ПРОКАТКА И КАЛИБРОВКА ФАСОННЫХ ПРОФИЛЕЙ

СПРАВОЧНИК

ПРОКАТКА И КАЛИБРОВКА ФАСОННЫХ ПРОФИЛЕЙ

СПРАВОЧНИК

Москва "Металлургия" 1989

УДК 531.729:621.753.3:621.771

Рецензент – канд. техн. наук *М.Л. Зайцев*

Б.М. Илюкович, В.Т. Жадан, И.П. Шулаев, Н.Е. Нехаев

УДК 531.729:621.753.3:621.771

Прокатка и калибровка фасонных профилей: Справ. изд./Илюкович Б.М., Жадан В.Т., Шулаев И.П., Нехаев Н.Е. – М.: Металлургия, 1989. 312 с.

Обобщен и проанализирован опыт проектирования калибровок фасонных профилей полосового типа. Рассмотрены теоретические основы калибровки сложных профилей, сущность и задачи оптимизации калибровки прокатных валков (расчета калибровки на ЭВМ), экспериментальные исследования формоизменения, математическое моделирование технологического процесса. Изложена методика расчета формоизменения при прокатке основных групп фасонных профилей – полосовых симметричных и асимметричных, с клиновидными элементами, асимметричных профилей с отогнутыми краями, профилей желобчатой формы и шарнирного типа, полособульбовых профилей и с утолщениями на конце, а также профилей с ребрами жесткости.

Для инженерно-технических работников металлургической и машиностроительной промышленности. Ил. 233. Табл. 15. Библиогр. список: 13 назв.

П $\frac{2607000000-224}{040(01)-89}$ 62–89

ISBN 5-229-00261-1

© Издательство "Металлургия", 1989

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение 5

Глава 1. **Теоретические основы калибровки фасонных профилей**

1. Технологическая классификация 8
2. Прокатные валки 11
3. Валковая арматура и настройка стана 15
4. Элементы калибровки валков 22
5. Проектирование калибровки 28
6. Конструирование калибров 34
7. Расположение калибров на валках 58
8. Коэффициенты деформации и распределение обжатий по проходам . . . 69

Глава 2. **Оптимизация технологии и калибровки**

1. Сущность оптимизации в прокатном производстве 73
2. Задачи оптимизации калибровки прокатных валков 75
3. Расчет калибровки на ЭВМ 81
4. Математическое моделирование технологического процесса стана 370 . 83

Глава 3. **Методика расчета формоизменения при прокатке фасонных профилей**

1. Факторы формы калибра, определяющие течение металла в очаге деформации 87
2. Методы приведения фасонного калибра к соответственному 90
3. Экспериментальные исследования формоизменения при прокатке с неравномерным обжатием 94
4. Проверочный расчет калибровки крестообразного профиля сечением 48X34X12X7 мм 97

Глава 4. **Полосовые симметричные и асимметричные профили**

1. Сортамент и схемы прокатки 100
2. Прокатка профилей для рессор автомобилей и железнодорожного транспорта 105
3. Экспериментальные исследования формоизменения при прокатке Т-образных профилей 109
4. Калибровки полосовых симметричных и асимметричных профилей . . 110

Глава 5. **Профили с клиновидными элементами**

1. Сортамент и схемы прокатки 119
2. Экспериментальные исследования формоизменения при прокатке клиновидных профилей 124
3. Прокатка клиновидных профилей 126

Глава 6. **Асимметричные профили с отогнутыми краями**

1. Технические требования и сортамент 138
2. Схемы прокатки профилей с отогнутыми краями 140
3. Расчет калибровки при прокатке профилей ободов 142
4. Освоение профиля замочного основания обода колеса 6.00F-16 151
5. Освоение профиля основания обода колеса 5.00P-20 154
6. Освоение профиля основания обода колеса 310-533 161
7. Прокатка профиля обода колеса автомобиля ЗИЛ-157 167
8. Калибровка и прокатка ободов на непрерывных станах 168
9. Прокатка и калибровка профилей для ободов колес автомобилей . . . 172

Глава 7. **Профили желобчатой формы и шарнирного типа**

1. Схемы прокатки и сортамент профилей желобчатой формы и шарнирного типа 179
2. Методика калибровки профилей желобчатой формы при постоянной конфигурации средней линии 181

3. Проектирование калибровки профиля стойки рефрижератора 184
4. Экспериментальные исследования формоизменения при прокатке профилей с утолщениями по краям 187
5. Методика калибровки полосовых профилей с круглыми утолщениями по краям 188
6. Производство профилей дверных петель высокой точности 195
7. Прокатка и калибровка профилей желобчатой формы и шарнирного типа 197

Глава 8. **Полособульбовые профили и профили с утолщениями на конце**

1. Технические требования и сортамент. 223
2. Прокатка и калибровка полособульбовой стали 224
3. Прокатка полособульбовой стали в сдвоенном виде. 229
4. Основные положения калибровки полособульбовой стали в П-образных калибрах 232
5. Освоение профилей с утолщениями на конце 236

Глава 9. **Профили с ребрами жесткости**

1. Сортамент и схемы прокатки 251
2. Экспериментальные исследования формоизменения при прокатке профилей с ребрами жесткости 259
3. Прокатка и калибровка профилей с ребрами жесткости 270

Библиографический список. 309

ВВЕДЕНИЕ

В Основных направлениях развития народного хозяйства СССР на 1986–1990 годы и на период до 2000 года поставлена задача дальнейшего расширения сортамента, улучшения качества и увеличения выпуска экономичных видов проката. В настоящее время в СССР прокатывают более 3700 сортовых профилей из 800 марок стали. Сортамент постоянно расширяется и обновляется, ежегодно осваивается 50–60 новых сортовых профилей проката. За последние 15 лет сортамент сортового проката расширен в 1,3 раза и обновлен на 43 % в результате освоения производства профилей отраслевого назначения.

Основными направлениями развития сортамента в СССР являются увеличение в нем доли экономичных профилей общего и отраслевого назначения, рационализация формы и расширение диапазона размеров сортовых профилей, приближение их к конфигурации готовых изделий. Большое внимание уделяется повышению качества проката путем термической обработки, расширению выпуска сортового проката с повышенной точностью размеров в минусовом поле допусков и поставкой готовой продукции по теоретической массе, а также проката с улучшенными механическими свойствами, дифференцированного по группам прочности. Это обеспечивает значительную экономию металла и трудовых затрат.

Для большинства новых профилей, намеченных к освоению, УкрНИИметом, НИИ и отраслевыми лабораториями совместно с металлургическими предприятиями разрабатывается необходимая нормативно-техническая документация, технология производства, калибровки валков, проводятся опытные и промышленные прокатки, анализируются их результаты.

Около 25 % особо сложных профилей требуют разработки новой технологии производства, создания и проверки технических решений на уровне изобретений. Для таких профилей разрабатывается технология производства, которая проходит предварительную обработку на опытно-промышленных станах, что позволяет в 2–3 раза уменьшить потери рабочего времени при освоении новых профилей на металлургических предприятиях. При этом потребители имеют возможность получать партии профилей для испытания в машинах и сооружениях до поставки их на массовое производство. Общий цикл от разработки до внедрения новых профилей в этом случае сокращается в 1,5–2,0 раза.

За годы последних трех пятилеток в сортамент сортового проката включено 806 новых профилей и исключено 370 устаревших. Наибольшая экономия металла за этот период от использования новых профилей получена в строительстве, автомобильной промышленности, тяжелом и транспортном машиностроении. Для этих отраслей освоено 41,4 % всех новых профилей, объем производства которых составил 82,4 % выпуска новых видов сортового проката.

Около 95 % металлопродукции выпускается в СССР по государственным стандартам. В настоящее время в черной металлургии действует более 1200 государственных стандартов и более 4500 технических условий. Увеличение объемов применения экономичных видов металлопродукции позволило сократить расход металла в 1980 г. по сравнению с 1975 г. на 2,8 млн.т., в 1985 г. по сравнению с 1980 г.– на 4,2 млн.т.

Наряду с расширением сортамента эффективным средством экономии металла является совершенствование формы профиля с целью повышения его служебных характеристик и приближение формы прокатываемых профилей к форме готовых изделий, позволяющее снизить трудоемкость их изготовления, уменьшить отходы металла и сократить парк металлорежущих станков.

Расчеты калибровок сложных фасонных профилей и их освоение требуют большого инженерного искусства и занимают много времени. Еще в 30-е годы известный ученый и калибровщик В. Тафель подчеркивал, что опытный калибровщик достигает совпадения пробных темплетов с шаблонами уже с первой пробы; менее опытный, но правильно рассчитывающий и рассуждающий калибровщик, достигает того же со второй или при трудных калибровках самое большее с третьей настройки. Кто принужден делать настройку больше трех раз, тот не понимает своего дела.

Большой не только практический, но и теоретический интерес представляет [1] анализ и обобщение опыта проектирования калибровок новых и прокатываемых сложных профилей. В связи с отсутствием систематизированных научных рекомендаций калибровка сложных профилей, одинаковых или близких по конфигурации, проектируется зачастую по-разному и на основе различных методов, выбор которых зависит от опыта и знаний калибровщика. Обобщение опыта проектирования и освоения калибровок сложных профилей имеет большое прикладное значение.

Расчеты калибровок сложных профилей требуют большого инженерного опыта. Ошибки в выборе схем прокатки, расположения калибров на валках и режима деформации приводят к большим затратам времени и денежных средств. Обычно на основании практических данных считают, что освоение нового фасонного профиля требует две-три опытные прокатки, потери времени при которых составляют от 8 до 20 ч, а производственные потери достигают 800–4000 т. На изготовление валков и валковой арматуры на сортовых станах расходуется до 20 тыс. руб., а на рельсобалочных станах до 65–80 тыс. руб.

Несмотря на издание в последнее время ряда руководств и справочников по калибровке прокатных валков, все еще отсутствуют фундаментальные и систематизированные обобщения опыта проектирования калибровок сложных профилей. К таким профилям относятся фасонные профили полосового типа, которым и посвящена данная книга.

В предлагаемой книге рассматриваются теоретические основы калибровки фасонных профилей, расположение калибров на валках, формоизменение в калибрах, вопросы оптимизации, экспериментальные исследования формоизменения, схемы прокатки и т.д.

Авторский коллектив выражает глубокую благодарность калибровщикам и технологам металлургических заводов за помощь в подборе калибровок и практические советы при подготовке книги к изданию. Авторы также благодарят сотрудников отраслевой лаборатории прокатки Днепродзержинского индустриального института М.Н. Крячко и Т.В. Яровую за активное участие в подготовке и оформлении рукописи.

Глава 1.
ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КАЛИБРОВКИ ФАСОННЫХ ПРОФИЛЕЙ

1. Технологическая классификация

Сортамент фасонных профилей, применяемых в различных отраслях промышленности СССР, насчитывает [2, 3, 4] более трех тысяч профилей, форма и размеры которых весьма разнообразны. Средняя продолжительность применения каждого профиля не превышает обычно 5—10 лет. В связи с интенсивным развитием машиностроения, строительства, сельского хозяйства и других отраслей промышленности потребность в новых экономичных профилях специального назначения непрерывно увеличивается. Применение профилей отраслевого назначения обеспечивает, как правило, значительную экономию металла и трудовых затрат у потребителя. Экономический эффект от использования таких профилей в народном хозяйстве в несколько раз больше, чем от сортовых профилей общего назначения. Форма поперечного сечения многих новых профилей не имеет аналогов среди освоенных профилей, и поэтому для их прокатки приходится разрабатывать новые схемы калибровки.

Опыт калибровщиков в основном базируется на прокатке профилей данного завода. Следовательно, большой теоретический и особенно практический интерес представляет обобщение опыта создания и освоения калибровок профилей отраслевого назначения. Анализ калибровок и схем прокатки различных профилей показывает [1, 2, 3, 4], что все профили можно разделить на отдельные технологические группы, в зависимости от формы калибров, в которых получают профиль, и методов или приемов прокатки. При этом каждая технологическая группа, естественно, имеет свои особенности. Несмотря на некоторые допущения, классификация всегда полезна при изучении того или иного вопроса. Наиболее полная и детальная классификация профилей отраслевого назначения, приведенная в работе [1], основана на следующих основных положениях:

весь сортамент профилей отраслевого назначения разделен на технологические группы с учетом принципов их калибровки и схем прокатки;

каждая группа включает профили примерно одинаковой формы;

симметрия профилей каждой группы должна быть вообще одинакова (две оси симметрии, вертикальная ось симметрии, горизонтальная ось симметрии, асимметричные профили);

схемы калибровки профилей одной группы имеют принципиальную общность;

отношение ширины профиля к его высоте в каждой группе задано в определенных пределах.

Технологические группы подобных по форме профилей объединены в классы. Предложенная классификация включает 16 классов, которые

Таблица 1. Классификация профилей проката отраслевого назначения по группам и классам

Класс	Название класса профилей	Номера групп, входящих в класс
I	Полосовые с осями симметрии	1,2
II	То же клиновидные	3 – 6
III	" с отогнутыми краями	7
IV	" с утолщениями по краям	8 – 10
V	Полособульбовые	11
VI	Полосовые с ребрами жесткости	12 – 14
VII	С-образные	15 – 18
VIII	Профили с отношением ширины к высоте $b/h \leqslant 4$	19 – 22
IX	Тавровые и крестообразные	23 – 25
X	Угловее	26 – 28
XI	Швеллерообразные	29 – 31
XII	Корытообразные	32 – 34
XIII	Двутавровые	35 – 37
XIV	Рельсовые	38
XV	Зетовые	39, 40
XVI	Профили особо сложной формы	41 – 43

в свою очередь состоят из 43 технологических групп. Распределение групп по классам представлено в табл. 1.

В работе [1] для каждой технологической группы приведены типовые примеры конкретных профилей. При отнесении профиля к той или иной технологической группе учтено подобие конфигураций рассматриваемого профиля и профилей данной группы независимо от их отраслевого применения. Форма сечения и взаимное расположение отдельных элементов профиля должны быть аналогичны форме сечения и взаимному расположению составных элементов рассматриваемой группы профилей. Элементы профиля рассматриваются в первую очередь по их расположению относительно осей симметрии профиля, который может иметь одну или две оси симметрии или же быть асимметричным.

Рассмотренная, да и вообще любая технологическая классификация существующего сортамента профилей не учитывает [4] всех мелких особенностей производства каждого профиля, но она позволяет выбрать технологические группы для вновь осваиваемого профиля и тем самым рекомендовать для него принципиальную схему калибровки.

Учитывая, что основную массу горячекатаных профилей, получаемых с использованием четырехвалковых калибров [4], обычно прокатывают в двухвалковых черновых и подготовительных фасонных калибрах, обобщенные технологические группы фасонных профилей следует рассматривать как дополнение к рассмотренной выше технологической классификации фасонных профилей отраслевого назначения, прокатываемых с помощью только двухвалковых калибров.

Среди профилей отраслевого назначения в значительных количествах прокатываются разнообразные фасонные профили полосового

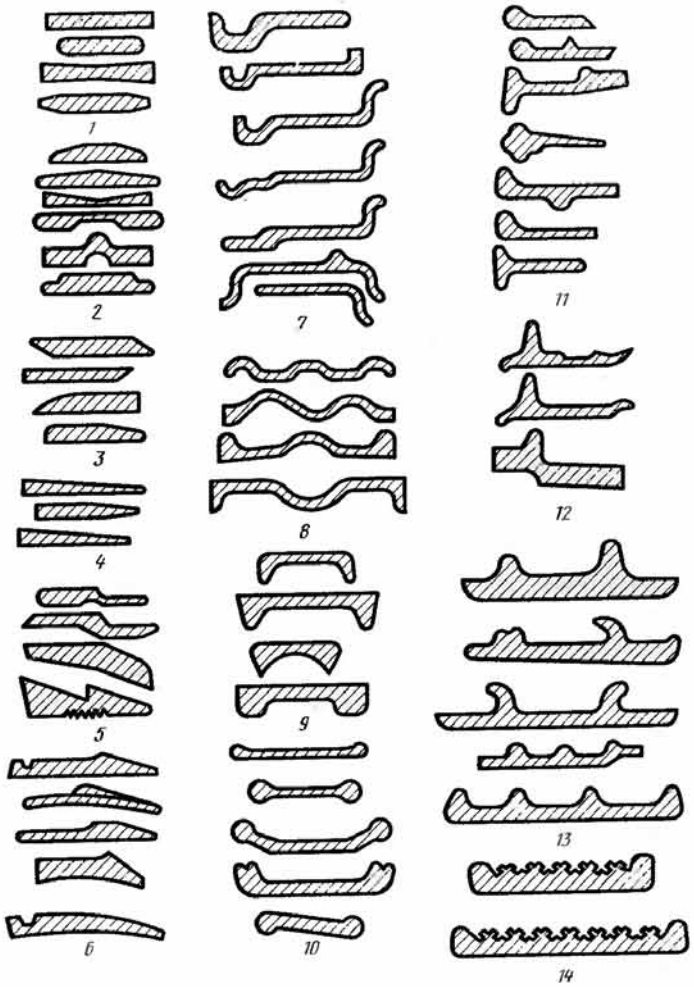


Рис. 1. Технологические группы сложных сортовых профилей отраслевого назначения: *1* – полосовые с двумя осями симметрии; *2* – полосовые с вертикальной осью симметрии; *3* – полосовые асимметричные; *4* – полосовые клиновидной формы; *5* – клиновидные асимметричные; *6* – полосовые асимметричные с клиновидными утолщениями; *7* – полосовые асимметричные с отогнутыми краями; *8* – полосовые желобчатой формы; *9* – полосовые с остроугольными утолщениями по краям; *10* – полосовые с круглыми утолщениями по краям; *11* – полособульбовые; *12* – полосовые одногребневые асимметричные; *13* – полосовые двух-и более гребневые; *14* – полосовые с продольными выступами в виде "ласточкина хвоста"

типа (группы 1–14), приведенные на рис. 1 в соответствии с технологической классификацией.

Кроме классификации по технологическим признакам производства, все сложные профили в зависимости от условий их применения разделяют [2] на две основные группы:

профили, используемые в промышленности и сельском хозяйстве как отдельные детали машин и механизмов;

профили, которые в машинах и механизмах используют в сопряжении с другими профилями или деталями.

К профилям второй группы предъявляют повышенные требования к точности конфигурации и размеров тех элементов, которые работают в сопряжении. Одним из основных потребителей этих профилей является автомобилестроение, и в первую очередь колесное производство грузовых автомобилей. Чтобы выбрать наилучшую схему прокатки, обеспечивающую наиболее точное выполнение участков сопряжения отдельных профилей, необходимо до начала разработки технической документации и технических условий на поставку профилей провести тщательную проработку сборочного чертежа и характера узла сопряжения профилей. Наиболее приемлемой и рациональной является совместная с потребителем разработка конструкции профиля с учетом условий прокатного производства и условий машиностроителей.

2. Прокатные валки

Чугунные валки характеризуются по сравнению со стальными пониженной прочностью, но обладают высокой износостойкостью и высокой твердостью. Их применяют иногда в черновых, но главным образом в предчистовых и чистовых клетях. В последние годы просматривается тенденция замены стальных валков чугунными, где это только возможно.

Чугунные валки для сортовых станов горячей прокатки изготавливают [6] по ГОСТ 11143–65 следующих видов: из нелегированного чугуна с пластинчатым (СП) и шаровидным (СШ) графитом; из легированного хромом и никелем чугуна с пластинчатым (СПХН) и шаровидным (СШХН) графитом.

Нелегированные чугунные валки с пластинчатым графитом (СП) изготавливают с отбеленным перлито-графитовым и с перлито-карбидо-графитовым рабочим слоем.

Легированные чугунные валки с пластинчатым графитом (СПХН) изготавливают с отбеленным или перлито-карбидо-графитовым рабочим слоем, а также двухслойными с рабочей поверхностью из легированного отбеленного чугуна и с сердцевиной из серого или легированного чугуна.

Нелегированные чугунные валки с шаровидным графитом (СШ) изготавливают с отбеленным перлито-графитовым и перлито-карбидо-графитовым рабочим слоем.

Легированные чугунные валки с шаровидным графитом (СШХН) изготавливают с перлито-карбидо-графитовым рабочим слоем, а также двухслойными с рабочей поверхностью из легированного отбеленного чугуна и с сердцевиной из серого или легированного чугуна. Все указанные выше типы чугунных валков отливают гладкими или с профильными ручьями.

Твердость поверхности бочек отбеленных чугунных валков, как правило, определяют приборами Шора. Твердость валков с перлито-карбидо-графитовой структурой должна определяться по Бринеллю.

Твердость каждого валка должна быть измерена. Спад твердости $C_т$ характеризуется разностью показаний твердости, выраженной в процентах:

$$C_т = \frac{H_п - H_д}{H_п} 100\ \%,$$

где $H_п$ – твердость на расстоянии 10 мм от поверхности бочки; $H_д$ – твердость на расстоянии от поверхности соответственно: до 40 мм – для мелкосортных; до 50 мм – для среднесортных; до 75 мм – для крупносортных; до 100 мм – для рельсобалочных валков.

