разрыва полок уголка в поперечном сечении. Такие же разрушения встречались в уголках, хранящихся на складах заводов металлоконструкций, а также при правке в роликопральной машине.

Рассматривая конструкцию калибров действовавшей калибровки (см. рис. 23,б) и формоизменение металла в процессе прокатки уголков, можно получить представление о деформации и характере возможных напряжений. Из рис. 23,б видно, что полки уголка во всех калибрах, начиная с предчистового, отвернуты до горизонтали. Последний, чистовой калибр, кроме определенной работы обжатия толщины полок, выполняет работу спрямления

отвернутых полок, сопровождающуюся растягиванием их наружных граней.

Для устранения вышеизложенных недостатков разработана новая калибровка угловой стали $200 \times 200 \times 20 \div 30$ мм (см. рис. 23,а), которая внедрена в производство на крупносортом стане 650.

Используя способ постепенного сгибания полок, по новой калибровке предусматривается значительно меньшее отгибание полок в предчистовом калибре по сравнению с ранее существовавшим. Конфигурация калибров также изменена; создаются условия для постепенного формоизменения профиля, что повышает устойчивость процесса прокатки и точность размеров готового профиля. Прокатка в чистовом калибре по новой калибровке осуществляется со значительно меньшими растягивающими напряжениями краев полок. Следовательно, вероятность получения надрывов на краях полок даже при неблагоприятных условиях, также уменьшается. Кроме того, значительно уменьшилась работа, затрачиваемая в чистовом калибре на сгибание полок. Это заметно снизило нагрузку на чистовой клетки и дало возможность прокатывать уголок 200×200 мм с помощью двигателя мощностью 1100 квт. При прокатке по старой калибровке вследствие сравнительно большой работы, затрачиваемой в чистовом калибре на выпрямление полок, двигатель мощностью 1100 квт не обеспечивал процесс прокатки в чистовой клетке. Например, при прокатке уголка 200×200 мм нужно было установить промежуточный ступ со шпинделями и присоединить III (чистовую) клетку к двигателю I и II клетей трио чистовой линии мощностью 4560 квт, что потребовало дополнительного времени при перевалках.

Уменьшение формоизменения профиля уголка в чистовом калибре значительно увеличило устойчивость процесса прокатки. При прокатке по новой калибровке не потребовалось специальной вводной арматуры, так как почти нет случаев смещения угла с оси калибра, что наблюдалось при прокатке по старой калибровке. Кроме того, улучшилось его заполнение металлом.

Самоцентрированию полосы на обжимной клетке в значительной степени способствует изменение конфигурации первого ящичного калибра обжимной клетки 800 (см. рис. 24). В условиях крупносортового стана оказалось целесообразным для каждого номера уголка иметь специальный ком-

плект валков черновой клетки. Это позволило в максимальной степени приспособить обжимные валки для прокатки определенного номера уголка. Из рис. 24 видно, что уже первый ящичный калибр треугольным врезом в нижний валок превращен в некоторой степени в фасонный калибр. Формирование угла в первых проходах, кроме улучшения самоцентрирования и лучшего заполнения его вершины в последующих калибрах вследствие большой толщины задаваемой заготовки, уменьшает неравномерность деформации по ширине полосы. В результате намного уменьшилась длина языка на концах полосы (рис. 70),

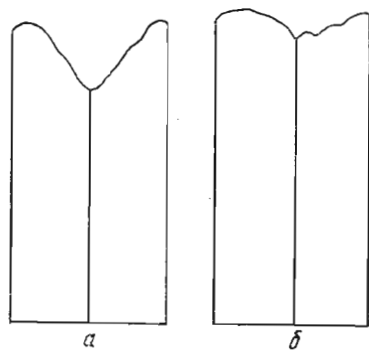


Рис. 70. Форма конца полосы уголка $200 \times 200 \times 25 \div 30$ мм; а — прямополючная калибровка; б — развернутая

которые и были часто причиной аварий. Большая и во многих случаях разная длина языков полок приводила к более раннему захвату валками одного из них и стягиванию на одну сторону полосы, в результате чего получался брак по свалу угла и короткой полке. Были также случаи загиба языков вниз и удара в выводной брус, что чаще всего наблюдалось при прокатке в чистовой клетке, в результате чего несколько полос выбрасывалось в брак из-за недокатов. Ликвидация такой аварии требовала длительного простоя стана.