Стальные валки для сортовых станов горячей прокатки по ГОСТ 9487–70 (технические требования) и ГОСТ 5399–69 (основные размеры) могут быть литыми и коваными. Стальные литые валки для горячей прокатки отливают из доэвтектоидных (0,45–0,70 % С, 24–27 *HS*), эвтектоидных (0,75–0,85 % С, 30–40 *HS*) и заэвтектоидных (1,1–1,6 % С, 32–50 *HS*) сталей. Стальные кованые валки изготавливают для рельсобалочных и крупносортных станов из сталей: 50, 55, 55Х, 40ХН, 50ХН, 60ХН, 9Х и 9ХФ; среднесортных станов из сталей: 50, 55, 55Х и 50 ХН; мелкосортных станов из сталей: 50, 55, 55Х и 60ХГ. Для валков среднесортных и мелкосортных станов применяют также литые валки из стали 150ХНМ.

Химический состав металла валков должен соответствовать ГОСТ 1050–74 для сталей марок 50 и 55; ГОСТ 4543–71 для сталей марок 40ХН и 50ХН; ГОСТ 5950–73 для стали 9Х.

После определения положения нейтральной линии во всех калибрах делается [2] монтажный чертеж валков, по которому определяется необходимый врез калибров в валки и рассчитываются диаметры промежуточных буртов. На рабочем чертеже проставляются также диаметры, соответствующие характерным элементам калибров.

Монтажные чертежи валков представляют собой контуры совместно работающих валков: если промежуточные бурты валков выше, чем ограничения калибров, то их часто называют положительными буртами, если ниже – отрицательными. Обычно крайние бурты для каждого из валков комплекса делают одинакового диаметра. Эти крайние бурты можно называть опорными. При "посадке вала на вал" соприкасаются своими поверхностями только опорные бурты, а между всеми промежуточными буртами сохраняется небольшой зазор.

Для чугунных валков ширина буртов равна их высоте. В тех случаях, когда нет значительных боковых усилий, ширина буртов может быть меньше. Ширина буртов для стальных литых или кованых валков обычно равна половине их высоты. Крайние бурты

часто делают более широкими, чтобы оставалось достаточно места для установки валковой арматуры.

При разработке монтажных чертежей для трехвалковых клетей минимальное перекрытие в калибре обычно равно 8–10 мм и определяется по первому калибру. По остальным калибрам клети эта величина является произвольной. Если имеется сочетание закрытых и полузакрытых калибров, то диаметры промежуточных буртов не одинаковы, и они конструируются в сдвоенном виде.

Уклоны (выпуски) по разъемам калибров, как правило, небольшие. Во избежание подрезания кромок раската верхней частью стенок калибра иногда бывает целесообразно выполнить уклон дифференцированным, увеличивающимся за пределами очага деформации. Для фиксирования взаимного расположения валков предусматриваются опорные конусы с уклоном 6–8 %. Уклон стенок промежуточных буртов составляет 15–20 %.

При прокатке профилей оснований автоободов, а также других тонкостенных профилей, необходимо предусматривать равенство опорных буртов, так как разница между их диаметрами может привести к кратковременной остановке одного из валков с последующим резким ударом, поломкой муфты или трефа валка. Обычно с учетом выполнения опорных конусов крайние бурты сдвоены. Для обеспечения равенства диаметров крайних опорных буртов иногда приходится предусматривать тройные бурты.

Величина зазоров между наклонно-вертикальными и горизонтальными элементами буртов, а также и в разъемах калибров, определяются следующим образом. При отсутствии зазоров в опорных буртах должны оставаться зазоры между промежуточными буртами не более 0,2–0,3 мм. При этом должна быть исключена также вероятность касания между элементами верхнего и нижнего ручьев. При смещении верхнего валка вправо или влево до соприкосновения опорных буртов должны оставаться зазоры в разъемах калибров до 0,2–0,3 мм, а также зазоры между стенками промежуточных буртов.

Комплект шаблонов должен обеспечить возможность наиболее рациональной последовательности нарезки калибров. На рис. 2 представлен комплект шаблонов для нарезки калибров на валках чистовой клети для прокатки основания обода колеса 6.00F-16, который включает рабочий (*а*), контрольные (*б* и *в*), посадочный (*г*), посадочный на замочную часть (*д*) и вспомогательные (*е, ж, и*) шаблоны.

Прокатные валки комплекта чистовой клети для прокатки обода изготавливаются в определенной последовательности. Обработка начинается с валка, имеющего закрытые ручьи. При этом вначале резцом прямоугольной формы производится врез в средней части калибра до диаметра на 2 мм превышающего указанный на чертеже. Затем фасонными резцами растачиваются последовательно боковые участки, соответствующие замочной и бортовой частям, также с соответствую-

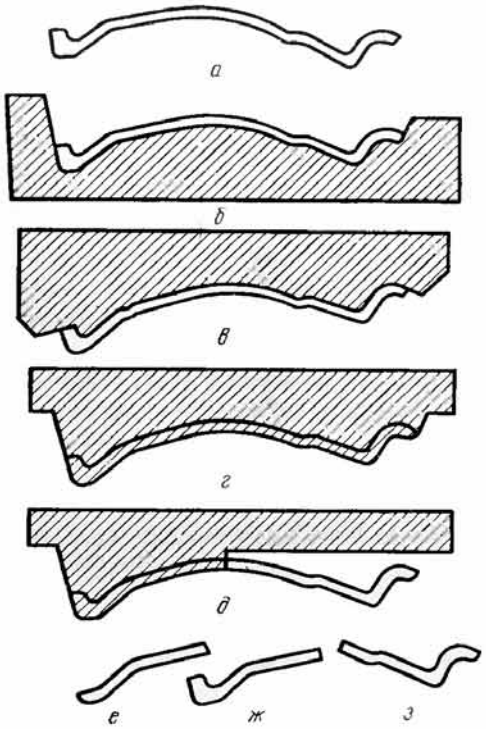


Рис. 2. Комплект шаблонов для нарезки чистового калибра при прокатке профиля замочного основания обода колеса 6.00F-16

щим припуском до 1,5–2,0 мм на чистовую обработку. Далее переходят к чистовой обработке калибров. Глубина вреза контролируется посадочными шаблонами (рис. 2, *г, д*). Открытый ручей калибра верхнего валка обрабатывают с установленным над ним нижним валком, при этом средняя часть калибра растачивается резцом, соответствующим форме профиля.

Первоначально глубина вреза контролируется кронциркулем с припуском на чистовую обработку, затем просвет между опорными буртами устанавливают по чертежу и проводят чистовую обработку калибров, контролируя размеры ручья вспомогательными шаблонами

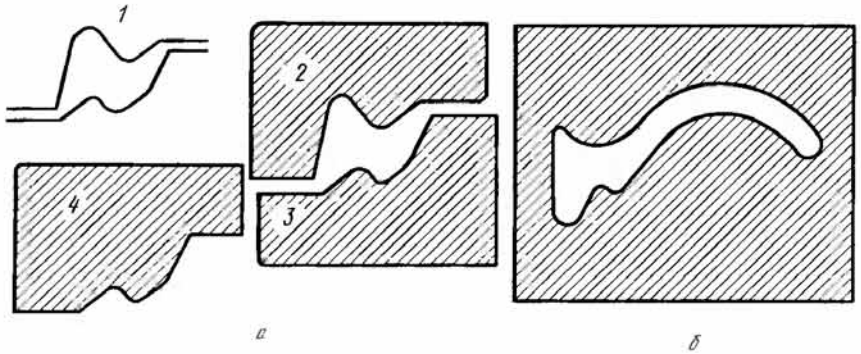


Рис. 3. Комплект шаблонов чистового калибра для прокатки профиля замочного кольца БелАЗ-540 (*а*):
1 – форма калибра; *2* – контрольный шаблон для верхнего ручья; *3* – контрольный шаблон для нижнего ручья; *4* – посадочный шаблон на нижний ручей; контрольный шаблон с замкнутым контуром (*б*) для чистового калибра при прокатке профиля бортового кольца 1099

(рис. 2, *е, ж, и*), а также специальными мерками определенной толщины и рабочим шаблоном (рис. 2, *а*). Контрольные шаблоны (рис. 2, *б, в*) применяют для периодической проверки рабочих и вспомогательных шаблонов, а также для контроля режущей кромки резков. Аналогичная технология используется на вальцетокарных станках при изготовлении валков и для других сложных профилей.

Шаблоны изготавливают слесари-лекальщики (шаблонщики) из тонколистовой стали. Перед разметкой подготавливается исходная заготовка прямоугольной формы, две стороны которой составляют между собой точный угол в 90° и прямизна поверхностей этих сторон подгоняется по лекальной линейке. Эти две прямые стороны являются базовыми, от которых в целях повышения точности изготовления откладываются все размеры шаблона.

На рис. 3 показаны комплект шаблонов для чистового калибра для прокатки замочного кольца БелАЗ-540 (в калибровке замочного кольца применена диагональная система разъемов со свободным уширением кромок) и контрольный шаблон с замкнутым контуром для чистового калибра при прокатке профиля бортового кольца 1099.

3. Валковая арматура и настройка стана

Валковой арматуре в практике работы прокатных станов должно уделяться большое внимание как фактору настройки стана. Соответствующей установкой вводных пропусков, линеек и другой арматуры иногда удается достичь положительных результатов в заполнении элементов профиля за счет смещения металла к левой или правой кромке калибра. Такое перераспределение металла может быть существенным и нередко используется в процессе настройки стана при прокатке несимметричных профилей. Между тем основное назначение валковой арматуры – обеспечение точной задачи полос в калибры и вывод их из калибров – правильнее было бы считать единственным ее назначением, делая исключение только для тех особых ситуаций, о которых будет сказано ниже. Настройка стана должна быть обеспечена прежде всего правильной установкой валков и симметричным относительно калибров расположением арматуры.

Перераспределение металла по элементам сечения за счет арматуры может быть применено только в крайнем случае, когда калибровка еще не доработана и нет другой возможности получить профиль в соответствии с требованиями технических условий. Такой способ следует считать вынужденным и временным, так как он не обеспечивает устойчивых результатов.

Для прокатки фасонных несимметричных профилей применяется преимущественно валковая арматура скольжения: коробки, вводные пропуски, линейки, проводки.

Обычно форма поверхности проводок почти полностью повторяет контур выходящей полосы без ее кромок, вводные пропуски же строятся по характерным плоскостям сечения полосы из предыдущего калибра. Чтобы проводка правильно устанавливалась в калибре и плотно прилегала по всему контуру, необходимо определить ее основные параметры (рис. 4) с учетом катающих диаметров по элементам калибра.

Геометрический метод построения, обычно применяемый при проектировании проводок сортовых станов, является довольно трудоемким и не гарантирует точности размеров. Эти недостатки особенно сказываются при проектировании проводок для фасонных калибров. Как правило, даже незначительные отклонения в размерах приводят к неустойчивому контакту носка проводки с поверхностью ручья.

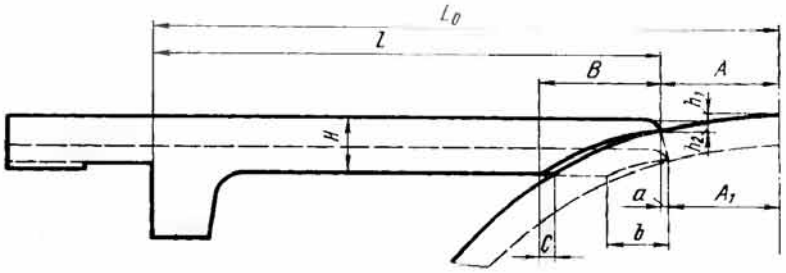


Рис. 4. Проводка для сортовых станов

Аналитический способ определения основных переменных размеров проводок значительно упрощает задачу. Расстояние по горизонтали от осевой плоскости валков до носка проводки A, длина носка B, длина проводки от носка до пятки l, смещение верхнего контура носка a в зависимости от конфигурации калибра определяются из следующих зависимостей (рис. 4):

$$A = \sqrt{(h_1 + h_2)D - (h_1 - h_2)^2};$$

$$B = \sqrt{(H + h_1)D - (H + h_1)^2};$$

$$l = L_0 - A, \quad a = A - A_1.$$

Размер b не рассчитывается, так как при изготовлении проводки профиль носка выполняется из одного центра. Исходя из приведенных формул, можно для каждого стана составить таблицы основных параметров проводки для текущих расчетов в любых интервалах катающих диаметров. Иногда вводные или выводные линейки в результате неравномерного износа оставляют царапины на кромках профиля. В этом случае становится необходимым применение роликовой арматуры.

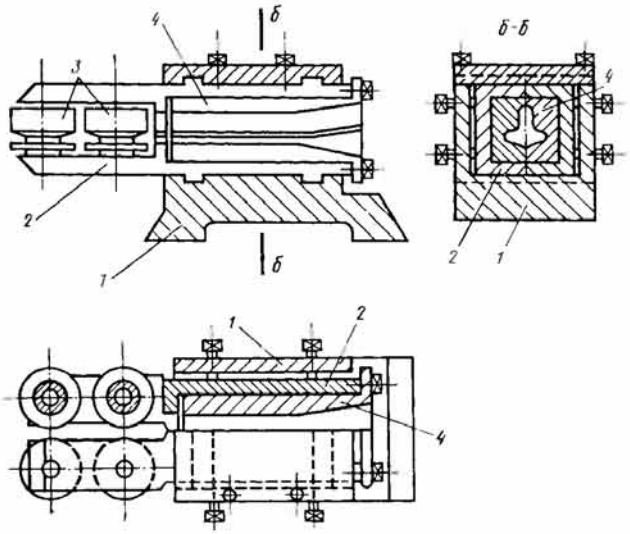


Рис. 5. Роликовая вводная коробка для прокатки тавровой стали

Роликовая арматура для прокатки сложных профилей в последние годы находит все большее применение. Из-за обусловленного роликами большего расстояния от очага деформации желательно использовать двухпарные роликовые коробки, чтобы придать задаваемому в калибр раскату достаточную устойчивость. Это исключает косую подачу и образование лампасов в результате неточного направления полосы в калибр.

На рис. 5 показана двухпарная роликовая коробка для прокатки тавровой стали. Основными деталями приведенной конструкции роликовой арматуры являются корпус коробки *1*, роликодержатели *2* с роликами *3* и фасонные вводные пропуски *4*. Роликовые коробки конструируют с роликами на подшипниках качения и скольжения. Последние имеют меньшие габариты, но в то же время и меньшую стойкость подшипникового узла. Валковая арматура не предназначена для исправления дефектов калибровки и настройки валков. Однако в некоторых случаях такое ее назначение предусматривается заранее, например для устранения скручивания полосы, если форма сечения профиля обуславливает такое расположение калибра, что избежать скручивания невозможно.

Устранение незначительного скручивания с помощью валковой арматуры достигается разными путями:

применением вводных пропусков со смещенным в сторону скручивания контуром ручьев;

установкой роликовой кантующей втулки на выходной стороне;

применением специального выводного желоба с направляющими секторами.

Первый способ наименее целесообразен, так как приводит к повышенному износу вводных пропусков.

При настройке в процессе прокатки автомобильных профилей основное внимание обращается на точное выполнение плоскостей замочной части, находящихся в сопряжении с другими деталями узла. Это относится как к профилям основания ободов колес, так и к профилям замочных и бортовых колец. Если калибровка выполнена правильно, то эти элементы должны быть хорошо сформированы при номинальном расположении валков и арматуры, то есть без взаимного смещения ручьев калибров и смещения валковой арматуры относительно калибров.

Равенство величины зазоров в опорных конусах валков, означающее правильное взаимоположение ручьев калибров, следует соблюдать во всех клетях. Для черновых калибров это не менее важно, чем для чистовых.

Практика работы подтверждает, что чаще всего при настройке стана обращается первоочередное внимание на настройку чистового, реже предчистового калибра. К настройке черновых калибров обычно приходят в последнюю очередь. Это особенно характерно для станов с трехвалковыми клетями. Таким образом, иногда удается исправить ошибки в настройке черновых калибров, но, как правило, настройка только чистового и предчистового калибров не обеспечивает устойчивого нормального процесса прокатки.

Поэтому необходимо стремиться к оптимальному выполнению элементов сечения в первых фасонных калибрах, что обусловливает правильное распределение металла в последующих калибрах, поскольку полоса самоцентрируется в них за счет совпадения контуров сечений полосы и калибра.

Следует заметить, что прокатка на линейных станах с трехвалковыми клетями имеет некоторые дополнительные сложности. Так, например, смещение одного валка относительно другого приведет к изменению условий деформации не в одном, а по меньшей мере в двух калибрах, расположенных в одном горизонте. Кроме того, труднее распределить величину обжатия по толщине между калибрами без нарушения параллельности ручьев. Иногда один и тот же результат (например, заполнение одной из кромок профиля) может быть получен разными путями: осевым смещением одного из валков, увеличением или уменьшением зазора между валками, изменением расположения валковой арматуры и т.д.

Рабочее время старшего вальцовщика прокатного стана ограничено, и он, естественно, стремится максимально сократить время на настройку. Нередко

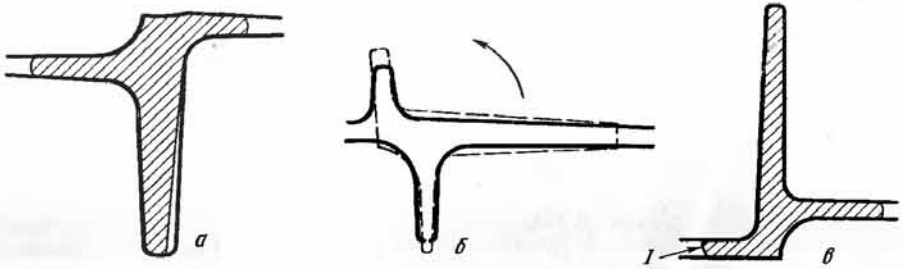


Рис. 6. Схема образования дефекта в случае незаполнения закрытого ручья реброво-го калибра при прокатке профиля № 2:
I – место среза верхним валком предчистового калибра

он выполняет два или три изменения в настройке стана одновременно. Эта практика нецелесообразна, так как она не дает возможности правильно понять технологический процесс на последующее время и такая организация работы всегда приводит к увеличению времени настройки и отклонениям от схемы прокатки, а иногда заводит в тупик даже сравнительно опытного старшего вальцовщика. Для двухвалковых и трехвалковых станов, имеющих к тому же широкий сортамент сложных профилей, такая ситуация не является исключением даже при настройке давно освоенных профилей. Запомнить все выполненные изменения в этом случае невозможно. Исправление одного дефекта может привести к появлению другого в другом элементе сечения.

Для обеспечения рациональной настройки целесообразно установить валки с равными зазорами в опорных конусах, проверить и установить в соответствии с чертежом зазоры между крайними буртами и устранить смещение вводных пропусков относительно калибров, если такое смещение заранее не отмечено в технологической инструкции. Это не удлинит, а, скорее всего, сократит время настройки. После симметричной (без смещения) установки валков и арматуры настройку следует вести в соответствии с технологической инструкцией. Иногда настройку арматуры можно выполнять с применением темплетов от ранее прокатанной партии.

Настройка стана при прокатке сложных профилей требует известных навыков и основывается на опыте прокатки каждого профиля.

Обычно в закрытых ручьях (например, в ребровых калибрах при прокатке тавровой стали) во избежание защемления не предусматривается бокового обжатия элементов профиля за счет проволакивания. Если же элемент профиля в закрытом ручье для перестраховки проходит слишком свободно, то в отдельных случаях возможно образование дефекта. Так, при освоении на стане 250 профиля № 2 для оконных и фонарных переплетов промышленных зданий размеры профиля при первой опытной прокатке получены в соответствии с ГОСТом. Однако на короткой полке готового профиля (рис. 6) был обнаружен дефект – срезанный внешний угол конца короткой полки по всей длине полосы.

Причина возникновения этого дефекта, установить которую удалось только после второй опытной прокатки, заключается в следующем.

Поскольку в ребровых калибрах отсутствует обжатие толщины стенки, то степень незаполнения стенки по толщине зависит от настройки стана. При значительном незаполнении стенки в ребровом калибре (рис. 6, *а*) вследствие несимметричности профиля № 2 происходит отгиб стенки в сторону длинной полки.

В предчистовом калибре (рис. 6, *б*) при пластовом расположении калибра стенка по сравнению с полками имеет значительно большее обжатие, которое и определяет положение задаваемого раската относительно калибра. Поэтому в предчистовом калибре задаваемый раскат со стенкой, несколько отогнутой по часовой стрелке, поворачивается в противоположную сторону (на рис. 6, *б* пока-

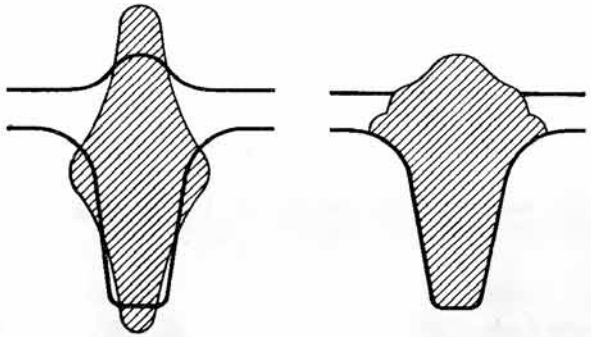


Рис. 7. Неправильное заполнение реброво го калибра при задаче в него полосы ромбической формы

зано стрелкой) и конец короткой полки оказывается за пределами закрытого ручья верхнего валка предчистового калибра. По мере прохождения полосы по всей ее длине поверхностью верхнего валка (левой боковой гранью закрытого ручья верхнего валка) срезается на угол наружная часть короткой полки (рис. 6, *в*) и получается неисправимый брак, так как толщина короткой полки в чистовом калибре не выравнивается.

При нормальном заполнении стенки в ребровом калибре (рис. 6, *а*) образования указанного дефекта не происходит. В то же время в ребровых калибрах иногда приходится предусматривать боковое обжатие за счет проволакивания. Так, например, при прокатке тавровой стали в виде исключения в качестве исходного сечения для первого по ходу прокатки реброво го калибра колокольного типа применяется сечение ромбической формы, получаемое из ромба.

При этом при отсутствии бокового обжатия в закрытом ручье раскат ромбической формы, задаваемый после кантовки на 90° в ребровой калибр (рис. 7), на основании закона наименьшего сопротивления, смещается в сторону нижнего валка и заклинивается в закрытой части калибра, соответствующей стенке профиля.

Полки реброво го калибра и задаваемого в него раската не совпадают. Раскат смещается таким образом, что полки раската попадают в закрытый ручей реброво го калибра и претерпевают боковое обжатие за счет проволакивания. В месте разъема валков реброво го калибра образуются наплывы металла (рис. 7) и ширина полок может быть практически равной нулю. Значительное защемление раската в закрытом ручье калибра резко ухудшает выход полосы из валков и создает повышенное давление на нижнюю выводную проводку.

Кроме того, симметричная относительно вертикальной оси форма ромбического калибра, предшествующего ребровому калибру, вызывает повышенное обжатие стенки по высоте и ухудшает захват полосы. Вводные боковые проводки (пропуски) в ребровом калибре приходится смещать в сторону нижнего валка, чтобы углубления в проводках соответствовали полкам задаваемого раската, Но если приходится использовать ромбическое сечение, то при настройке следует все-таки предусматривать боковое обжатие в закрытом ручье реброво го калибра за счет увеличения толщины исходного ромбического сечения. В этом случае задаваемый раскат сместится в сторону верхнего валка, что обеспечит лучшее выполнение полок, так как меньшая диагональ ромба сместится тоже в сторону верхнего валка. Кроме того, следует из ромбического калибра за счет настройки получить ромбическое сечение, смещенное в одну сторону, чтобы у задаваемого в ребровой калибр раската положение его в валках обеспечивало уменьшение обжатия со стороны верхнего валка. И еще следует добавить, что так как после реброво го колокольного калибра обычно следует еще один реб-

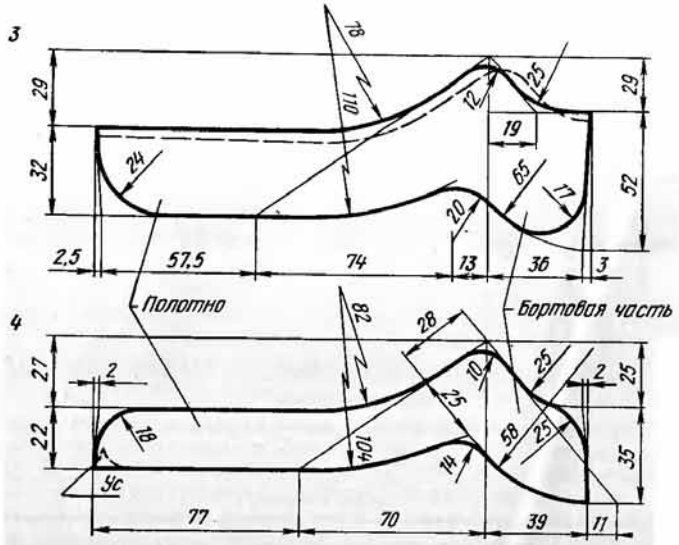


Рис. 8. Схема образования уса при прокатке профиля обода колеса автомашины ЗИЛ-130; *3,4* – номера калибров

ровой калибр, то в ребровом колокольном калибре при использовании исходного ромбического сечения и при боковом обжатии в закрытом ручье можно рекомендовать применение рассмотренной ниже сквозной проводки.

Образование уса вследствие неправильной настройки при прокатке профиля обода колеса автомашин ЗИЛ-130 приведено на рис. 8. Этот профиль прокатывают на линейном трехклетевом стане 550 Чусовского металлургического завода. Исходное сечение заготовки 114X148 мм, общее число проходов 9. Полная калибровка этого профиля приведена в работе [2].

Обычно усы представляют собой переполнение в разъеме калибров вследствие неправильного выбора радиусов закруглений, повышенных обжатий или других причин. В данном же случае в результате настройки оказалось (пунктир в калибре *3* на рис. 8), что в калибре *3* толщина полотна примерно на 3–4 мм тоньше расчетной и, кроме того, валки смещены относительно друг друга. При смещенных валках получаются увеличенными длина полотна и толщина наклонного участка бортовой части в калибре *3*. Когда полученный раскат задают в калибр *4*, то центрирование раската в калибре определяется наклонными участками полотна и бортовой части. В результате полотно раската оказывается несколько длиннее, чем это определено шириной закрытого ручья (верхнего валка) калибра *4*. И тогда левой боковой стенкой калибр *4* как бы заворачивает "лишнюю" длину полотна и натягивает ус (пунктир в калибре *4*). Образованию такого уса в какой-то степени способствует и несколько завышенный радиус закругления (24 мм) кромки полотна в калибре *3*. При дальнейшей прокатке ус полностью не закатывался, поэтому ус быстро охлаждался и при удлинении происходили его разрывы. Такой дефект впервые было обнаружить очень трудно и удалось это сделать только после отбора темплетов от всех калибров.

На рис. 9 приведена калибровка полосового профиля сечением 12X14 мм для кольца стартера. Аналогичная схема применяется на стане 250 и для прокатки полосового профиля 12X16 мм.

Небольшое отношение ширины к толщине у профилей сечением 12X16 мм и 12X14 мм определяет некоторые отличия их калибровки и прокатки.

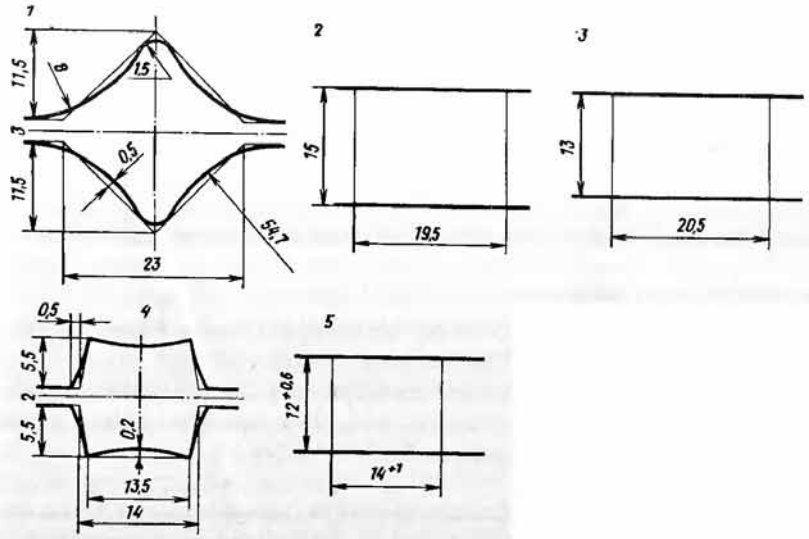


Рис. 9. Калибровка полосы сечением 14X12 мм на линейном стане 250 (исходное сечение – овал 42X14,5 мм):
1–5 – номера калибров

Выбранная схема (рис. 9) обеспечивает надежную регулировку размеров и хорошую обработку углов. Дефект единственный и довольно серьезный – косина, то есть угол между кромкой и основанием может превышать допускаемый, равный 3°.

Основные причины связаны с настройкой и сводятся к следующему:

1. Тонкая полоса выходит из клети, предшествующей ребровому калибру. В этом случае сечение, поставленное на ребро, занимает диагональное расположение в калибре, что соответствует наиболее устойчивому равновесию. За счет этого и образуется косина в сечении из реброваго калибра.

2. Толстая или широкая полоса, выходящая из калибра, предшествующего ребровому калибру, в последнем получает обжатие больше, чем по расчету. В этом случае полоса будет иметь бочкообразную форму и при последующей прокатке на гладкой бочке в чистовой клети полосу как бы покачивает на узкой площадке, что может привести к косине. Это наиболее опасный вариант, потому что дефект труднее обнаружить вследствие его непостоянства.

3. Относительное смещение ручьев в ребровом калибре. Стенки ребровых калибров при прокатке таких полос не должны иметь больших уклонов, так как в этом случае полоса удерживается только углами калибра и по углам полосы образуются местные утолщения, которые могут быть причиной искажения сечения. И полоса в таких калибрах удерживается менее устойчиво. Все это определяется тем, что очень небольшой врез в ребровом калибре, поэтому уклон стенок сделан минимальным с некоторым развалом для обеспечения захвата полосы и исключения подрезания кромок. Вообще, следует сказать, что соотношение сторон прямоугольника 16/12 минимально возможное для обеспечения достаточно устойчивой прокатки. При прокатке полосы 12X14 мм с косиной справиться намного труднее. Такое сечение целесообразнее было бы прокатывать в квадратном калибре, если бы не жесткие требования к выполнению углов.

4. Элементы калибровки валков

Выбор схемы прокатки и расчет калибровки зависит в первую очередь [2] от прокатываемого профиля, типа стана и характеристик его основного и вспомогательного оборудования, мощности двигателей главного привода, качества металла и других факторов. Правильно спроектированная калибровка должна обеспечивать выполнение следующих требований:

получение профиля с заданными размерами и чистой поверхностью;

высокую производительность прокатного стана с минимальными затратами энергии и валков;

минимальные внутренние напряжения в готовом профиле (в тех случаях, когда их нельзя избежать полностью);

наиболее простую и удобную работу на стане, позволяющую в возможно большей степени осуществить механизацию и автоматизацию процесса и устранить применение ручного труда;

создание наиболее рациональных монтажных схем валков для прокатки всего сортамента из одного или двух типов заготовки (и лучше всего, когда одна единая заготовка) с минимальными затратами времени на перевалку и настройку.

Наилучшей калибровкой является та, которую технологи не замечают в процессе прокатки, т.е. калибровка имеет очень высокую степень технологичности.

В процессе работы калибровщик, по мнению В. Тринкса, встречается с разнообразными задачами:

1. Иногда требуется разработать калибровку для новых станов, на новых валках или для новых профилей. Работой такого рода занимается не только калибровщик, но и целый коллектив инженеров.

2. Очень часто требуется получить путем прокатки удовлетворительно и дешево тот или другой новый профиль. В задачи калибровщика входит решение этого вопроса и, в случае положительного ответа, создание калибровки и размещение калибров на данном стане или группе станов.

3. Построение калибров, которые геометрически подобны уже прокатываемым профилям, но должны быть или больше, или меньше их.

4. Переконструирование калибров для уже имеющихся профилей, но для другого металла.

5. Построение промежуточных черновых калибров таким образом, чтобы они могли служить для нескольких размеров и профилей готового продукта.

Прокатать данный профиль из данного сечения заготовки можно различными способами. Обжатия можно давать большие и малые, можно изменять промежуточные калибры, готовое сечение можно прокатывать из большого или малого квадрата и т.д. При таком разнообразии возможностей никто не может сказать, что та или другая система калибров будет лучшей.

Как правило, можно рассматривать как лучшую ту калибровку,

по которой можно прокатать полосу с наименьшим числом проходов; но она может быть и не лучшей, потому что в отдельных калибрах может быть чрезмерный износ валков, или может быть слишком большой износ проводок, или проводки могут царапать полосу.

Однако следует заметить, что для средних отношений размеров полосы к диаметру валка, для среднего отношения диаметра валка к его длине и для данного устройства стана самое лучшее проверить несколько систем калибровки на практике и употреблять при аналогичных условиях одни и те же калибры.

Это положение не должно быть неверно понято в том смысле, что благоразумнее всего заниматься слепым копированием, но скорее должно быть понято так, что удовлетворительно работающую систему калибров нужно проанализировать и подвергнуть критике, прежде чем перенести ее на другой стан. В ней должны быть сделаны все изменения, которые диктуются факторами, определяемыми основными положениями калибровки.

В калибровке сложных (а также и простых) профилей можно выделить условно как бы два направления, основные принципы которых различны. Для первого направления характерны общие тенденции инженерной мысли, то есть превалирование точной расчетной части. Калибровщики стараются создать желательно более точные методы определения формоизменения в фасонных калибрах: коэффициентов вытяжки, уширения и утяжки для каких-то вполне определенных типовых калибров. Казалось бы, так и должно быть. Однако слишком сложная форма калибров с большим числом отдельных элементов и радиусов закруглений, меняющиеся постоянно условия прокатки и условия формоизменения и отсутствие достаточно надежных методов расчета могут быть сравнимы по величине с самими величинами уширения и утяжки. Поэтому приходится стараться повысить точность расчетов, а так как этого в желаемой степени не всегда удается достигнуть, то приходится использовать приемы, позволяющие компенсировать ошибки расчетов. Эти приемы несложные, хотя и не очень-то желательны, и заключаются в том, что существенно ограничивается уширение, а величина утяжки принимается больше, иногда значительно, чем это происходит фактически. В результате получаем профиль, но при этом повышается износ валков вследствие стеснения уширения и увеличивается число фасонных калибров; при этом зачастую увеличивается количество опытных прокаток.

Второе направление заключается в том, что калибровщик старается разработать и применить такую схему прокатки, которая допускает простую регулировку размеров и удобную настройку стана в процессе освоения или прокатки. Примером является схема прокатки тавровых профилей в открытых калибрах со свободным уширением, при которой неточности в расчетах могут быть устранены путем настройки, возможной за счет применяемой периодической кантовки.

Большое значение при прокатке имеет пружинение (упругая деформация, отдача, игра) валков. В некоторых случаях прокатки пружи-

нением можно пренебречь. Если валки будут пружинить, то вальцовщик будет регулировать их, устанавливая на точный размер. В иных случаях пружинение валков, несомненно, должно быть учтено: например, когда в одних и тех же валках размещены рядом два калибра: один с очень сильным, а другой с очень слабым обжатием. Если в этом случае калибровщик пренебрежет пружинением валков, то вальцовщик встретится с большими затруднениями. Чтобы компенсировать пружинение валков во время прохода через калибр с очень сильным обжатием, валки должны быть соответственно сближены, но тогда они окажутся слишком сильно сближенными для калибра с легким обжатием.

Отсюда следует, что калибровщик не должен помещать вместе два неодинаковых по обжатию калибра или если он вынужден сделать это, то должен при калибровке учесть пружинение валков.

Раздвижение валков, происходящее под действием сил, возникающих при проходе полосы между валками, вызывается главным образом упругой деформацией валков, подшипников, нажимных винтов, станины и других деталей. Кроме того, во время прокатки калибры валков изнашиваются. Для компенсации деформации деталей клети при прокатке и износа калибров величина сечения калибра регулируется путем сближения валков в пределах зазора между ними. Таким образом, зазор между валками компенсирует увеличение калибра, вызванное износом или деформацией деталей стана. Зазор для мелкосортных и среднесортных станов составляет примерно 0,5–0,8 %, а для крупносортных станов 0,8–1,5 % диаметра валков и определяется состоянием стана, типом подшипников, размерами калибра и износостойкостью валков. Зазор должен быть учтен при расточке валков на вальцетокарных станках и всегда обозначается на монтажных чертежах валков.

Необходимо следить, чтобы бурты валков при их холостом ходе нигде не соприкасались, что особенно важно при прокатке сортовых профилей на станах с линейным расположением клетей. Такое соприкосновение опасно из-за различного диаметра валков по клетям и может привести к поломке самих валков, шеек валков или муфт. Зазор валков, однако, не должен быть слишком большим, чтобы не уменьшилась точность прокатки.

Но особенно большое значение имеет величина зазора валков для заполнения калибров в местах их разъема. Ведь в процессе расточки прокатных валков для прокатки фасонных профилей при завершении процесса расточки осуществляется так называемая "посадка вал на вал", при этом валки сближаются до соприкосновения поверхностей крайних (рабочих) буртов. Для того чтобы обеспечить это соприкосновение, подрезают боковые поверхности в местах разъема калибров. После установки валков относительно друг друга на величину зазора по крайним буртам, в местах разъема калибров образуются просветы. Чем больше просветы при рабочем положении валков, тем легче при прокатке проникает металл в эти просветы, приводя к образованию

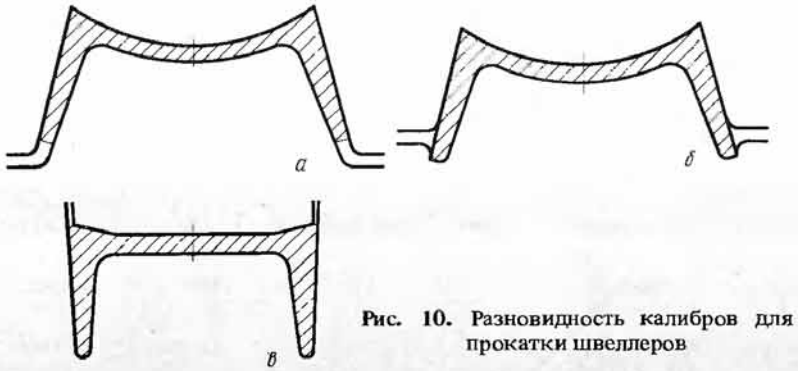


Рис. 10. Разновидность калибров для прокатки швеллеров

переполнений калибров (усов). Этот очень важный момент до недавнего времени как-то не учитывался. Более того, при малых зазорах валков довольно легко могут быть получены при необходимости острые углы в местах разъема калибров. Можно сказать, что при малых зазорах, что имеет место при жестких клетях с подшипниками качения или жидкостного трения, переполнение калибров не учитывалось.

По способам среза в валки калибры делятся на открытые и закрытые. В тех случаях, когда линии разъема валков находятся вне пределов калибра, последний называется закрытым, в противоположном случае калибр называется открытым. Эта классификация в общем-то является более или менее условной и не учитывает процесс деформации в калибре. Так, на рис. 10 представлены три разновидности (типа) калибров, применяемых при прокатке швеллеров. Калибр на рис. 10, *б* называется полузакрытым, а два остальных калибра являются закрытыми, хотя они по конструкции совершенно различны.

При рассмотрении процесса прокатки принято относить прокатку в гладких валках к прямому процессу обжатия, в то время как воздействие на полосу в ее вертикальном положении, особенно когда обжимаются боковые стороны полосы, называют процессом бокового обжатия. В большинстве случаев, когда обжатие осуществляется под углом к горизонтальному и вертикальному направлениям, возникает много затруднений для должного расчета обжатия, коэффициента вытяжки и уширения профиля. На рис. 11, не представляющем какой-либо определенный профиль, рассмотрен пример прокатки для того, чтобы показать, какое заполнение профиля можно ожидать при прямом и боковом обжатии. На рис. 11, *а* стенка прокатана путем прямого обжатия и, естественно, нет никаких затруднений заполнить калибр (заготовка показана пунктиром). Стенка, расположенная под углом 45° (рис. 11, *б*), не может быть заполнена по ширине при той же заготовке, как на рис. 11, *а*. Это происходит благодаря тому, что чем ближе калибр приближается к вертикальному положению, тем больше валки "удлиняют" полосу, и когда он занимает вертикальное положе-

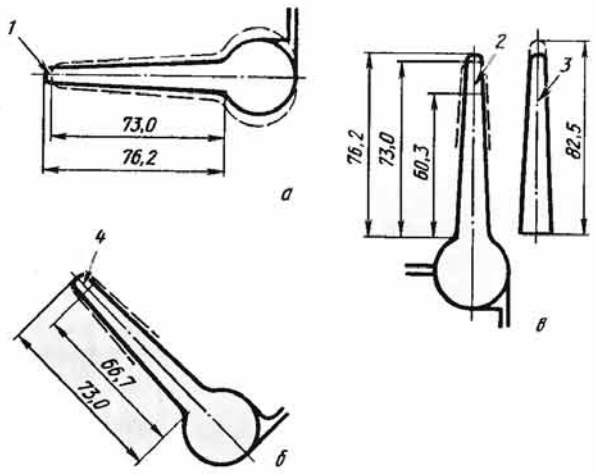


Рис. 11. Различные виды обжатия:
а – прямое обжатие; *б* – прямое и боковое обжатие; *в* – боковое обжатие:
1 – заполнено; *2* – не заполнено; *3* – количество необходимого металла для заполнения стенки; *4* – не заполнено

ние, заклинивающее и "утягивающее" воздействие валков ограничивает уширение и увеличивает вытяжку.

На рис. 11, *в* стенка в вертикальном положении, и для ее заполнения нельзя использовать заготовку для показанных на рис. 11, *а* и *б* калибров; возможно образование "мертвого пространства", то есть незаполнения. В этом случае при том же количестве обжимаемого металла по сечению, которое применялось на рис. 11, *а* и *б*, не будет достигнуто заполнение калибра, а произойдет "утяжка" металла и стенка не будет заполнена. В калибре этого типа, как показано на рис. 11, *в*, стенка должна быть гораздо шире и тоньше, чем на рис. 11, *а, б*, и на конце стенки должно быть обеспечено только прямое обжатие. Следовательно, на рис. 11, *а* показан случай прямого обжатия, на рис. 11. *б* случай частично прямого и бокового обжатия и на рис. 11, *в* – случай бокового обжатия.