После внедрения новой калибровки с изменением первого ящичного калибра длина языков значительно уменьшилась, что вместе с повышением устойчивости процесса прокатки ликвидировало случаи прокатки со свалом угла и аварии. Более высокая устойчивость процесса прокатки, обеспечиваемая калибровкой способом постепенного сгибания, позволила значительно улучшить технико-экономические показатели производства уголков $200 \times 200 \times 25 \div 30$ мм. После внедрения новой калибровки уголков $200 \times 200 \times 25 \div 30$ мм выход второго сорта снизился с 8,16 до 2,73% и брака с 0,45 до 0,25%, а производительность стана в час увеличилась с 151,3 до 170,5 т.

3. ПРОКАТКА БОКОВИНЫ ШАХТНОГО КОНВЕЙЕРА

Прокатка боковины шахтного конвейера СП-63 по калибровке способом постепенного сгибания освоена на крупносортом стане 650. Опытная прокатка профиля СП-63 показала, что разработанный метод расчета обеспечивает получение профиля в пределах допусков при первом опробовании. Это позволило выполнить заказ (~ 1000 т) с первой закладки валков.

Дальнейшее изучение условий прокатки боковины шахтного конвейера СП-63 по калибровке способом постепенного сгибания показало, что выпуск большой полки предчистового калибра $i_2^k = 15\%$ (см. рис. 35) оказался больше, чем это требуется для той степени устойчивости, которая необходима при больших скоростях прокатки и применении обычных плоских вводных линеек. Искривление полосы, которое получалось в результате неправильной настройки выводной арматуры II (предчистового) калибра, или от усилия шлеппера при передаче полосы на линию рольганга чистовой клетки приводило иногда к захвату большой полки чистового калибра. Для создания более надежных условий захвата в чистовом калибре необходимо было приблизить форму предчистового калибра к форме чистового. Чтобы избежать случаев захвата полосы на бурты чистового калибра, оказалось достаточно уменьшить выпуск наружной грани большой полки предчистового калибра на 5% ($2^\circ 51'$). В то же время принятая конфигурация III калибра осталась без изменений.

В рассматриваемой калибровке в IV калибре была уменьшена (почти на 20 мм) длина прямого участка большой полки, что определило степень ее разворота, а значит, размер вертикальной проекции этой полки, от которого зависит величина осевых усилий. Запроектированы несколько больше обычного приращение высоты малой полки ($\Delta h_m = 6$ мм) и ложный фланец. Все это обеспечило в III калибре уменьшение разницы в вертикальных проекциях полок до 7 мм (по заполнению металлом) вместо 42 мм в чистовом калибре. Как показывает опыт прокатки, разница в вертикальных проекциях полок в 7 мм не вызывает настолько больших осевых усилий, для восприятия которых нужен опорный конус в III калибре, который направлен в противоположную сторону опорному конусу II (предчистового) калибра.

Таким образом, надобность в сложных при изготовлении и настройке двусторонних конусах отпадает. Оказалось достаточным иметь только один опорный конус, воспринимающий осевые усилия, возникающие при прокатке в предчистовом калибре (см. рис. 36). В V — VII калибрах, расположенных на валках I клетки трио 650, вертикальные проекции удалось выполнить практически одинаковыми. Как и следовало ожидать, при прокатке в этих калибрах, осевые усилия не возникают и опорные конусы не требуются. Конфигурация калибров I клетки трио 650 не вызывает никаких трудностей в процессе прокатки, который идет также устойчиво, как и при производстве простых фасонных профилей.