На рис. 12 дана калибровка рельсовых соединений накладок из заготовки 136×136 мм. Носок профиля выполняется в закрытом ручье в четвертом калибре, и в этом месте возникает утяжка. При рассмотрении калибровки рельсовых соединений Р. Бейнон подчеркивает, что правило, в соответствии с которым в закрытом ручье нельзя осуществлять боковое обжатие, во многих случаях неправильно. При отсутствии бокового обжатия носка профиль в этом ручье был бы не заполнен, как показано на рис. 12, *в*, вследствие утяжки, вызванной вытяжкой других частей полосы. Калибры подобных сечений проектировались таким способом в прошлые времена, и во всех случаях носок был не заполнен. Из калибровки видно, что после первоначальной прокатки и обнаружения незаполнения носка потре-

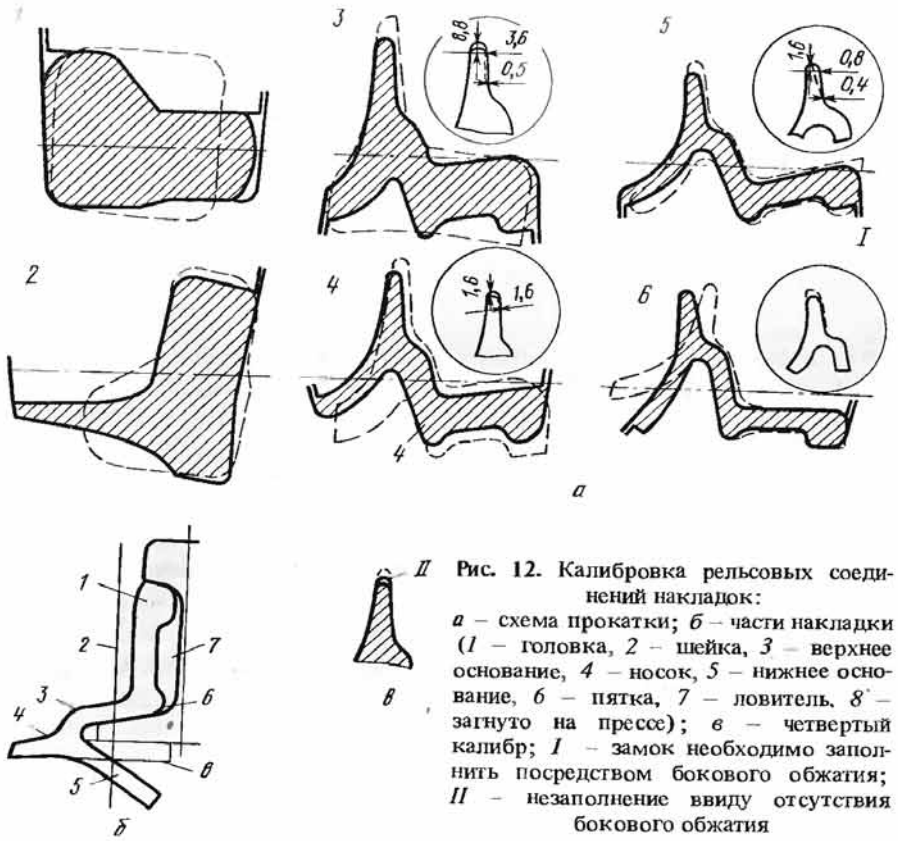


Рис. 12. Калибровка рельсовых соединений накладок:
а – схема прокатки; *б* – части накладки (*1* – головка, *2* – шейка, *3* – верхнее основание, *4* – носок, *5* – нижнее основание, *6* – пятка, *7* – ловитель, *8* – загнуто на прессе); *в* – четвертый калибр; *I* – замок необходимо заполнить посредством бокового обжатия; *II* – незаполнение ввиду отсутствия бокового обжатия

бовалось дать в каждом проходе достаточное боковое обжатие носка, чтобы преодолеть утягивание и незаполнение. Дополнительные сечения показаны на рисунках носка, обведенных кружками. Эти условия встречаются даже при довольно малом сечении образующей кромки. Уверенность в заполнении носка обоснована, даже если толщина поступающей в калибр заготовки может вызвать опасения "забивания" калибра и, следовательно, его незаполнения, так как утяжка уменьшает толщину носка и делает возможным вход полосы в калибр.

Следует отметить, что вопрос заполнения закрытых частей (закрытых ручьев) калибров является очень важным, и поэтому в дальнейшем при рассмотрении экспериментальных исследований к нему еще вернемся. Пока бы хотелось еще дополнительно остановиться на вопросе о том, что же все-таки следует понимать под боковым обжатием. На рис. 13 приведена схема обжатия в ребровом тавровом калибре. Пунктиром указано задаваемое сечение исходной полосы. Расположение задаваемой полосы в калибре принято таким, что абсолютные обжатия по полкам снизу и сверху равны между собой. Такое положение задаваемой полосы достаточно соответствует действительному.

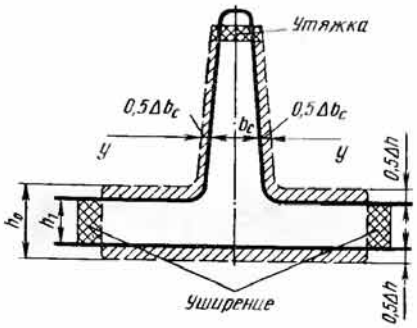


Рис. 13. Схема обжатия в ребровом тавровом калибре

При определении бокового обжатия стенки часто забывают, что происходит процесс деформации всей полосы, и принимают за боковое обжатие стенки, например в сечении y–y, величину Δb_c (аналогично и для других сечений). Заметим, что в рассматриваемом на рис. 13 случае величина Δb_c принята одинаковой по всей высоте стенки.

В действительности же, как это неоднократно показано экспериментальными исследованиями, при коэффициенте вытяжки полосы λ происходит утяжка необжимаемых частей, пропорциональная примерно корню квадратному из вытяжки. Следовательно, обжатие стенки по толщине начнется только тогда, когда будет соблюдаться неравенство

$$\Delta b_c > b_c\,(\sqrt{\lambda} - 1). \qquad (1)$$

Аналогичное правило остается справедливым и для других калибров с закрытыми ручьями (например, балочных калибров).

5. Проектирование калибровки

При расчете калибровки исходят из размеров профиля в холодном состоянии с учетом установленных по ГОСТу или техническим условиям допускаемых отклонений. Коэффициент термического расширения для большинства марок стали принимается равным 1,012–1,015. Расчет калибровки ведется против хода прокатки.

Ввиду отсутствия для многих сложных профилей надежных формул для определения формоизменения, обычно для расчета абсолютного уширения ΔB, особенно в развернутых калибрах, используют формулы, которые получены для прокатки прямоугольной полосы в гладких валках. При этом наиболее часто применяется формула Б.П. Бахтинова

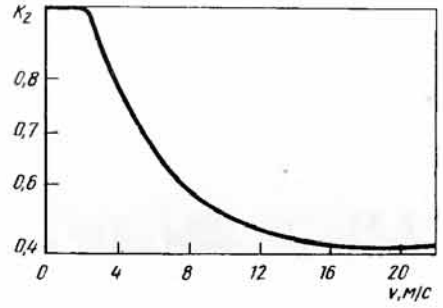
$$\Delta B = B_1 - B_0 = 1{,}15\,\frac{(h_0 - h_1)}{2h_0}\left[\sqrt{R(h_0 - h_1)} - \frac{h_0 - h_1}{2f}\right], \qquad (2)$$

или формула С.И. Губкина

$$\Delta B = B_1 - B_0 = \left(1 + \frac{\Delta h}{h_0}\right)\left(f\sqrt{\frac{R}{h_0}\cdot\frac{\Delta h}{h_0}} - \frac{\Delta h}{2h_0}\right)\Delta h, \qquad (3)$$

где B_0, B_1 — ширина полосы до и после прохода; h_0, h_1 — толщина полосы до и после прохода; R — катающий радиус валков.

Рис. 14. График значений коэффициента K_2 для расчета коэффициента трения



Уравнение для определения коэффициента трения f в зависимости от температуры t имеет вид:

$$f = k_1 k_2 k_3\,(1{,}05 - 0{,}0005\,t), \qquad (4)$$

где k_1, k_2, k_3 — коэффициенты, учитывающие состояние поверхности и материал валков, влияние скорости прокатки и легирующих элементов соответственно.

Уравнение (4) получено на основе формулы Экелунда с применением специальных коэффициентов, учитывающих влияние материала валков, скорости прокатки и химического состава металла.

Значение коэффициента k_1 принимается для стальных шероховатых валков равным 1,0, для чугунных шероховатых валков 0,8. Коэффициент k_2 определяется из графика на рис. 14. Значения коэффициента k_3, учитывающего химический состав прокатываемого металла, для различных классов стали (по данным Ю.М. Чижикова и С.И. Губкина) приведены ниже:

Класс стали	Типовая марка стали	k_3
Углеродистые	Ст1	1,0
Ледебуритные	Р18	1,1
Перлито-мартенситные	IIIХ15; 40Х13; 38ХМЮА	1,3
Аустенитные	20Х13Н4Г9	1,4
Аустенитные с включениями феррита или ледебурита	12Х21Н5Т, 10Х18Н9Т	1,47
Ферритные	12Х17, 10Х13Ю4А	1,55
Аустенитные с включениями карбидов	ХН60Ю, Х15Н60, 20Х25Н20С2	1,60

Практика показывает, что фактические значения коэффициента трения в отдельных случаях отклоняются от рассчитанных, что, очевидно, объясняется действием неучтенных факторов и неточной оценкой значений коэффициентов.

При прокатке в калибрах по сравнению с гладкой бочкой определение величины уширения значительно усложняется, так как при прокатке в калибрах полоса получает несвободное, стесненное или, наконец, вынужденное уширение. В некоторых случаях, например в косорасположенных калибрах, уширение может быть отрицательным, т.е. полоса будет обжиматься со всех четырех сторон.

Так как степень заполнения калибров довольно трудно поддается

расчету, то ее определение большей частью основывается на данных практики. Однако при построении калибров полезно знать, насколько стесненное уширение в калибре отличается от свободного уширения. Для оценки этой величины вводится степень стеснения

$$\theta = (\Delta B - \Delta B_{ст})/\Delta B < 1, \qquad (5)$$

представляющая собой отношение разности свободного ΔB и стесненного $\Delta B_{ст}$ уширения к величине свободного уширения. Чем "теснее" калибр, тем больше степень стеснения θ. Степень стеснения равна единице при полном отсутствии уширения и больше единицы в случае отрицательного уширения (поперечной утяжки).

Иногда при расчетах калибровки сознательно завышают степень стеснения уширения, чтобы избежать ошибки в величине уширения, которое может быть известно только приближенно и при том с большой погрешностью. А принимаемая большая степень стеснения как бы компенсирует эту погрешность.

Большое разнообразие форм и размеров сложных профилей не позволяет разработать единую общую методику расчета формоизменения в калибрах, хотя и имеются такие попытки. Поэтому приходится путем теоретического решения или эксперимента получать для сравнительно узкой группы профилей алгоритмы или формулы для определения коэффициентов вытяжки, утяжки слабообжимаемых частей и уширения.

При теоретическом решении в большинстве случаев используют вариационные методы, которые требуют значительных затрат времени, наличия быстродействующих ЭВМ и применяются, как правило, для профилей сравнительно не очень сложной формы.

За последнее время находят широкое распространение экспериментальные исследования формоизменения, основанные на теории планируемого эксперимента. Однако и в этом случае для профилей сложной формы возникают существенные затруднения в связи с большим объемом задачи. Кроме того, в лабораторных условиях довольно сложно, а иногда и просто невозможно, учесть влияние коэффициента трения, максимальные и минимальные значения которого определяются температурой, скоростью прокатки и материалом валков и прокатываемого профиля.

В этом случае может быть предложена следующая методика расчета формоизменения сложных профилей, которая основана на использовании формул, полученных при планируемом эксперименте для определения формоизменения при конкретном значении коэффициента трения в зависимости от геометрических параметров, и формул для определения уширения при прокатке в гладких валках, например (2) или (3).

После того, как вычислено из уравнения (2) абсолютное уширение ΔB, находим коэффициент уширения β

$$\beta = (B_0 + \Delta B)/B_0. \qquad (6)$$

Коэффициент вытяжки λ определяется из условия

$$\lambda = \frac{B_0 h_0}{(B_0 + \Delta B) h_1}. \qquad (7)$$

Далее задача решается следующим образом. Пусть выполнен планируемый эксперимент для прокатки сложного профиля и получены формулы для определения коэффициентов вытяжки $\lambda_э$, уширения $\beta_э$ и утяжки необжимаемых участков $\delta_э$, где э – индекс эксперимента. Эксперимент проводился при определенной температуре, скорости прокатки, материале валков и профиля.

Полагаем, что при формоизменении в фасонных калибрах для условий прокатки, отличающихся от условий эксперимента, изменение коэффициентов вытяжки и уширения можно принять пропорциональным изменению этих коэффициентов для случая прокатки прямоугольной полосы в гладких валках. Таким образом, имеем

$$\lambda = \lambda_э \frac{\lambda^*_п}{\lambda^*_э}, \quad \beta_п = \beta_э \frac{\beta^*_п}{\beta^*_э}, \qquad (8)$$

где индексы п и э относятся к фактическим условиям прокатки и условиям эксперимента соответственно. А звездочкой обозначены коэффициенты вытяжки и уширения для случая прокатки полосы прямоугольного сечения в гладких валках, которые определяются из соотношений (6) и (7).

После того, как вычислены $\lambda_п$ и $\beta_п$, находим в случае необходимости коэффициент утяжки необжимаемых частей профиля. Предложенная методика расчета формоизменения сложных профилей на основе планируемого эксперимента и формул для прокатки прямоугольной полосы в гладких валках позволяет в два раза уменьшить объем планируемого эксперимента и получить оценку коэффициентов формоизменения сложных профилей для различных условий прокатки.

Наряду с калибрами, в которых происходит стеснение уширения, часто встречаются калибры, создающие так называемое вынужденное уширение, соответствующее отрицательной степени стеснения. Одним из примеров использования вынужденного уширения являются "разгонные" калибры, применяемые при прокатке широких полос (рис. 15).

Калибровку нового фасонного профиля, не имеющего аналога среди освоенных, целесообразно проектировать в следующей последовательности [2]:

1. Исходя из технических возможностей данного стана, сложности профиля, его размеров, требований точности, марки стали, а также анализа прокатки подобных по сложности и размерам профилей, принимается принципиальная схема прокатки и число фасонных калибров.

2. На основании конфигурации сечения и необходимой точности отдельных элементов профиля намечаются места разъемов и тип чистового калибра. Для достижения высокой точности геометрии боковых

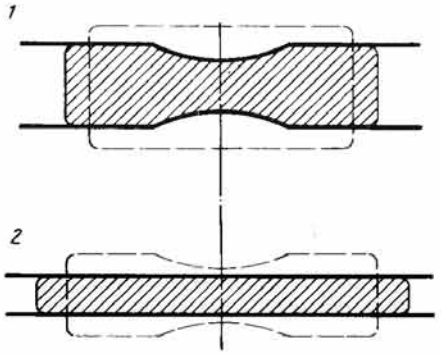


Рис. 15. "Разгонные" калибры для увеличения уширения при прокатке полос

граней профиля следует проектировать чистовой калибр закрытого типа. Если же к боковым граням не предъявляется жестких требований, то чистовой калибр принимается открытым.

3. Размеры чистового калибра рассчитываются с учетом коэффициента термического расширения и минусовых допусков на основные размеры. Зазор между буртами калибра определяется из условий удобства работы и упругой деформации рабочей клети.

4. Форма и размеры предчистового калибра проектируются, исходя из принципа равномерной деформации по ширине полосы в чистовом калибре:

а) чистовой калибр разбивается по ширине на n вертикальных характерных сечений и в каждом i -том сечении определяется высота калибра k_{1i} ;

б) на основании практических данных или технологических соображений принимается коэффициент $1/\eta$ в чистовом калибре (обычно $1/\eta = 1{,}05 \div 1{,}25$);

в) рассчитываются высоты h_{0i} характерных вертикальных сечений для предчистового калибра $h_{0i} = h_{1i}/\eta$ и затем обжатия $\Delta h_i = h_{0i} - h_{1i}$;

г) определяются контуры предчистового калибра.

для профилей с горизонтальной осью симметрии или близких к ним значения Δh_i по характерным вертикальным сечениям распределяются поровну вверх и вниз от контура чистового калибра;

— для асимметричных профилей с целью большей устойчивости полосы при обжатии в калибре значения Δh_i можно полностью откладывать вверх или вниз относительно контура чистового калибра;

— характерные точки вертикальных сечений предчистового раската соединяются отрезками, радиусами и кривыми аналогично контуру чистового калибра.

5. На основании анализа конфигурации сечения и размеров предчистового раската определяются места разъемов и тип предчистового калибра, а также величина зазора. Для обеспечения в чистовом калибре расчетных условий деформации обычно предусматривают предчистовой калибр закрытого типа. Следует отметить, что для лучшего достижения необходимой формы расположение предчистового калибра

относительно оси валков можно принимать другим по сравнению с чистовым калибром.

6. После определения размеров и формы предчистового калибра разрабатывается конструкция черновых калибров, обеспечивающих переход от подката простой формы (прямоугольник, квадрат, круг и т.д.) к сечению раската в предчистовом калибре.

При проектировании черновых калибров следует стремиться перераспределить металл по ширине сечения в первых по ходу прокатки калибрах таким образом, чтобы оно соответствовало распределению металла в предчистовом калибре. Для выполнения этого условия максимальную неравномерность деформации по ширине калибра предусматривают в первом фасонном калибре.

С целью увеличения стойкости предчистового и чистового калибров обжатия в черновых фасонных калибрах целесообразно уменьшать по мере приближения к предчистовому калибру.

Форма и размеры полосы, задаваемой в предчистовой калибр, определяются обжатием и степенью неравномерности деформации по ширине калибра, которые с увеличением числа фасонных калибров уменьшаются.

Коэффициент обжатия в предчистовом калибре (обычно $1/\eta = 1{,}10 \div 1{,}45$) принимается больше, чем в чистовом. Для определения формы и размеров черновых калибров также используется метод разбивки на характерные вертикальные сечения.

При проектировании черновых калибров следует в их числе предусматривать калибры, обеспечивающие обжатие боковых граней и контроль ширины раската, а для фланцевых профилей — ширину полок (такие калибры являются контрольными). Путем изменения зазора в этих калибрах можно в широких пределах изменять размеры сечения полосы, поступающей в последующие калибры.

7. Получение готового профиля во многом зависит от заполнения первого фасонного калибра. Поскольку в большинстве случаев надежные методы расчета формоизменения отсутствуют, то заполнение первого фасонного калибра определяется на основании анализа работы подобных калибровок, при значительных допущениях и приближениях. В результате возможны существенные ошибки, избежать которых практически невозможно, поэтому перед испытанием разработанной калибровки подготавливаются заготовки нескольких размеров и освоение начинают с заготовки меньшего сечения. При этом разработанную калибровку профиля принято считать рациональной, если она позволяет регулировать заполнение калибров путем изменения зазора в контрольных калибрах или за счет размеров исходной заготовки и незначительной переточки некоторых подготовительных калибров.

8. После построения фасонных калибров проводится графический анализ входа полосы в калибр и обжатия по ширине калибра в установившемся процессе прокатки и дается оценка устойчивости полосы в калибре при захвате. Для этого на ватмане вычерчиваются контур

сечения раската, а на кальке – конфигурации верхнего и нижнего ручьев калибра, в который поступает данный раскат. Затем при постепенном сближении по одной вертикали контуров ручьев прослеживается вход полосы в ручей верхнего и нижнего валков. В правильно спроектированной калибровке полоса при захвате устойчиво входит в калибр; смещение и скручивание при этом отсутствуют.

9. В связи с тем, что расчет деформации металла в фасонных калибрах сложной конфигурации проводится неточно, важным этапом в освоении калибровки нового профиля является результат первой прокатки. При этом анализируется захват полос по калибрам и поведение раскатов на выходе из валков, а также заполнение калибра металлом на основании анализа темплетов, отрезаемых от полосы после каждого прохода при прокатке. В результате удается установить степень соответствия фактической и расчетной деформации и наметить пути устранения ошибок.

6. Конструирование калибров

Боковые стенки открытых и закрытых калибров (рис. 16) обычно выполняются с некоторым уклоном к оси валков (выпуском), величина которого зависит от назначения калибра, характера и формы профиля, допусков на готовый профиль (в чистовых калибрах) и других факторов.

Уклон предусматривают для облегчения задачи полосы в валки и выхода ее из валков, а также для сохранения первоначальных размеров калибра после переточки. Надо заметить, что допуски на размеры готового профиля, и в том числе по ширине профиля, позволяют для отдельных профилей не все элементы калибра восстанавливать полностью по мере переточек, что дает довольно-таки существенное сокращение расхода прокатных валков. Особенно это практикуется для чистовых калибров, когда уклон боковых стенок калибра невелик и, чтобы восстановить калибр по ширине, требуется значительный съем валков по диаметру.