Из анализа результатов прокатки боковины шахтного конвейера СП-63 видно, что способ постепенного сгибания весьма эффективен при прокатке несимметричных профилей с высокими полками. Разработанная и успешно введенная в производство калибровка боковины шахтного конвейера СП-63 способом постепенного сгибания, кроме значительных технологических преимуществ, обеспечивает уменьшение врезов в валки и исходных диаметров бочек прокатных валков.

На рельсобалочном стане освоена прокатка по калибровке способом постепенного сгибания боковины шахтного конвейера СП-73, имеющей разность в высоте полок 55 мм. Такая разность в высоте полок создает еще большие трудности, чем при прокатке боковины шахтного конвейера СП-63. Кроме того, вторая отрицательная особенность профиля боковины шахтного конвейера СП-73 заключается в весьма большой высоте одной из полок, которая с учетом плюсового допуска равна 145 мм. Большая высота полки требует большой глубины вреза в валки. Валки с глубокими врезами имеют недостаточную прочность, что может явиться причиной поломок и простоев стана. Указанные особенности профиля боковины шахтного конвейера СП-73 значительно затрудняют производство, а прокатка его по прямополочной калибровке сопряжена с огромными трудностями и, вероятно, даже невозможна.

Применение калибровки способом постепенного сгибания полок позволило почти полностью устранить указанные трудности. Так, уже в III калибре вертикальные проекции большой и малой полок удалось выполнить с такой небольшой разницей, что она не вызывает значитель-

ных осевых усилий, для восприятия которых нужен опорный конус, направленный в противоположную сторону опорному конусу II (предчистового) калибра.

Применение калибровки способом постепенного сгибания полок позволило также значительно уменьшить врезы в валки и уменьшить исходные диаметры бочек прокатных валков I и II клеток трио.

Расчет увеличения прочности валков в опасном сечении благодаря уменьшению глубины вреза ручьев в бочки валков показывает, что применение калибровки способом постепенного сгибания полок для прокатки профиля СП-73 на рельсобалочном стане дает такие же преимущества, как и для профиля СП-63 на крупносортом стане 650.

Исходным материалом для прокатки боковины шахтного конвейера СП-73 с постепенным сгибанием служила заготовка 245 × 320 мм длиной 3,1—4,3 м из стали марки 30Г. Исходный блюм прокатали на обжимной клетки 900 за семь проходов по следующей схеме

Номер прохода	1	2	3	4	5	6	7
Номер калибра	I	I	I	II	III	III	IV
Кантовка, град	—	—	90	90	—	—	—

Черновую заготовку СП-73 прокатали на чистовой линии стана в готовый профиль также за семь проходов по схеме 3—3—1 (по три в черновых клетях трио 850 и один проход в чистовой клетке дуо 850).

Опытная прокатка боковины шахтного конвейера СП-73 еще раз подтвердила, что разработанный метод расчета калибровки способом постепенного сгибания обеспечивает получение профиля в пределах допусков при первом опробовании. Это позволило выполнить заказ (~600 т) с первой закладки валков.

Следует отметить, что предложенный метод расчета калибровки сложных несимметричных профилей может быть использован и для других подобных фасонных профилей, т. е. он обладает известной универсальностью.

4. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОКАТКИ ШВЕЛЛЕРОВ И ДРУГИХ ПРОФИЛЕЙ СПОСОБОМ ПОСТЕПЕННОГО СГИБАНИЯ ПОЛОК

При применении калибровки способом постепенного сгибания для прокатки швеллеров, уголков и боковин шахтного конвейера оказалось возможным вести прокатку

на больших скоростях без применения сложной арматуры валков, достигнуть повышения износостойкости валков, высокой производительности и значительного снижения средней массы 1 м профиля. Это обеспечило высокую экономическую эффективность прокатки указанных профилей.