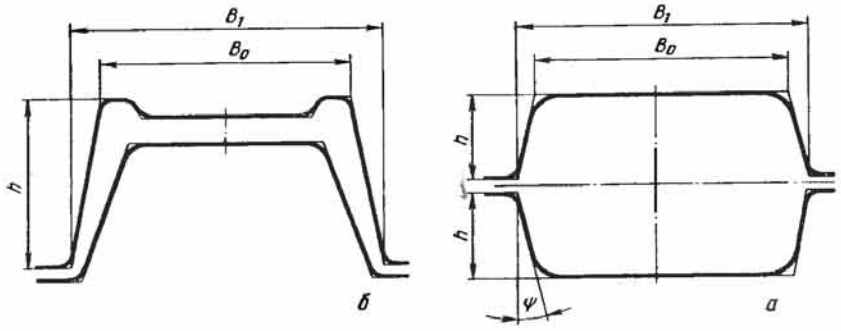


Рис. 16. Калибры с наклонными боковыми стенками:
а – ящичный; *б* – черновой для прокатки швеллеров

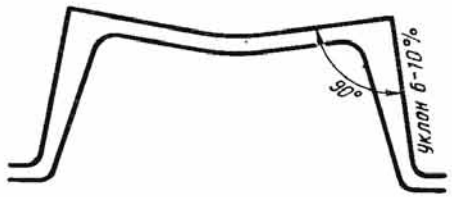


Рис. 17. Чистовой калибр для прокатки швеллеров с увеличенным уклоном наружных граней полок

Величина уклона (выпуска) чаще всего определяется в процентах как отношение (рис. 16) $\frac{B_1 - B_0}{2h}$ 100 %. Иногда под уклоном (выпуском) понимают тангенс угла наклона боковых стенок калибра к оси валков. Если обозначить угол наклона боковых стенок через ψ, то выпуск определяется равенством (рис. 16) $\operatorname{tg}\psi = (B_1 - B_0)/2h$.

Естественно, чем больше уклон боковых стенок, тем лучше восстанавливаются калибры по ширине и соответственно уменьшается расход прокатных валков. Поэтому на практике всегда стараются увеличить уклон боковых стенок, если этому не препятствуют какие-либо другие факторы.

В качестве примера можно привести рациональное совершенствование чистового калибра при прокатке швеллеров. Так как уклон полок швеллеров не должен по ГОСТ превышать 1,5 %, то соответственно такой уже уклон делается для боковых стенок чистового калибра. При таком уклоне чистовые калибры по ширине восстанавливались при переточках очень плохо и приходилось по мере переточек эти калибры несколько увеличивать по ширине, используя допуск на готовый профиль. И все-таки расход валков оставался значительным, кроме того, при уклоне боковых стенок калибра в 1,5 % по мере неравномерного износа поверхностей боковых стенок на наружных поверхностях полок готового профиля образовывались неровности и задиры.

Новая конструкция чистового калибра (рис. 17) предусматривает уклон наружных граней полок до 6–12 % при сохранении прямого угла между стенкой и боковой поверхностью полки. На некоторых металлургических заводах в чистовом калибре предусматривают ложные фланцы высотой 0,3–0,5 мм. Окончательную форму в соответствии с ГОСТ готовый профиль приобретает после правки на правильных машинах. Иногда для правки профиля устанавливается после чистовой клети доправочное роликовое устройство. Рассмотренный принцип прокатки профилей швеллеров с доправкой на правильной машине или специальном устройстве впоследствии был распространен на двутавровые балки и другие профили П-образной и двутавровой формы.

В ящичных калибрах, особенно при прокатке повышенно уширяющихся сталей, применяют двойные уклоны боковых стенок, обеспечивающие защемление (и соответственно захват) прокатываемой полосы по дну калибра с одновременным простором на уширение у зазора.

Известны случаи применения двойных уклонов и при прокатке фасонных профилей. Например, при прокатке двутавровых балок

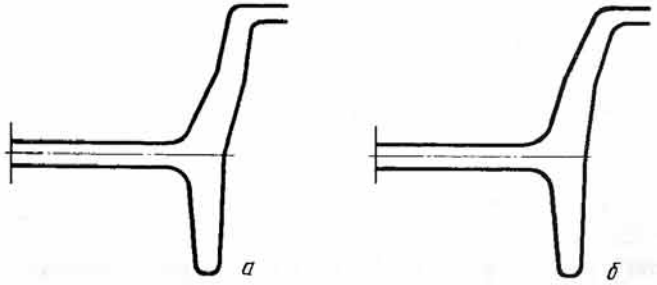


Рис. 18. Балочные калибры с увеличенными уклонами:
а – у основания открытых полок; *б* – у кромки открытых полок

всегда стремятся увеличить уклон наружных граней открытых полок, что способствует уменьшению износа на этих участках, подвергающихся износу в большей степени, чем остальные элементы калибра. Однако увеличение уклона на всей глубине ручья приводит к увеличению максимальной ширины полосы, что затрудняет ее задачу в последующий калибр, где открытые полки деформируются в закрытых ручьях.

Предложенный балочный калибр (рис. 18) отличается тем, что открытые ручьи выполняются с уклоном, дифференцированным по глубине ручья. В зависимости от наибольшей интенсивности износа ручья у основания или кромки полки эти участки выполняются с увеличенным уклоном. Это позволяет уменьшить интенсивность износа наиболее подверженных износу участков, не увеличивая при этом максимально допустимую ширину калибра (полосы).

Расположение участка наибольшего износа определяется из практики работы стана с существующей калибровкой или при расчете новой калибровки, исходя из величин деформации отдельных участков открытой полки балочного профиля.

На рис. 19 представлена конструкция с двойным уклоном предчистового полузакрытого калибра для прокатки швеллеров. Эта конструкция может быть с успехом использована для многогребневых профилей с боковыми полками, или для других профилей, в которых используются контрольные калибры полузакрытого типа.

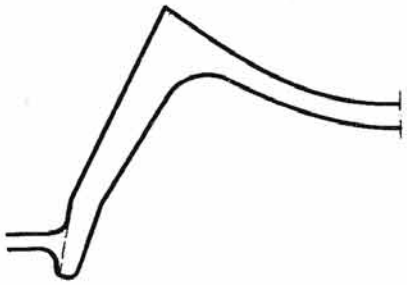


Рис. 19. Конструкция полузакрытого швеллерного калибра с переменным уклоном наружных граней полок

Предложенная конструкция позволяет применить увеличенные уклоны наружных граней полок в предыдущих по ходу прокатки развернутых калибрах и сгибающем калибре. Кроме того, увеличивается уклон наружных граней полок наиболее изнашиваемого участка полузакрытого калибра, но при этом уменьшенный уклон концов полок не допускает образования дефектов на их концах. Увеличенные уклоны уменьшают расход валков и их износ, что, в свою очередь, повышает производительность стана.

Для закрытых калибров характерны следующие основные недостатки:

уклон боковых стенок и вследствие этого непараллельность боковых граней нежелательна и в первую очередь для чистовых калибров;

защемление прокатываемых полос в закрытом ручье, величина которого изменяется при изменении условий прокатки и зависит от принятой степени стеснения уширения. Следует отметить что степень заполнения калибров, особенно для фасонных профилей, трудно поддается расчету и большей частью определяется на основании данных практики.

Для того, чтобы избежать этих недостатков считают целесообразным применять в очень ограниченном числе случаев (рельсы, иногда двутавровые балки) диагональные (косорасположенные) калибры с разъемом по диагонали. Наклон таких калибров относительно горизонтали сравнительно невелик и в отдельных случаях может быть близок или даже равен нулю. Такое преимущество косорасположенных калибров, как отсутствие защемления, особенно важно для фасонных профилей, и в первую очередь для предчистовых и чистовых калибров.

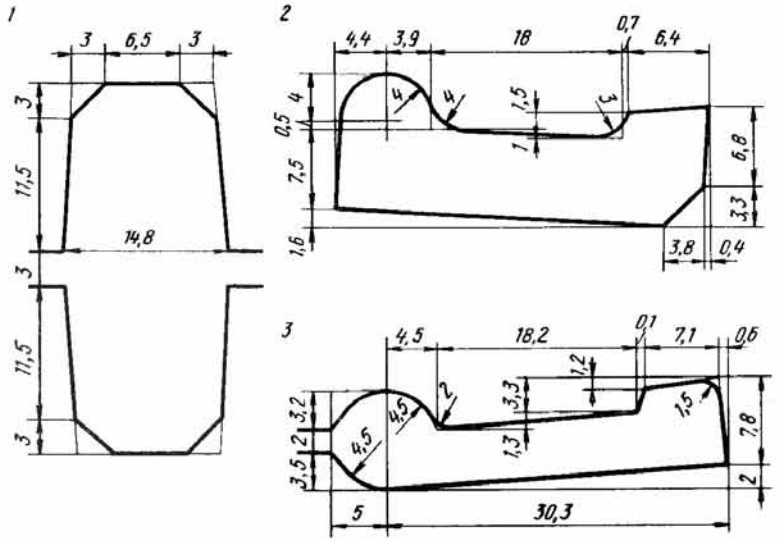


Рис. 20. Калибровка профиля с утолщениями на стане 300 (исходное сечение 38×13мм)

В последнее время отдельные металлургические заводы при производстве сложных фасонных профилей стали шире внедрять косорасположенные калибры или же разъемы калибров "по диагонали". На рис. 20 приведена калибровка профиля с утолщениями, в которой предчистовой калибр имеет диагональное расположение разъемов калибра.

Основные преимущества диагональных (косорасположенных) калибров следующие: возможность назначать или изменять уклоны кромок (или примыкающих элементов) в широких пределах и более широкие возможности при настройке профиля (стана).

Недостатки косорасположенных калибров:

1. В результате осевого биения верхнего и нижнего валков изменяется ширина калибра. Сочетание составляющих от биения каждого валка неуправляемо и может меняться при каждой перевалке. Между тем этих отклонений может оказаться достаточно, чтобы привести к образованию дефектов в районе разъемов калибров. В чистовых калибрах суммарное биение валков может превышать допуск.

2. Необходимость применения валков увеличенных диаметров.

3. При применении отбеленных валков снимается значительная часть отбеленного слоя.

Вопрос о выборе системы разъемов приходится решать в каждом отдельном случае (если такая возможность имеется).

При прокатке на рельсобалочном стане 750 Кузнецкого металлургического комбината различных типов подкладок к железнодорожным рельсам и башмачной полосы для тракторов и даже при хранении валков наблюдались сколы на краях открытых ручьев в промежуточных калибрах чугунных валков. Во избежание образования сколов изменили конструкцию калибров – наиболее склонные к сколам края калибров развернули в сторону открытого ручья (рис. 21). При этом в калибрах наряду с обжатием прокатываемой полосы происходит гибка ее по краям.

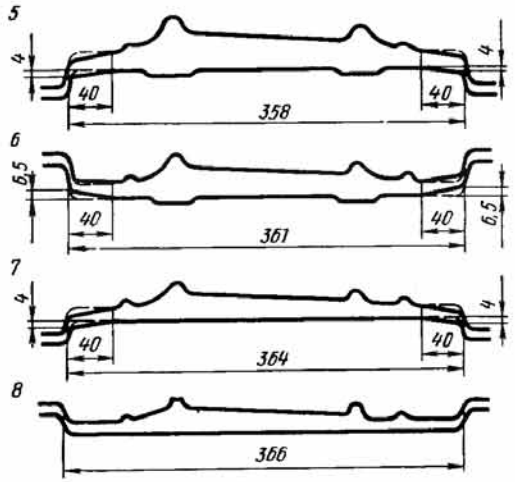


Рис. 21. Конструкция калибров *5,6,7* и *8* рельсобалочного стана 750 для прокатки подкладки Д-65 до (пунктирные линии) и после изменения (сплошные линии)

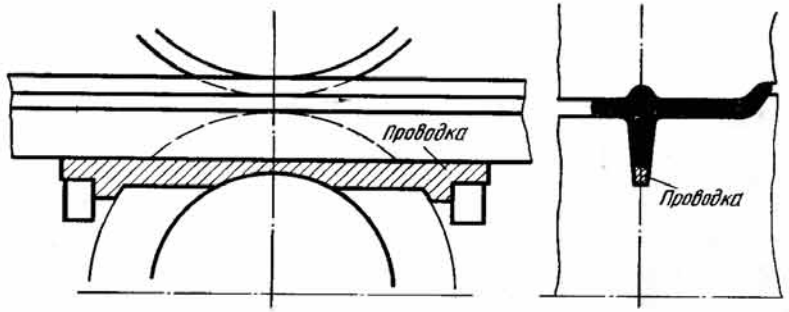


Рис. 22. Конструкция сквозной проводки для профилей с выступами

Длительная эксплуатация валков с калибрами, подготовленными таким образом, показала, что изменения не отразились на устойчивости процесса прокатки, случаи же образования сколов ликвидированы полностью. Аналогичные изменения калибров в случае необходимости можно осуществить и при прокатке других профилей, например угловых.

При прокатке фасонных профилей в калибрах с закрытыми ручьями может происходить защемление выступов (гребней) в случае их бокового обжатия за счет проволакивания. При этом возможны оковывания валков и их поломки. Если же в таких калибрах (рис. 22) необязателен контроль выступов (гребней) по высоте (что возможно в черновых калибрах), то целесообразно дополнительно углублять закрытые ручьи и устанавливать сквозную проводку. При этом проводка опирается средней частью на валок и крайними (концевыми) частями на брусья с обеих сторон валка. Проводки такой конструкции можно использовать и при прокатке многогребневых профилей, двутавровой стали, тавриков и других профилей.

На рис. 23 приведена схема образования заката в чистовом калибре при прокатке таврового профиля № 6 в открытых калибрах. Такой дефект иногда встречается при прокатке тавровых профилей и зависит

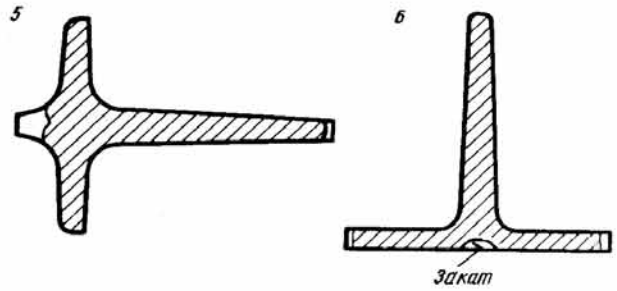


Рис. 23. Схема образования заката при прокатке таврового профиля № 6 для оконных и фонарных переплетов (*5,6* – номера калибров)

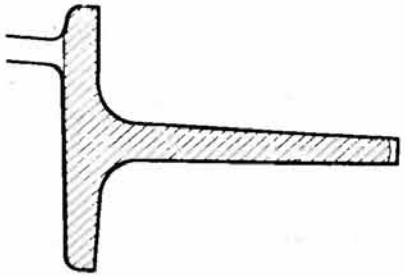


Рис. 24. Конструкция предчистового полузакрытого калибра при прокатке таврового профиля № 6 для оконных и фонарных переплетов

в первую очередь от размеров калибра и режима обжатий. Для устранения заката может быть рекомендована конструкция полузакрытого предчистового калибра (рис. 24). Калибры такой конструкции применяются в качестве контрольного чернового калибра при прокатке полосовых одногребневых профилей для шипов колес тракторов.

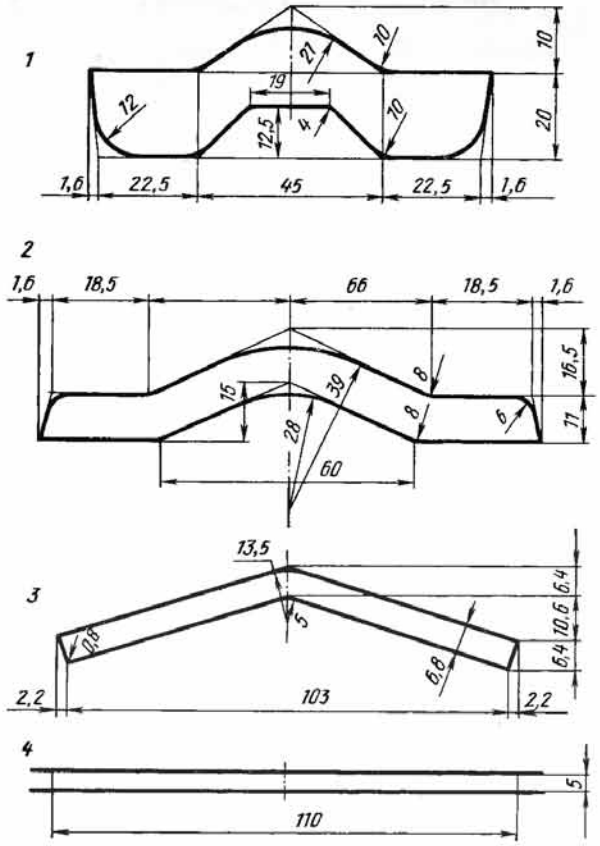


Рис. 25. Калибровка полосовой стали сечением 110×5 мм на непрерывном четырехклетевом стане 300 (исходная заготовка – круг 60 мм)

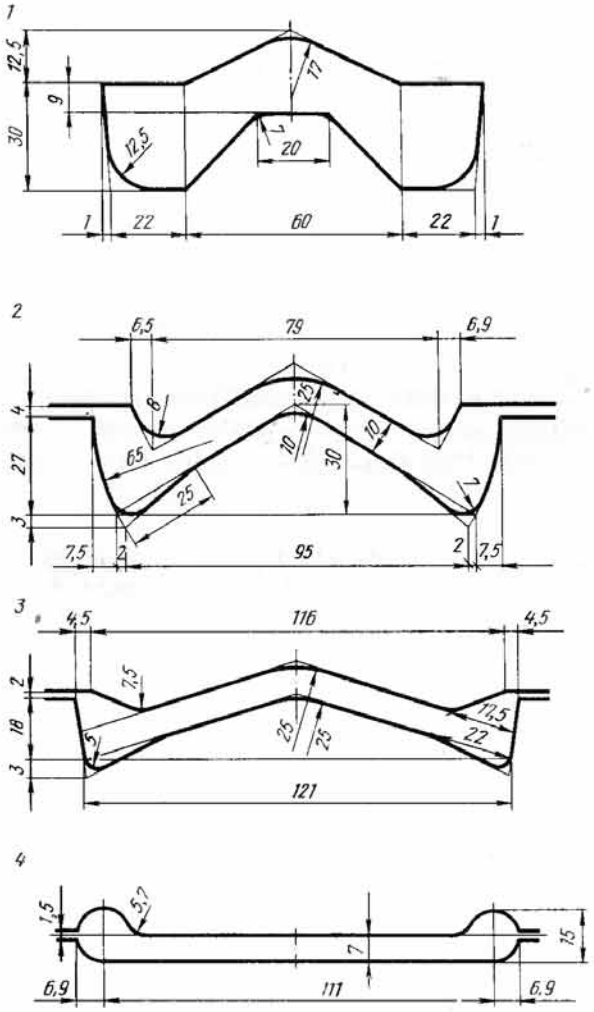


Рис. 26. Калибровка профиля для дверной петли автомобиля "Запорожец" на непрерывном стане 300 (исходная заготовка – круг 70 мм)

Очень интересная конструкция калибра, в котором формируется профиль, использована на Череповецком сталепрокатном заводе при прокатке полосовой стали сечением 110×5 мм (рис. 25). Такой калибр является не только "разгонным", но в большей степени и универсальным калибром, так как может быть применен в качестве формирующего из исходной заготовки круглого сечения при прокатке любых профилей с утолщениями по краям симметричных (рис. 26) или асимметричных относительно вертикальной оси. Возможно использовать этот универсальный формирующий калибр и для прокатки других профилей.

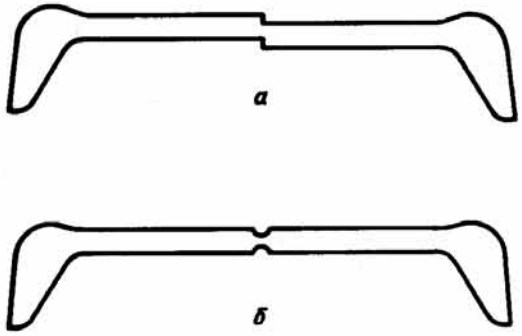


Рис. 27. Предчистовые калибры для прокатки сдвоенного полособульбового профиля с резкой:
а – первый вариант; *б* – второй вариант

При прокатке асимметричных фасонных профилей, в особенности с утолщениями на одном конце (например, полособульбовые профили), часто происходит изгиб и скручивание прокатываемых раскатов. Поэтому, когда только это возможно, что бывает не так уж часто, стараются прокатывать профиль в сдвоенном виде. Разделение такого сдвоенного профиля возможно или на металлургическом заводе, или же у заказчика. Так как разделение у заказчика требует установки специальных металлорежущих станков и дополнительных трудозатрат, то обычно трудно получить согласие заказчика на поставку профиля в сдвоенном виде.

Поэтому разделение сдвоенного профиля на Донецком металлургическом заводе пытались проводить непосредственно в чистовой клети, а также при прокатке в горячем состоянии или в холодном состоянии после прокатки.