Улучшение технико-экономических показателей при прокатке швеллеров, уголков и боковин шахтного конвейера по калибровке способом постепенного сгибания полок достигнуто за счет уменьшения глубины вреза ручьев в валки и величины исходных диаметров бочек прокатных валков, благодаря чему сократился их расход и возросла прочность в опасном сечении. Уменьшение разности рабочих диаметров по периметру калибра и скольжения металла полосы относительно поверхности валков уменьшило работу сил трения и повысило износостойкость валков, а уменьшение неравномерности деформации по ширине полосы способствовало уменьшению концевой обрезки. Кроме того, улучшению технико-экономических показателей способствовала частичная замена стальных кованных валков относительно дешевыми и износостойкими чугунными валками, возможность настройки стана по мере износа калибров; последнее обеспечило прокатку в минусовом поле до полного износа валков и позволило снизить примерно на 1—2% среднюю массу 1 м профиля. Увеличение прочности буртов у развернутой калибровки способом постепенного сгибания полок благодаря уменьшению глубины вреза ручьев и скалывающих усилий на бурты позволило уменьшить размер буртов, разместить на валках дублирующие калибры, что также способствовало увеличению срока службы валков.

Данные о стойкости валков рельсобалочного стана при прокатке швеллера № 30 и характеристика валков при прокатке указанного номера швеллера приведены в табл. 22. Стойкость одного комплекта валков оценивали по суммарной массе прокатанного швеллерного профиля за несколько переточек до полного их износа.

Из табл. 22 видно, что при прокатке по калибровке способом постепенного сгибания полок, стойкость валков обжимной клетки в 2,1 раза больше, чем при прокатке по прямополочной калибровке, а масса комплекта валков меньше на 3,0 т. Стойкость валков I клетки трио 850 соответственно выше почти в два раза, а масса комплекта меньше на 7,36 т и стальные валки заменены на чугунные;

Таблица 22

Стойкость валков при прокатке швеллера № 30 по прямополочной калибровке (числитель) и калибровке способом постепенного сгибания (знаменатель)

Клеть	Материал валков	Стойкость одного комплекта, т	Максимальный диаметр валка, мм			Масса одного калиброванного валка, т			Масса одного комплекта валков, т
			верхний	средний	нижний	верхний	средний	нижний	
Обжимная дуо 900	Сталь	100000	1215	—	975	18,25	—	13,09	31,64
	Сталь	210000	1075	—	975	15,54	—	13,09	28,64
I трио 850	Сталь	23500	970	1050	970	9,14	10,5	9,14	39,18
	Чугун	46500	920	950	920	7,83	8,13	7,83	31,92
II трио 850	Сталь	14000	1030	1040	1030	10,01	10,25	10,01	40,52
	Чугун	21500	970	1000	970	8,61	8,9	8,61	35,02

увеличена в 1,54 раза стойкость валков II клетки трио 850 при уменьшении их массы на 5,5 т.

Для прокатки швеллера № 30 в количестве, например 79100 т, расход прокатных валков приведен в табл. 23.

Затраты на валки при прокатке по прямополочной калибровке составляют:

$$386,191 (547,0 - 29,9) = 199694 \text{ руб.},$$

где 547,0 руб. — стоимость 1 т калиброванных стальных валков; 29,9 руб. — стоимость 1 т стального лома.

Затраты на валки при прокатке по развернутой калибровке соответственно составляют:

$$10,788 (547,0 - 29,9) + 183,141 (267,0 - 59,30) = 43616 \text{ руб.},$$

где 267 руб. — стоимость 1 т калиброванных чугунных валков; 59,3 руб. — стоимость 1 т чугунного лома.