Прокатка сдвоенного полособульбового профиля № 6 с продольной разрезкой в валках чистовой клети проведена на линейном четырехклетевом стане 400 Донецкого металлургического завода. Из возможных вариантов чистового калибра приняли режущий по принципу дисковых ножниц. В качестве предчистовых запроектировали калибры двух типов: один – по принципу дисковых ножниц, но с меньшим смещением полок профиля по вертикали, чем в чистовом (рис. 27, *а*), и другой – с гребнями в середине стенки для образования канавок размерами 4×1 мм, чтобы облегчить последующее разрезание (рис. 27, *б*): толщина профиля в месте резания уменьшилась с 5 мм до 3 мм. С целью предотвращения скручивания профилей вокруг головок при разрезании коэффициенты вытяжки для головок были предусмотрены значительно большими, чем для стенки.

Уже при первой опытной прокатке горячее продольное резание осуществлялось легко, разрезанные полосы выходили из выводной коробки почти прямыми – без значительного скручивания и изгиба, почти всегда сопровождающих прокатку полособульбовых профилей в одинарном виде.

Но при прокатке по варианту 1 подготовки к резанию (рис. 27, *а*) на кромке оставались следы несовпадения плоскости резания в чистовом калибре с плоскостью подготовки к резанию в предчистовом.

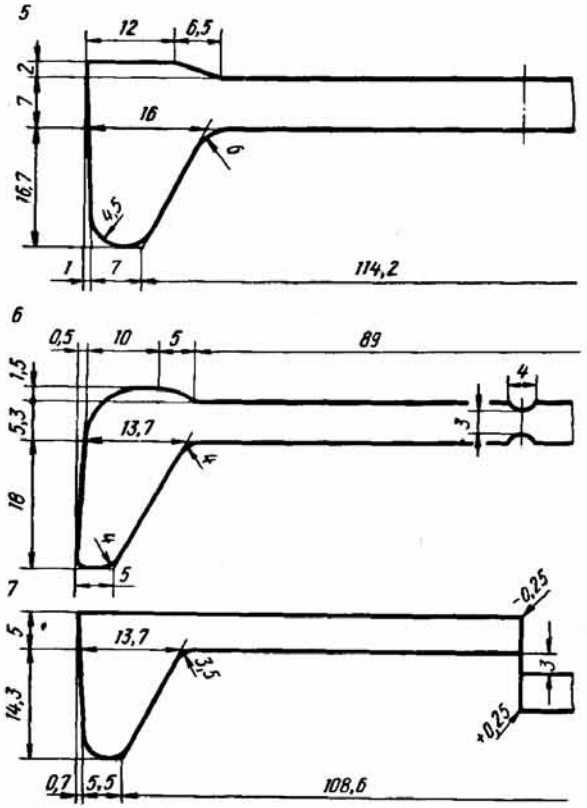


Рис. 28. Калибровка сдвоенного полособульбового профиля № 6 (калибры *5,6* и *7*) на линейном стане 400 (исходное сечение 105×55 мм)

Поэтому перешли на прокатку с подготовкой к резанию по варианту 2 (рис. 27, *б*), причем форма кромок получалась более удовлетворительной. Выводная коробка была спроектирована с одной парой горизонтальных и одной парой вертикальных роликов. Калибровка сдвоенного полособульбового профиля приведена на рис. 28. Допустимый размер заусенцев оговорен с потребителем. Впоследствии на этих же валках прокатали дополнительно 60 т полособульбового профиля. По мнению авторов, эксперименты прошли удовлетворительно.

Однако в дальнейшем на стане 400 Донецкого металлургического завода перешли на несколько другую технологию прокатки полособульбового профиля № 6, включающую прокатку сдвоенного профиля (рис. 29) и разделение его в холодном состоянии на специальной установке. Разрезающие гребни, высотой 3,5 мм каждый, предусмотрены в калибре 5. Для повышения прочности кольцевых разрезающих гребней (рис. 30) при нарезке разрезного калибра использовали валки из стали марки 55 с наплавленными порошковой проволокой ПП3Х2В8

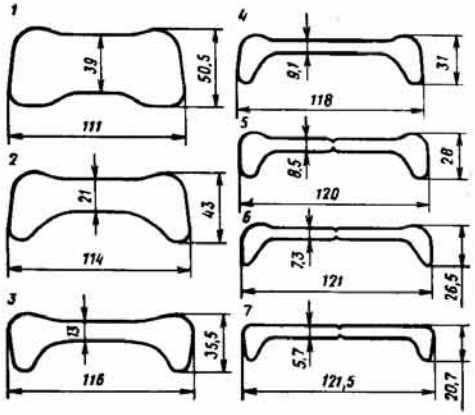


Рис. 29. Обводки темплетов при прокатке полособульбового профиля № 6 в сдвоенном виде

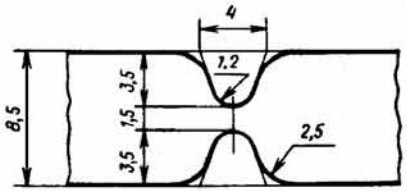


Рис. 30. Конструкция разрезающего гребня в калибре 5 при прокатке полособульбового профиля № 6 в сдвоенном виде

гребнями. Разработанная технология была внедрена на стане 400 и позволила вдвое повысить производительность.

Для повышения производительности и улучшения качества готового проката была разработана и внедрена на стане 400 прокатка сдвоенной полосы сечением 65×6 мм с разделением ее в холодном состоянии на специальной установке, смонтированной на адъюстаже.

При проектировании калибровки для прокатки сдвоенной полосы 65×6 мм частично использовали калибры полосы сечением 130×6 мм, что позволило разместить их в одном комплекте валков и вести прокатку без дополнительной перевалки. При прокатке сдвоенной полосы 65×6 мм профиль получают в первых пяти закрытых полосовых калибрах с последующей прокаткой в двух проходах на гладкой бочке (рис. 31).

Ослабленное сечение в центральной части раската (рис. 31) формируется надрезкой симметричными гребнями в третьем по ходу прокатки закрытом полосовом калибре с дальнейшим смыканием канавок благодаря уширению в последующих пропусках. Как показал опыт, толщина соединительной перемычки должна быть в пределах от 1,5 до 3,0 мм. При более тонкой перемычке концы раската разделяются преждевременно в промежуточных проходах, что исключает дальнейшую прокатку полосы в закрытых калибрах. В то же время чрезмерно утолщенная перемычка сильно затрудняет разделение полосы.

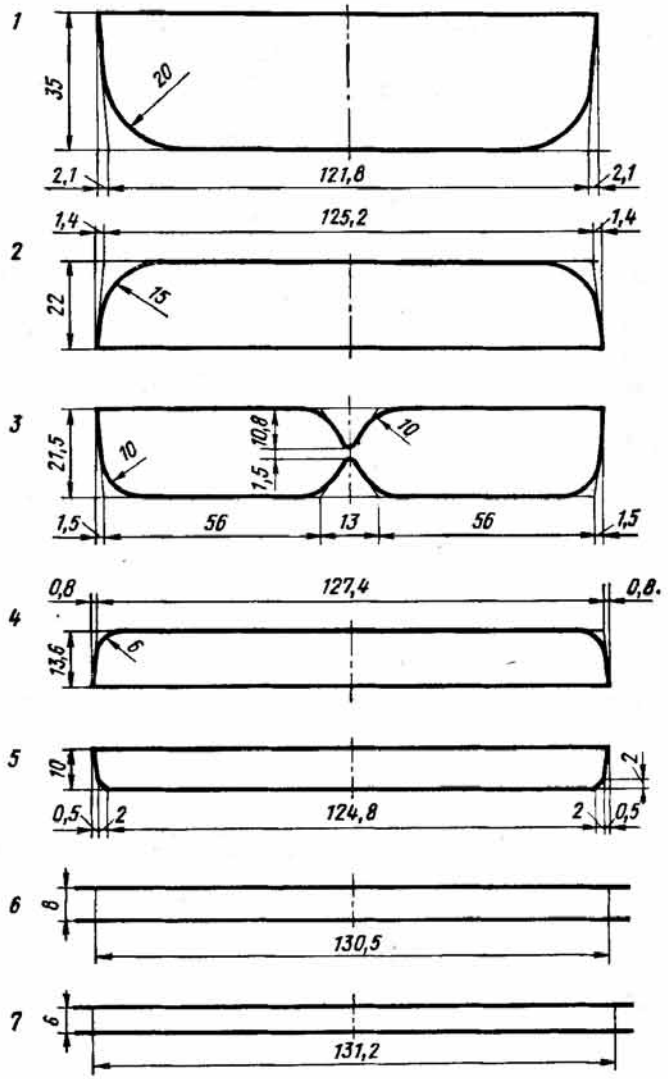


Рис. 31. Калибровка полосы 65×6 мм в сдвоенном виде на линейном стане 400

При первых опытных прокатках было обнаружено, что при разрезке гребнями одинаковой высоты соединительная перемычка на профиле смещается вверх на 1,0–1,5 мм, т.е. полоса верхним и нижним валком обжимается неодинаково. Причиной этого является расположение раската под углом к горизонтальной плоскости при прокатке в верхних горизонтах второй и третьей клетей. Несимметричность перемычки по высоте полосы нарушает стабильность процесса разделения сдвоенной полосы на готовые профили. Для устранения этого недостатка разрезающие гребни выполнили различной высоты (высота верхнего гребня больше высоты нижнего до 1,6 мм).

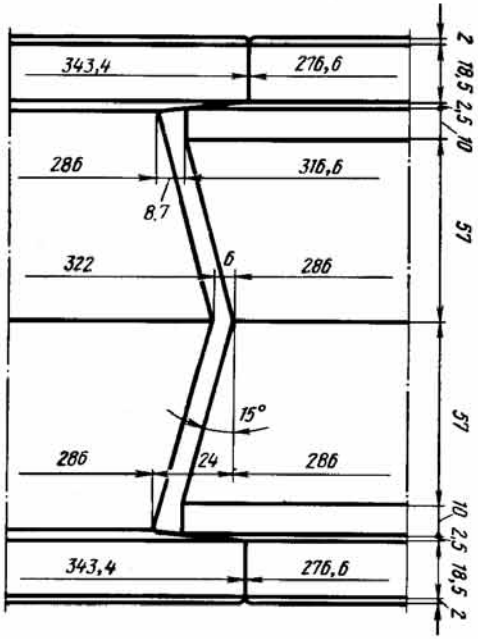


Рис. 32. Профилировка роликов гибочной клети, предназначенной для разделения сдвоенной полосы сечением 65×6 мм

Для разделения полосы использовали две роликовые клети, в которых с целью разделения осуществляется гибка полосы вдоль линии разделения. Профилировка роликов клети *1* приведена на рис. 32. Вторая роликовая клеть имеет совершенно аналогичную конструкцию, только ролики меняются местами и, следовательно, гибка осуществляется в противоположную сторону. Максимальный угол изгиба в роликовых клетях может быть до 15°, однако на практике этот угол не превышает 5–6°, а величина угла регулируется за счет разведения валков.

При прокатке промышленной партии геометрические размеры полосы 65×6 мм контролировались путем отбора темплетов сдвоенного профиля и разделения их на части. Максимальная разноширинность разделенных полос не превышала 0,7 мм. Общая масса партии, прокатанной по приведенной технологии, составила около 1200 т. Смещение положения перемычки от центра толщины профиля не превышало 0,5 мм. Производительность стана при прокатке сдвоенной полосы была такой же, как и при прокатке полосы 130×6 мм.

Хотя отдельные опыты сдвоенной прокатки дали положительные результаты, широкому распространению этого метода мешают трудности, возникающие при разделении, и невозможность получить ровную заданную поверхность в месте разделения.

Иногда для сложных профилей оказывается целесообразным предусматривать в чистовых клетях прокатку с неприводным верхним валком. Так, на стане 550 Чусовского металлургического завода при прокатке профиля автообода 24Ч еще в 50-х годах применялся в чистовой клети неприводной верхний валок: длина бочки валков 1540 мм, число чистовых калибров на валках – пять. Верхний валок из стального литья марки 50, нижний – из низколегированного полутвердого чугуна, модифицированного магнием.

Применение стального валка в чистовой клети вызвано наличием в калибрах верхнего валка буртиков (гребней) в форме трапеции для выполнения канавки замочной части профиля автообода; высота

буртика 10,2 мм, средняя ширина 9,8 мм. Применение чугунных валков здесь недопустимо, так как на чугунных валках будет происходить выкрашивание буртиков в процессе работы.

Несмотря на то, что на комплекте чистовых валков размещается пять калибров и буртики на верхнем валке с целью увеличения их стойкости подвергались закалке на специальной установке, средняя стойкость одного комплекта составляла 1000 т готового проката, или 8,3 кг валков на 1 т проката. При этом за одну переточку с верхнего валка приходилось снимать по диаметру в среднем 19 мм, в то время как для восстановления нижнего валка достаточно снять 2–3 мм.

Для того, чтобы сократить расход валков перешли на прокатку с неприводным верхним валком. При таком способе прокатки зазор между всеми буртами нижнего и верхнего валков одинаковый и равен 4 мм. При отсутствии раската бурты верхнего и нижнего валков соприкасаются и верхний валок вращается под действием трения. Уменьшение диаметров верхнего и нижнего валков в процессе переточек производится независимо друг от друга и определяется только износом, причем разница в диаметрах доходила до 110 мм.

Так как с нижнего валка при переточке снимается только 2,5 мм (по диаметру), а с верхнего – 19 мм, то при описании верхнего валка в брак к нижнему подтачивается новый верхний валок. Таким образом к каждому нижнему чугунному валку требуются два стальных верхних валка, при этом такой трехвалковый комплект допускает установку его в стан до 20 раз при уменьшении расхода валков с 8,3 кг до 2,5 кг на 1 т проката.

Процесс прокатки с неприводным верхним валком находит также применение в чистовых клетях мелкосортных (иногда среднесортных) станов линейного типа при прокатке тонких профилей полосового (или клиновидного) типа. Такое применение обусловливается большой отдачей ("пружиной") клетей, которая превышает минимальную толщину профиля. Поэтому и приходится создавать предварительное напряжение в чистовой клети за счет возможно более плотного прижатия валков друг к другу.

На Омутнинском металлургическом заводе при прокатке многих профилей, для которых необходимо получать острые кромки (треугольные профили, полукруглые, сегментные и т.д.), используют процесс прокатки с неприводным верхним валком не только в чистовой, но также и в предчистовой клети.

При этом неприводной валок устанавливают плотно под нажимом к приводному ("в забой"), но так как бурты обычно недостаточно широкие (желательно все-таки всегда нарезать на валках больше калибров), то даже при плотном прижатии валков друг к другу не происходит при пуске стана вращения неприводного валка вследствие недостаточной поверхности контакта между буртами валков. Поэтому у вальцовщика имеется скоба с рычагом, которую вальцовщик надевает на треф неприводного валка и в момент пуска стана поворачивает рычагом неприводной вал, который начинает вращаться вместе с при-

водным. Затем производится дополнительное нажатие неприводного валка.

Хотя при использовании калибров закрытого типа рекомендуется чередование разъемов калибров, все-таки в отдельных случаях успешно применяется положение разъемов в одну сторону в двух соседних калибрах.

На линейном мелкосортном стане 250 Чусовского металлургического завода при прокатке профиля бандажного кольца в двух фасонных калибрах из квадрата 15,5×15,5 мм в качестве предчистового был применен открытый калибр с разъемом посередине, по форме подобный готовому профилю (впоследствии разъем был несколько смещен в сторону вогнутости профиля). Однако даже после изменения расположения разъема при колебании температуры полос наблюдалось переполнение предчистового калибра. В чистовом калибре часто происходило оковывание валков, сопровождавшееся поломкой муфт, прокатных валков или их буртов.

Для улучшения условий прокатки предчистовой калибр сделали закрытого типа, аналогично чистовому калибру, с верхним разъемом валков (рис. 33). Кроме того, для задачи квадрата в предчистовой калибр *1* освоили обводной аппарат, что устранило тяжелый труд вальцовщиков и повысило ритм прокатки. При изменении калибровки значительно улучшилась работа стана, увеличилась производительность и почти полностью исчезли случаи оковывания валков и их поломок.

На рис. 34 приведен еще один пример калибровки асимметричного профиля, в котором разъем предчистового и чистового калибров выполнен в одну сторону.

При прокатке профилей с ребрами жесткости и П-образной формы в качестве предчистовых контрольных калибров обычно используют контрольные калибры полузакрытого типа с горизонтальным разъемом (рис. 10, *б*). Закрытые контрольные калибры (рис. 10, *в*) применяют-

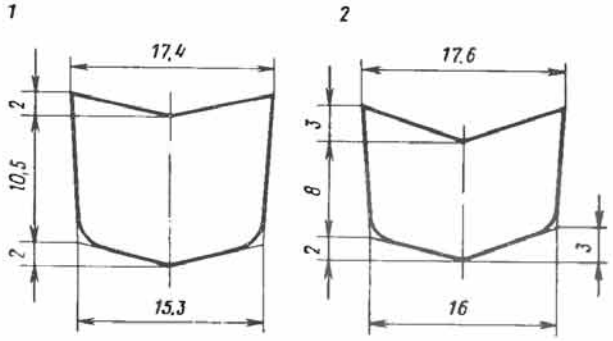


Рис. 33. Калибровка профиля бандажного кольца: *1* и *2* – калибры, *2* – чистовой калибр

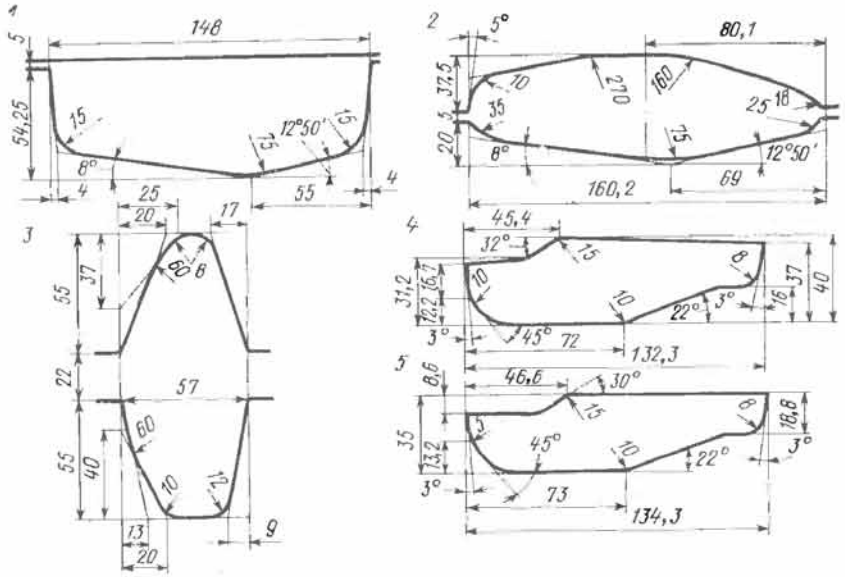


Рис. 34. Калибровка асимметричного профиля на линейном стане 500

ся значительно реже. Иногда, но тоже редко, контрольными калибрами являются предпредчистовые калибры.

На рис. 35 приведена схема прокатки П-образного профиля боковины рештака СП-2, при освоении которого пришлось изменить и усовершенствовать конструкцию предчистового полузакрытого контрольного калибра. Для расчета калибровки профиль боковины рештака условно разбивается на четыре расчетных элемента: стенку (включая скошенные участки), левую и правую полки и выступ.

Равенство коэффициентов деформации по толщине элементов обеспечивается практически по всему циклу прокатки.

Это необходимо прежде всего для надежного формирования выступа, так как этот элемент вследствие малой площади в большой степени подвержен влиянию условий деформации в смежном элементе (полке). Неравномерность деформации между этими элементами может привести к утяжке или переполнению выступа. Форма выступа для готового изделия не имеет значения. Выступ предусмотрен только для того, чтобы обеспечить постоянство высоты полки в месте сварки кромки с листом, но колебания размеров выступа могут вывести профиль за пределы допускаемых отклонений по ширине.

Форма средней линии не постоянна: глубина уступа по средней части сечения профиля по отношению к развернутым полкам увеличивается по ходу прокатки. Высота развернутых калибров в этих условиях остается постоянной, практически не изменяется и их ширина, так как уширение компенсируется увеличением глубины уступа. Требуется только правильно учитывать длину средней линии с учетом из-

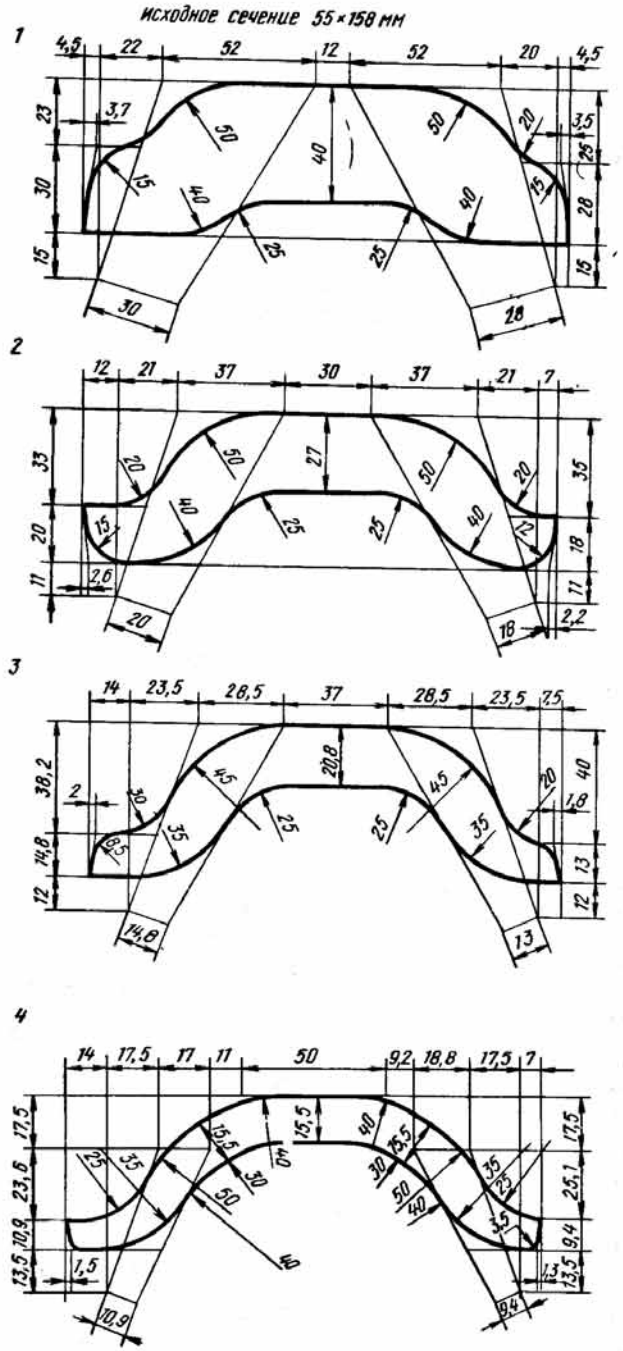
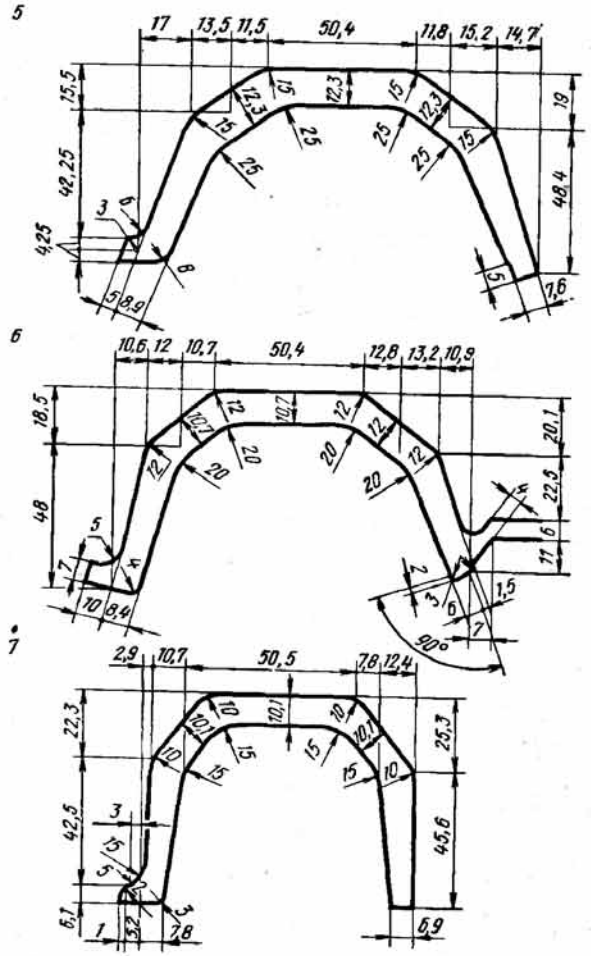


Рис. 35. Схема прокатки профиля боковины рештака СП-2 на линейном стане 550 (исходное сечение 55×158 мм)



Продолжение рис. 35

менения ее формы и уширения. Неблагоприятным для формирования профиля фактором является сравнительно большая высота полок. Отношение высоты полок к ширине профиля значительно выше, чем у швеллеров.

Для формирования профиля применен способ постепенного сгибания полок [3]. Прокатка в развернутых калибрах обеспечивает лучшие условия для образования полок, чем при корытной схеме.

При переходе от развернутых полок к прямым возникает новая трудность, обусловленная большой разностью ширины последнего развернутого (165,5 мм) и чистового (98 мм) калибров.

Способ постепенного сгибания обеспечивает ступенчатое уменьшение ширины раската за три прохода, но и в этих условиях ширина задаваемого раската, начиная с сечения полосы, выходящей из калибра,

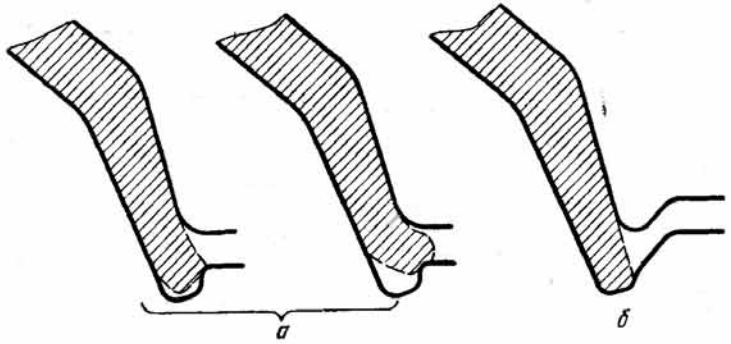


Рис. 36. Конструкции разъемов для полузакрытых калибров и заполнение этих элементов:
а – с горизонтальным разъемом; *б* – с наклонным разъемом

значительно больше ширины последующего калибра, что затрудняет условия задачи полосы в калибр. Для обеспечения задачи полосы здесь используется фактор внеконтактной деформации. В условиях постоянного угла между горизонтальным и смежными наклонными элементами и уменьшения ширины сечения только за счет сгибания полок задача раската практически невозможна. Поэтому предусмотрено постепенное уменьшение этого угла в каждом последующем по ходу прокатки калибре. Поскольку первоначально захват металла валками происходит по горизонтальной стенке, а затем в зону очага деформации вовлекаются смежные участки и происходит уменьшение упомянутого угла, то полки оказываются предварительно подготовленными для входа в очаг деформации. В дальнейшем положение полок обеспечивается благодаря изменению формы участка полосы, непосредственно находящегося в очаге деформации.

В процессе доработки калибровки основной трудностью было получение прямой полки в заданных пределах по высоте. Полоса в полузакрытый калибр *б* приходит не совсем подготовленной к полному совпадению контуров полок, и кромка полки может не попасть в канавку, а может занять одно из положений, представленных на рис. 36, *а*. Поэтому форма полузакрытого элемента предчистового калибра *б* (см. рис. 35) была изменена (рис. 36, *б*) таким образом, чтобы при наклонном разъеме валков обеспечить надежный заход конца полки в калибр и полностью исключить дефекты, представленные на рис. 36, *а*.

При освоении профиля боковины рештака наблюдалось еще одно явление: полосу скручивало в калибре *б* в направлении изогнутой полки. Это происходило по следующей причине. Постепенный переход к прямому углу между полотном и полками в отличие, например, от швеллера обусловливает меньшую жесткость полосы в калибре и создает условия некоторого смещения сечения полосы относительно калибра под воздействием давления на кромку. Конечно, это может

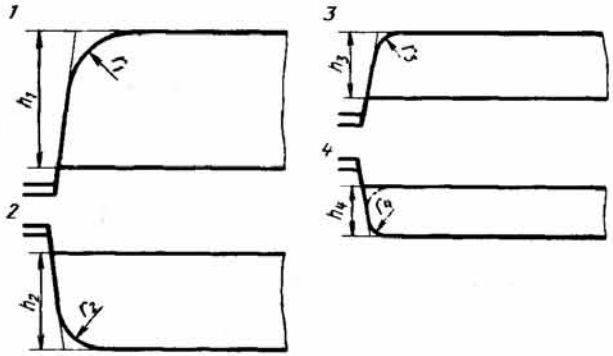


Рис. 37. Конструкция горизонтальных элементов фасонных профилей для закрытых калибров с чередующимися разъемами

происходить только при условии большой разницы по высоте прямой полки у входящей полосы и калибра. Полоса сразу же на входе в очаг деформации смещается в сторону изогнутой полки. Это видно на готовом профиле: места изломов сечения не четко выражены. Для устранения этого дефекта в калибре *б* была уменьшена ширина развернутых калибров за счет прямой полки.

На рис. 37 представлена конструкция горизонтальных элементов фасонных профилей для закрытых калибров с чередующимися разъемами. Нумерация калибров принята по ходу прокатки. В чистовом калибре для определенности принят разъем сверху. Так как готовый профиль задан в соответствии с ГОСТ или ТУ, то соответственно заданы или могут быть определены радиус r_4 и радиус закругления верхнего угла боковой кромки (на рис. 37 этот радиус показан пунктиром). Зная радиус закругления верхнего угла, находим радиус закругления r_3 в предчистовом калибре. Таким образом, можно считать, что известны (заданы) радиусы закругления в предчистовом и чистовом калибрах. В остальных калибрах на основании практического опыта радиусы могут быть определены из следующего соотношения для i -того калибра

$$r_1 = r_{i+2} + (0{,}4 \div 0{,}5)\,(h_i - h_{i+2}), \qquad (9)$$

где i – номер калибра по ходу прокатки.

При этом в формуле (9) большее значение коэффициента принимается при повышенном стеснении уширения.

Если полосы и в особенности фасонные профили полосового типа прокатываются в открытых калибрах (или даже с применением отдельных черновых калибров закрытого типа), но с обязательным одним или двумя контрольными калибрами, то получение радиусов закруглений кромок готового профиля осуществляется в контрольных калибрах и никаких трудностей не представляет.

В случае же применения закрытых калибров, да еще при довольно-

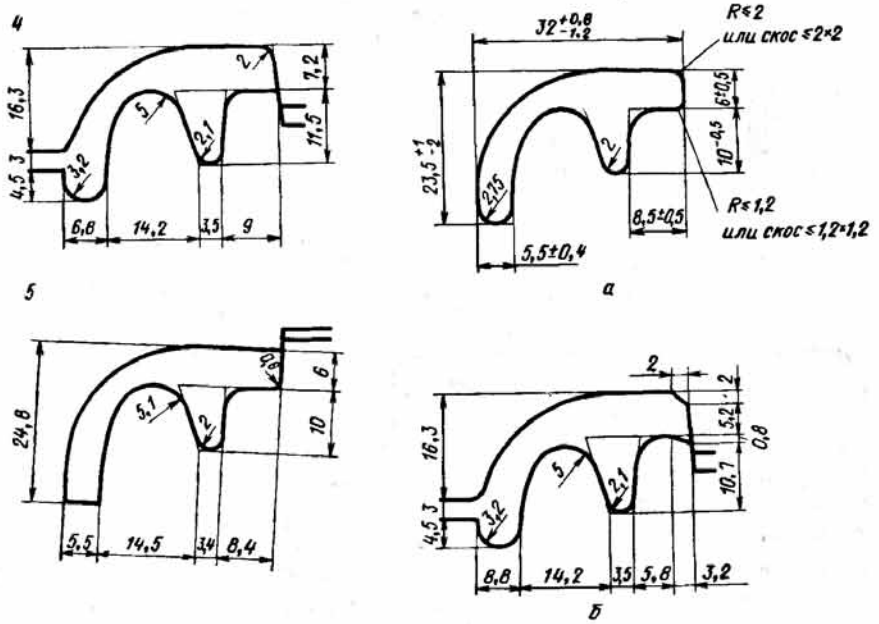


Рис. 38. Предчистовой и чистовой калибры для прокатки облегченного профиля бортового кольца 5.00S-20:
а – готовый профиль; *б* – новая конструкция предчистового калибра

таки большой пружине валков, получение заданных радиусов закруглений кромок часто при изменении условий прокатки (настройка, износ, нагрев и пр.) сопровождается образованием заусенцев и значительно затрудняет настройку. В этом смысле очень характерный пример приведен на рис. 38 при прокатке профиля бортового кольца колеса 5.00S-20 для автомобиля ГАЗ-51. Этот профиль прокатывали на стане 250 Чусовского металлургического завода. Большие затруднения связаны с получением на замочной части радиусов, не превышающих 1,2 мм и 2,0 мм. При этом использовали два метода настройки. По первому методу в предчистовом калибре *4* (рис. 38) стремились получить острый угол в разъеме замочной части за счет большей толщины из предыдущего калибра. При этом, конечно, обеспечивалось заполнение закругления радиуса 0,6 мм в чистовом калибре 5, но даже при небольшом изменении условий прокатки в разъеме замочной части калибра наблюдалось переполнение, которое периодически приводило к образованию заката на готовом профиле.

По второму методу пытались обеспечить выполнение радиусов за счет увеличения по сравнению со схемой прокатки обжатия замочной части. Но опять при хорошем заполнении нижнего закругления происходило иногда переполнение замочной части чистового калибра *5*. Такие трудности были связаны с тем, что пути настройки, обеспечивающие выполнение нижнего и верхнего закруглений, были в какой-то

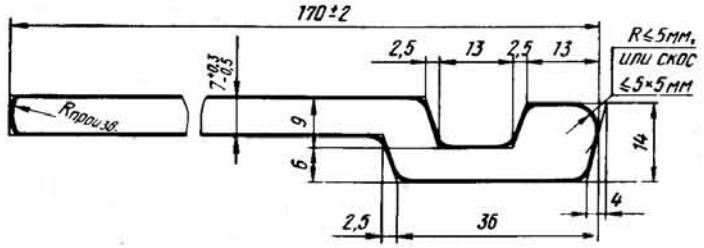


Рис. 39. Профиль для втулок железобетонных труб

степени противоречивы, то есть исключали друг друга. А постоянно держаться "золотой середины" не всегда удавалось.

Для совершенствования калибровки предусмотрели скос 3,2×0,8 мм в калибре *4* (рис. 38, *б*), что предопределило повышенную местную деформацию в этом угле чистового калибра и соответственно хорошее заполнение соответствующего закругления. Кроме того, дополнительно (совместно с заказчиком) рассмотрели чертеж готового профиля и внесли изменения в конструкцию замочной части. Эти изменения допускали помимо закруглений замочной части радиусами 2 мм и 1,2 мм скосы этих углов не более 2×2 мм и 1,2×1,2 мм, соответственно. Новая конструкция предчистового калибра *4* (рис. 38, *б*) обеспечила устойчивую технологию при высокой производительности. Впоследствии скосы стали оговаривать при согласовании технических условий на прокатку ободов для колес автомобилей и других профилей (рис. 39).

Следует подчеркнуть, что если допускается скос в месте разъема, то имеется больше свободы при настройке, что особенно важно при прокатке фасонных профилей и, кроме того, резко уменьшается опасность переполнения. По нашему мнению, а оно подтверждается опытом металлургических заводов, применение только радиусов закруглений для кромок полос или профилей представляет собой больше традицию, чем необходимость, в то время как во многих случаях более рациональны скосы.

Заметим, что если заменить на готовом профиле радиусы кромок на скосы и если профиль работает в соприкосновении с другими профилями или деталями, то в этом случае скосы по сравнению с радиусами не уменьшают величины поверхности соприкосновения.

Скос 3,2×0,8 мм на нижнем валке в предчистовом калибре (рис. 38, *б*) представляет собой обычный ложный фланец, который предусмотрен для хорошего выполнения угла в последующем калибре. Можно даже проследить основные этапы расширения областей применения ложных фланцев. Вначале это швеллеры, затем заострение и увеличение углов (тоже ложные фланцы) при вершине при прокатке угловой и зетовой стали и, наконец, сложные профили, как, например, профиль бортового кольца. Представленные на рис. 40 различные виды ложных фланцев предчистовых калибров отмечены штриховкой.

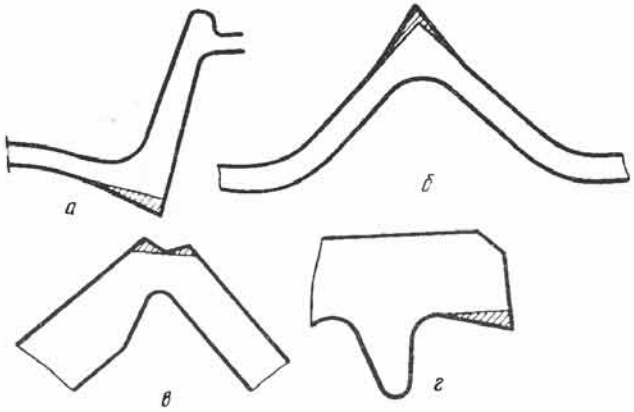
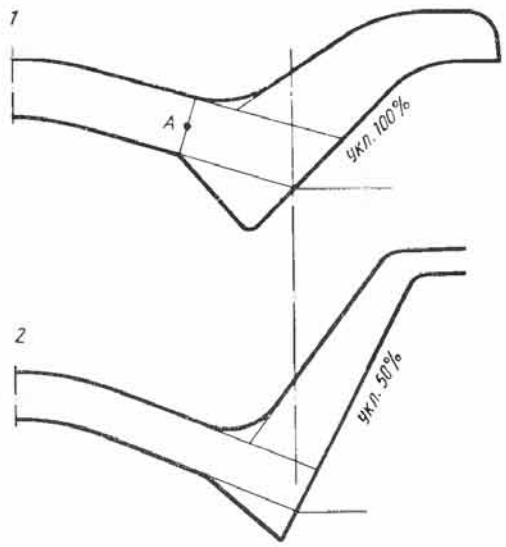


Рис. 40. Различные виды ложных фланцев (отмечены штриховкой) предчистовых калибров

При прокатке швеллерной стали или многогребневых профилей в развернутых калибрах предусматривается изменение углов раскрытия полок по пропускам, причем для развернутых калибров это изменение при переходе от калибра к калибру примерно одинаково и, как правило, сравнительно невелико. Обычно углы раскрытия полок (т.е. уклон наружных граней полок) в развернутых калибрах стараются сделать побольше, тем самым уменьшая износ валков и соответственно увеличивая производительность стана. Однако при переходе от последнего по ходу прокатки развернутого калибра к сгибающему калибру (рис. 41) разница в углах раскрытия полок довольно значительна (на рис. 41 уклон наружных граней полок в развернутом калибре – 100 %, а в сгибающем – 50 %). Поэтому при задаче развернутой полосы в сгибающий калибр происходит, кроме деформации, отгибание полок (примерно вокруг точки *А* на рис. 41), в результате чего уменьшается высота ложных фланцев и длина средней линии стенки задаваемой полосы. Отгибание полок тем больше, чем больше разница между их уклонами наружных граней в развернутом и сгибающем калибрах при одинаковой конфигурации средней линии стенки. Все эти изменения должны быть учтены при проектировании развернутого калибра.

При прокатке полосы 14×12 мм (рис. 9) используется ребровой предчистовой калибр (это одна из типовых схем при прокатке полос) и чистовой калибр (гладкая бочка) со свободным уширением. Такая схема впоследствии распространена за рубежом Р. Бейноном на прокатку шестигранной стали (рис. 42). В применяемой ранее конструкции чистового калибра шестигранной стали (рис. 42, *а*) стенкам калибра обычно придается уклон 5–8 % для беспрепятственного выхода полосы и ограничения колебаний уширения боковых сторон профиля; кроме того, такой уклон обеспечивает постоянную ширину калибра при переточках валков. Однако абсолютная величина бокового

Рис. 41. Конструкция развернутого и сгибающего калибров



выпуска даже при минимальном уклоне 5 % для крупных шестигранных профилей достигает больших значений по ширине (1,5 мм и более). Заполнение калибра приводит к перелому боковых граней профиля, что не допускается по ГОСТу. И самое главное, как показал опыт, необходимая точность боковых граней готового шестигранного

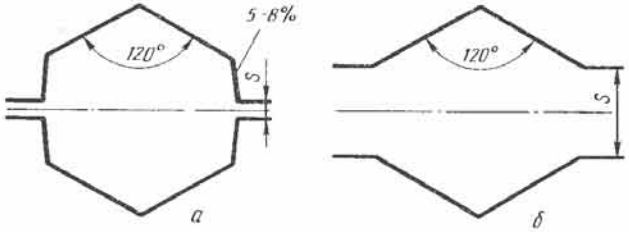


Рис. 42. Чистовой калибр для прокатки шестигранной стали:
а – обычная конструкция; *б* – рациональная конструкция без боковых стенок

профиля при прокатке со свободным уширением обеспечивается предчистовыми ребровыми калибрами, т.е. нет никакой необходимости в боковых стенках чистового калибра. Поэтому перешли на новую рациональную конструкцию чистового шестигранного калибра (рис. 42, *б*), обладающую большими преимуществами, к которым, в первую очередь, относится универсальность калибра: возможность прокатки на одних и тех же калибрах различных размеров шестигранной стали путем изменения расстояния между валками. У нас в стране рациональная конструкция чистового шестигранного калибра была применена на металлургическом заводе "Серп и молот", а затем на стане 250 Чусовского металлургического завода.