Экономия на валках при прокатке швеллера № 30 по калибровке способом постепенного сгибания составляет:

$$199694 - 43616 = 156078 \text{ руб.}$$

Экономия от снижения на 1% массы 1 м швеллера № 30 составляет:

$$0,01 \cdot 79100 (92,27 + 98,85 + 104,03) 0,333 = 77734 \text{ руб.}$$

Таблица 23

Расход валков при прокатке швеллера № 30 по прямополочной калибровке и калибровке способом постепенного сгибания

Клеть	По прямополочной калибровке		По способу постепенного сгибания полок	
	число комплектов	валков, <i>m</i>	число комплектов	валков, <i>m</i>
Обжимная 900	0,791	25,027	0,3767	10,788
I трио 850	3,666	132,216	1,7011	54,299
II трио 850	5,650	228,938	3,6791	128,842
Всего		386,181 (стальных)		10,788 (стальных) 183,141 (чугунных)

где 92,27 — стоимость 1 *m* швеллеров № 30 из кипящей стали;

98,85 — стоимость 1 *m* швеллеров № 30 из полуспокойной стали;

104,03 — стоимость 1 *m* швеллеров № 30 из спокойной стали.

Тогда суммарный экономический эффект, полученный от перехода на прокатку швеллера № 30 по калибровке способом постепенного сгибания, будет $156078 + 77734 = 233\,812$ руб.

Экономическую эффективность прокатки других профилей способом постепенного сгибания рассчитывают аналогичным образом.

Приведенный расчет свидетельствует о получении существенного экономического эффекта при прокатке некоторых профилей по калибровке способом постепенного сгибания полок.

При этом следует отметить, что в приведенном расчете экономической эффективности не учтено положительного влияния и других факторов, улучшающих технико-экономические показатели, среди которых следует назвать сокращение расхода энергии при новой калибровке за счет уменьшения работы сил трения в развернутых калибрах, уменьшения обрезки переднего и заднего концов швеллерной полосы благодаря более равномерной деформации металла по ширине калибра и др.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бейнон Р. Е. Калибровка валков и расположение прокатных станов. Металлургиздат, 1961.
2. Бахтинов Б. П. Сталь, 1960, № 4 с. 330.
3. Бахтинов Б. П., Штернов М. М. Калибровка балок и швеллеров. Металлургиздат, 1950.
4. Труды НТО ЧМ, т. X. Металлургиздат, 1956, с. 387, 199, 384.
5. Бахтинов Б. П., Штернов М. М. Калибровка прокатных валков. Металлургиздат, 1953.
6. Чекмарев А. П. и др. Производство облегченных профилей проката. Изд-во «Металлургия», 1965.
7. Грум-Гржимайло В. Е. Прокатка и калибровка. Изд-во «Кубуч», Ленинград, 1933.
8. Чекмарев А. П., Машковцев Р. А. Износ прокатных валков. Металлургиздат, 1955.
9. Сидельковский М. П. и др. Усовершенствование технологии в прокатных цехах на базе передового опыта. Металлургиздат, 1953.
10. Чекмарев А. П., Машковцев Р. А. Сталь, 1954, № 11, с. 1008.
11. Воронцов Н. М. и др. НИИИНФОРМТЯЖМАШ, Металлургическое машиностроение, вып. 5, 1965.
12. Бахтинов Б. П., Кноблох А. К. Сталь, 1944, № 11—12, с. 366.
13. Литовченко Н. В. и др. Калибровка валков сортовых станов. Металлургиздат, 1963.
14. Кучко И. И. В сб. «Технический прогресс в технологии прокатного производства». Металлургиздат, 1960, с. 214.
15. Мец Н. Горячая прокатка и калибровка валков. Гостехиздат, 1937.
16. Старченко Д. И. Развернутая калибровка фасонных профилей. Металлургиздат, 1952.
17. Кучко И. И. Бюллетень ЦИИИ ЧМ, 1961, № 17, с. 37.
18. Макаев С. В. и др. Производство облегченных профилей. Металлургиздат, 1962.
19. Штернов М. М. Калибровка угловой стали. Металлургиздат, 1961.
20. Виноградов А. П., Виноградов Г. А. Калибровка прокатных валков. Металлургиздат, 1950.
21. Хофф Х., Даль Т. Прокатка и калибровка. Металлургиздат, 1957.
22. Шушум Б. М. В сб. «Металлургия» № 6. Судпромгиз, 1963, с. 70.
23. Кучко И. И., Кудрявцев Н. П. Сталь, 1959, № 6, с. 538.

24. Веупон R. E. Iron and Steel Eng., 1945, v. 22, № 2, p. 35.
25. Camp I. M. and Francis C. B. The Waking and Treating of Steel. United States Steel Corporation, Pittsburgh, 1951.
26. Старченко Д. И. В сб. «Обработка металлов давлением». Металлургиздат, 1952, с. 322.
27. Кочетов И. М. Металлург. 1958, № 12, с. 29.
28. Сб. «Калибровка прокатных валков». Изд-во «Металлургия», 1965, с. 177, 275, 152.
29. Müller O., Beier G. Neue Hütte, 1960, Bd 5, S. 543.
30. Илюкович Б. М. Сталь, 1961, № 7, с. 621.
31. Илюкович Б. М. Сталь, 1964, № 6, с. 532.
32. Полухин П. И. Прокатка и калибровка двутавровых балок. Металлургиздат, 1956.
33. Полухин П. И. и др. Прокатное производство, изд. II. Изд-во «Металлургия», 1968.
34. Павловский В. Я. и др. Сталь, 1966, № 12, с. 1120.
35. Павлов И. М. В сб. «Обработка металлов давлением» (МИСиС и МЭИ) ч. I, вып. 61, МЭИ, 1965, с. 5.
36. Павлов И. М. Теория прокатки. Металлургиздат, 1950.
37. Чекмарев А. П. и др. Теория продольной прокатки. Изд-во Харьковского государственного университета, 1965.
38. Голубев Т. М., Зайков М. А. Труды Сибирского металлургического института, вып. I. Металлургиздат, 1954, с. 69.
39. Жадан В. Т., Стефанов В. Е. В сб. «Пластичность и обработка металлов давлением». Изд-во «Наука и техника», 1966, с. 54.
40. Савченко А. М. В сб. «Пластическая и термическая обработка стали» (ЖМИ), вып. 8. Металлургиздат, 1962, с. 20.
41. Павлов И. М., Капустина М. И. В сб. «Производство и обработка стали» (МИС), вып. XXIX. Металлургиздат, 1950, с. 120.
42. Полухин П. И., Жадан В. Т. В сб. «Обработка стали и сплавов» (МИС), вып. XXXVI. Металлургиздат, 1957, с. 246.
43. Мерекин Б. В. Некоторые вопросы калибровки прокатных валков. Изд-во «Металлургия», 1964.
44. Чекмарев А. П. и Машковцев Р. А. Труды НТ ЧМ, т. 6. Металлургиздат, 1955, с. 29.
45. Грозин Б. Д. Износ металлов. Гостехиздат УССР, 1951.
46. Конвисаров Д. В. Трение и износ металлов. Машгиз, 1947.
47. Чекмарев А. П. Калибровка фланцевых профилей. Труды НТО ЧМ, т. II, Днепропетровск. Областное изд-во, 1957, с. 151.
48. Мутьев М. С. Калибровка черновых валков. Изд-во «Металлургия» 1964.
49. Павловский В. Я. и Дубровин Ф. С. Сталь, 1964, № 9, с. 828.
50. Гунин И. В. и др. В сб. «Технология производства и свойства черных металлов» (УкрНИИмет), вып. XII. Изд-во «Металлургия», 1967, с. 184.
51. Старченко Д. И. и др. В сб. «Улучшение качества проката», Изд-во «Донбасс», Донецк, 1968, с. 25.

53 коп.

Рисунки

19.000000



ИЗДАТЕЛЬСТВО МЕТАЛЛУРГИЯ 1970