На Чусовском металлургическом заводе новая конструкция чистовых калибров позволила иметь лишь два размера чистовых калибров для прокатки всего сортамента шестигранной стали. Комплект валков с восемнадцатью одинаковыми калибрами служит для прокатки шестигранников 10–15 мм, комплект с двенадцатью калибрами – для шес-

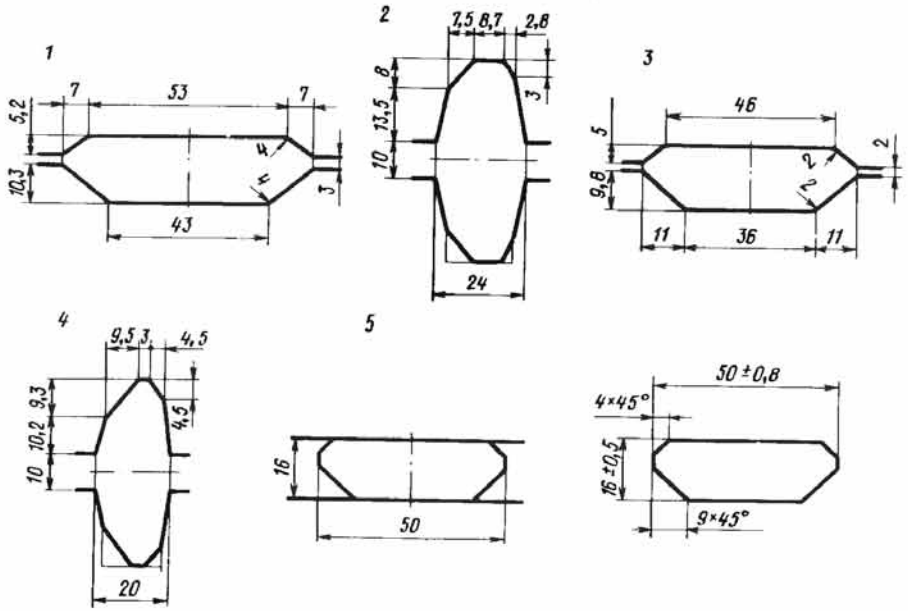


Рис. 43. Калибровка полосового профиля № 1448 со скошенными углами на стане 300 (исходное сечение – овал 58×29 мм); *а* – готовый профиль

тигранников 16–24 включительно. Опыт прокатки на стане 250 показал, что применение новой конструкции чистового калибра обеспечило получение шестигранников высокого качества – острых углов и удовлетворительной поверхности боковых граней. Кроме того, значительно увеличилась производительность стана и уменьшился расход валков.

Рассмотренная схема: ребровой калибр – чистовой калибр со свободным уширением еще явно недостаточно используется в калибровках фасонных профилей. На рис. 43 приведен интересный пример калибровки фасонного полосового профиля со свободным уширением в чистовом калибре. Боковые кромки сложной формы формируются в ребровом предчистовом калибре.

7. Расположение калибров на валках

Валки и прокатываемая полоса образуют одну общую кинематическую систему. Следовательно, расположение калибров на валках имеет большое значение для прокатки. Неправильно выбранное расположение калибра может отрицательно повлиять на работу стана и отразиться на качестве проката. Если нижний и верхний валки двухвалковой клети имеют одинаковую частоту вращения, но различные средние катающие диаметры (диаметр, которому соответствует скорость выхода полосы из валков, без учета опережения, называется средним катающим диаметром), то окружная скорость этих валков будет раз-

личной. Так, например, если средний катающий диаметр нижнего валка больше, чем верхнего, то металл у поверхности нижнего валка стремится получить бо́льшую скорость и нижний валок большего диаметра увлекает за собой верхний валок меньшего диаметра. В этом случае, главным образом между трефами верхнего валка и муфтой возникает зазор в направлении, противоположном направлению вращения, причем в ряде случаев возможна разница на пол-оборота и даже больше. Как только полоса выходит из валков, верхний валок на мгновенье останавливается, и, после того как шпиндель повернется на угол, соответствующий зазору в муфтах, верхний валок снова включается во вращение. В такие моменты мгновенной остановки валка возникают удары, которые могут привести к поломкам муфт, трефов и шеек валков. Подобные явления могут наблюдаться также при холостом ходе, когда соприкасаются бурты нижнего и верхнего валков и эти бурты имеют разные диаметры.

Когда разница в диаметрах валков очень значительна, а полоса слишком длинна, то при линейном расположении клетей возникновение зазора между муфтами и трефами может передаваться от одной клети к другой, включая и шестеренную клеть.

Почти всегда, как только разговор заходит о расположении калибров в валках, сразу же это расположение связывают с понятием нейтральной линии калибра. Под нейтральной линией обычно понимают такую линию, относительно которой моменты сил, приложенные к прокатываемой полосе со стороны нижнего и верхнего валков, равны между собой. При этом предполагается, что при совмещении нейтральной линии калибра со средней линией валков обеспечивается прямолинейный выход полосы из валков, т.е. полоса не отклоняется ни вверх, ни вниз в продольно-горизонтальной плоскости. Обычно, чтобы обеспечить стабильность процесса прокатки, калибр располагают на валках таким образом, чтобы его нейтральная линия совпадала с линией прокатки, расположенной ниже средней линии валков, то есть, как правило, предусматривают верхнее давление. В этом случае полоса незначительно изгибается вниз и прижимается к нижней проводке, чем обеспечивается стабильность процесса.

С каждым годом число способов определения нейтральной линии калибров при прокатке фасонных профилей увеличивается и каждый уважающий себя калибровщик или кто-то из научных работников, занимающийся вопросами калибровки, считает необходимым предложить свой способ. Один только З. Вусатовский предложил четыре разных способа определения нейтральной линии.

Но, к сожалению, теория и практика очень часто не совпадают друг с другом, и многие довольно-таки сложные способы определения нейтральной линии на практике из-за своей сложности не используются, хотя они кажутся наиболее логичными и подходящими. Чаще всего применяются два способа определения нейтральной линии: по центру тяжести калибра или по центрам тяжести контуров калибров.

Ни один из этих способов не является точным: катающий радиус,

определенный по контуру, меньше радиуса, определенного по площади. Для средних обжатий лучшее приближение дает определение катающего радиуса по контуру, однако при больших обжатиях следует определять по площади.

Способ проведения нейтральной линии через центр тяжести площади калибра является наиболее распространенным на практике. Идея этого способа заключается в том, что воздействие валков на отдельные элементы профиля принимают пропорциональным их статическим моментам. В этом случае точкой приложения равнодействующей всех сил, действующих на профиль, явится его центр тяжести.

Этот способ весьма прост, так как центр тяжести калибра можно определить без всяких расчетов – уравновешиванием шаблона калибра на тонкой кромке обычной линейки.

Другой способ определения центра тяжести площади калибра основан на применении планиметра или же аналитического метода вычисления соответствующих площадей. При этом поступают следующим образом: вычерчивают калибр между двумя параллельными линиями $x-x$ и $y-y$ (рис. 44), затем наносят на чертеж площади S_x и S_y и определяют их величину

$$\left.\begin{aligned} S_x &= BH_x, \text{ где } H_x = S_x/B, \\ S_y &= BH_y, \text{ где } H_y = S_y/B. \end{aligned}\right\} \qquad (10)$$

Высоты H_x и H_y должны иметь одинаковую величину. Предположим, что $H_x - H_y = u$, тогда на площади S_x можно расположить прямоугольник шириной B и высотой u, средние высоты площади S_y и увеличенной площади S_x будут одинаковы. Проведя на середине расстояния между линиями $y-y$ и $z-z$ линию $M-M$, делят калибр на две одинаковые по площади части. Тогда линия $M-M$ будет нейтральной линией изображенного на этом рисунке калибра. Этот способ пригоден для всех профилей какой угодно неправильной формы.

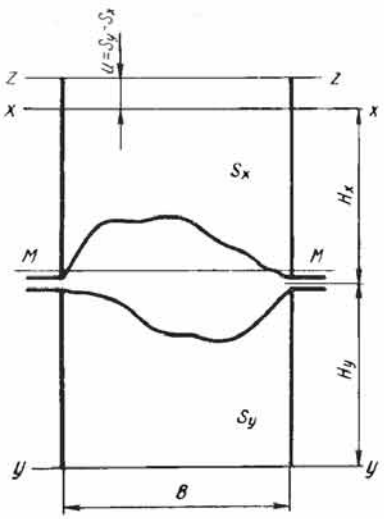


Рис. 44. Определение нейтральной линии калибра

В ранних руководствах по калибровке валков всегда подчеркивалось, что условием применимости описанного способа определения нейтральной линии по центру тяжести является равномерное распределение обжатия по калибру. Это, конечно, не всегда возможно, так как фасонные профили обычно прокатываются из заготовок прямо-

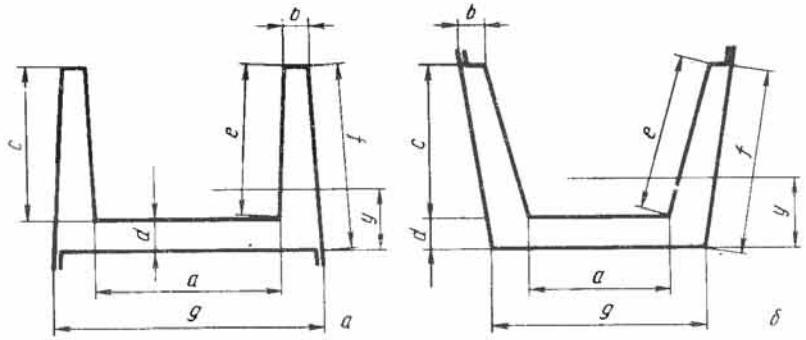


Рис. 45. Определение нейтральной линии калибра по центру тяжести контуров

угольного или квадратного сечения и при этом, естественно, обязательно имеет место неравномерное распределение обжатия по калибру. Поэтому при определении нейтральной линии в случае неравномерного распределения обжатий необходимо учитывать форму раската, задаваемого в рассматриваемый калибр.

Распределение обжатий по калибру учитывается в способе определения нейтральной линии по центрам тяжести контуров калибра. По этому способу нейтральная линия калибра проводится на половине расстояния между центрами тяжести контуров калибра в каждом валке. При этом части контуров, не подвергающиеся или подвергающиеся обжатию лишь в результате уширения, при определении центра тяжести во внимание не принимаются.

Теоретическим обоснованием этого способа является предположение, что воздействие валка на профиль пропорционально моменту части контура калибра, принадлежащей этому валку. В этом случае, если исходить из примерно равных усилий прокатки во всех частях профиля, точка приложения равнодействующей сил, приложенных со стороны валка, находится в центре тяжести контура, соприкасающейся с этим валком. Нейтральная линия должна проходить посередине между центрами тяжести контуров нижнего и верхнего валков.

На рис. 45 приведены контуры калибров для прокатки швеллеров. Обозначим через Y_1 и Y_2 положения (ординаты) контуров калибров соответственно нижнего и верхнего валков, а через $Y = {}^1/_2(Y_1 + Y_2)$ – ординату нейтральной линии калибра. При этом в закрытом калибре (рис. 45, *а*) обжатие полок по толщине отсутствует, а в другом калибре (рис. 45, *б*) обжатие полок по высоте незначительно и поэтому может не учитываться.

Из рис. 45, *а* ($Y_1 = 0$)

$$Y = {}^1/_2\, Y_2 = {}^1/_2 \left[\frac{a\,d + 2\,b\,(c + d)}{a + 2\,b}\right]; \qquad (11)$$

из рис. 45, *б* ($Y_1 \neq 0$)

$$Y = {}^1/_2 (Y_1 + Y_2) = {}^1/_2 \left[\frac{2f \frac{(d+c)}{2}}{2f} + \frac{2e\left(d + \frac{c}{2}\right) + ad}{2e + a} \right] =$$

$$= {}^1/_2 \left[{}^1/_2 (d + c) + \frac{2e\left(d + \frac{c}{2}\right) + ad}{2e + a} \right]. \qquad (12)$$

Обычно, когда рассматривается вопрос о расположении калибров на валках, то имеется в виду определение нейтральной линии. Как отмечалось выше, при неточном или не совсем точном определении положения нейтральной линии происходит изгиб полосы вниз или вверх. Этот изгиб, можно сказать, устраняется полностью или почти полностью проводками на выходе полосы из валков и только в редких случаях происходит опережение линии вращения одного из валков за счет его большей скорости, обусловленной неправильным определением нейтральной линии.

Один из авторов наблюдал сильнейшие удары на второй клети трехклетевого стана 550 Чусовского металлургического завода при освоении нового профиля углового типа для нижнего поворотного круга автомобильных прицепов (рис. 46, *а*). Нейтральная линия определена по центру тяжести и определена правильно, однако для угловых профилей относительное обжатие, а тем более и абсолютное, по вершине профиля всегда больше, чем по его полкам. А так как технология не была отработана и профиль только осваивался, то при настройке наблюдались существенные отклонения от расчетной схемы. И вот оказалось, что необходимо резко уменьшить обжатие полок в рассматриваемом предчистовом калибре (калибр был врезан в среднем и верхнем валках трехвалковой клети), причем так уменьшить, что обжатие полок почти отсутствовало. Тогда средний валок с большим диаметром по вершине профиля увлекал за собой верхний, который опережал линию стана и при выходе полосы из валков останавливался с очень сильным ударом. Но такие случаи вообще-то редки и обусловлены или нарушением технологии, или же существенной ошибкой в расчетах.

На рис. 46, *б* приведен пример прокатки профиля швеллера, когда верхняя граница закрытой полки расположена на 5 мм ниже линии прокатки, однако в процессе прокатки не наблюдалось ни ударов, ни других неполадок.

Следует подчеркнуть, что расположение нейтральной линии в большой степени зависит от режима (распределения) обжатий для отдельных элементов профиля. Это обстоятельство и учитывают, хотя в упрощенной форме, два рассмотренных правила определения нейтральной линии: по центру тяжести калибра и по центру тяжести контуров калибра.

Теперь допустим, что выполнен расчет калибровки нового профиля, определены нейтральные линии калибров, сделаны монтажные чертежи, выточены валки, изготовлена валковая арматура, проведена перевалка и началось освоение нового профиля.

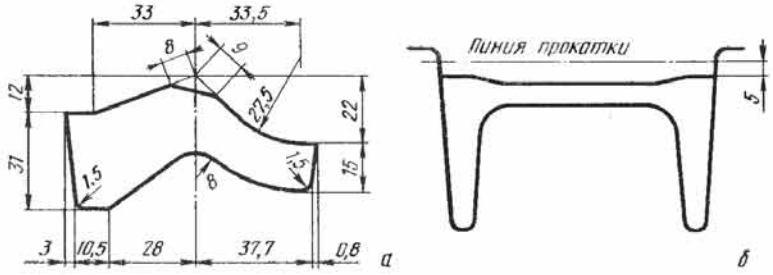


Рис. 46. Предчистовые калибры для прокатки профиля для автомобильных прицепов (*а*) и профиля швеллера (*б*)

Однако выявлено, что нейтральные линии калибров определены не совсем правильно. Так как нейтральные линии определялись по какой-то одной методике, то значит, что для всех калибров нейтральная линия или выше средней линии, или для всех калибров ниже средней линии валков. Исправить этот недостаток, если, конечно, смещение нейтральной линии не чрезмерно, не так уж сложно. Необходимо при переточке валков для одного валка предусмотреть большее уменьшение диаметра, а для другого – меньшее, хотя при этом несколько возрастет расход валков. Подводя итог, можно сказать, что вообще-то желательно определять точнее положение нейтральной линии, но в то же время и погрешность, даже значительная, при этом определении чем-то особым не угрожает. Тем более, что пока не имеется критериев оценок точности методов определения нейтральных линий.

Перейдем теперь к важнейшим вопросам расположения калибров на валках при прокатке профилей, обеспечивающего прямолинейный выход полосы в продольно-горизонтальной плоскости, т.е. отсутствие серповидного изгиба (серпения) и скручивания. При прокатке профилей эти вопросы имеют существенное значение и от обеспечения прямолинейного выхода полосы зависит, в первую очередь, производительность стана, качество продукции и технико-экономические показатели работы. Принято считать, что серповидный изгиб и скручивание являются следствием неравенства высотных коэффициентов деформации и температуры металла в тонкой и утолщенной частях профиля, неравномерности износа частей калибров, неодинаковых давлений и скоростей валков. В наиболее упрощенной схеме предполагается, что факторами серповидного изгиба являются коэффициент вытяжки по сечению λ и результирующая скорость v, а скручивания – разность катающих диаметров ($D_{к.в} - D_{к.н}$). Однако на практике эти факторы действуют совместно и в зависимости от условий могут привести к разным последствиям.

Если, например, широкая полоса прокатывается так, что левый край получает малое обжатие, а правый край получает очень большое обжатие, то полоса должна бы стремиться изогнуться в своей плос-

кости таким образом, чтобы край с большим обжатием стал выпуклым, а край с меньшим обжатием – вогнутым. Однако широкая полоса является слишком жесткой, чтобы изгибаться в плоскости самой полосы. Так как деформация всегда идет в направлении наименьшего сопротивления, то полоса скручивается подобно штопору. Край, подвергающийся большему обжатию, образует наружную окружность винта, в то время как край с меньшим обжатием идет по внутреннему радиусу винта.

Предупредить скручивание и серповидный изгиб не всегда возможно с помощью линеек и проводок. Кроме того, усиленное трение прокатываемого профиля о линейки и проводки может привести к появлению на металле глубоких задиров.

С целью получения формул для определения коэффициентов уширения β и серповидного изгиба Δ выполнен планируемый эксперимент при прокатке клиновидных профилей на полупромышленном стане 300. Привод стана от электродвигателя мощностью 120 кВт, скорость прокатки 0,5 м/с, материал валков – сталь 45. Образцы прямоугольного сечения длиной 400 мм изготовлены из стали МСт3. Температура нагрева образцов перед прокаткой 1050–1070 °С.

На основании анализа существующих калибровок для прокатки клиновидных профилей, а также исходя из технической характеристики стана 300, значения размерных геометрических параметров (рис. 47) ограничены пределами

$$\left.\begin{array}{l} 15\ \text{мм} \leqslant H_0 \leqslant 20\ \text{мм};\quad 30\ \text{мм} \leqslant b_0 \leqslant 120\ \text{мм}; \\ 12{,}5\ \text{мм} \leqslant H_1 \leqslant 18{,}2\ \text{мм};\quad 5{,}3\ \text{мм} \leqslant h_1 \leqslant 16{,}6\ \text{мм}. \end{array}\right\} \qquad (13)$$

Нижний валок цилиндрический, а верхний выполнен в форме конуса. Из геометрических параметров очага деформации D, H_0, H_1, b_0, h_1 образованы четыре безразмерных относительных параметра

$$m_1 = H_0/H_1;\quad m_2 = (H_1 - h_1)/2\,b_0;\quad m_3 = b_0/H_0;\quad m_4 = R/H_0. \qquad (14)$$

Из условия (13) при R = 150 мм определены пределы изменения безразмерных относительных параметров m_i

$$\left.\begin{array}{l} 1{,}1 \leqslant m_1 \leqslant 1{,}2;\quad 0{,}02 \leqslant m_2 \leqslant 0{,}04; \\ 2 \leqslant m_3 \leqslant 6;\quad 7{,}5 \leqslant m_4 \leqslant 10, \end{array}\right\} \qquad (15)$$

где параметр m_2 определяет величину клиновидности полосы.

При планировании эксперимента в качестве модели для неизвестных функций $\beta = b_1/b_0$ – коэффициента уширения и Δ – величины серповидного изгиба полосы в мм на 500 мм длины принята модель в виде неполного полинома второй степени (тип I)

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4 + a_{12}x_1x_2 + a_{13}x_1x_3 + a_{14}x_1x_4 + a_{23}x_2x_3 + a_{24}x_2x_4 + a_{34}x_3x_4, \qquad (16)$$

где область планирования эксперимента в пространстве $n = 4$ определяется неравенством

$$-1 \leqslant x_i \leqslant +1;\quad i = 1, 2, 3, 4. \qquad (17)$$

В исследовании использован план полного факторного эксперимента 2^4. Число экспериментальных точек N равно $N = 2^4 = 16$.

Переменные x_i и m_i связаны зависимостями [25]:

$$\left.\begin{array}{l} x_1 = 20\,m_1 - 23;\quad x_2 = 100\,m_2 - 3; \\ x_3 = 0{,}5\,m_3 - 2;\quad x_4 = 0{,}8\,m_4 - 7, \end{array}\right\} \qquad (18)$$

которые получены при переходе от переменных m_i к кодированным переменным x_i из условия (17) на основании соотношений

$$x_i = \frac{m_i - m_{i\,\text{ср}}}{0{,}5\,(m_{i\,\max} - m_{i\,\min})}, \qquad (19)$$

где $m_{i\,\text{ср}} = 0{,}5\,(m_{i\,\max} + m_{i\,\min})$ – среднее значение m_i, а $m_{i\,\max}$ и $m_{i\,\min}$ соответственно верхний и нижний пределы изменения m_i.

Определение геометрических размеров образцов до и после прокатки H_0, h_1, b_0, b_1, H_1 и обработка результатов планируемого эксперимента проведены на основании опытных данных по методике, изложенной в работе [8]. Формулы для расчета коэффициентов уширения β и серповидного изгиба Δ в зависимости от переменных x_i и m_i имеют вид:

$$\beta = b_1/b_0 = 1{,}05 + 0{,}0297\,x_2 + 0{,}0239\,x_3 - 0{,}0103\,x_1x_4 - 0{,}0143\,x_2x_3 + 0{,}0103\,x_2x_4; \qquad (20)$$

$$\Delta = 42{,}1 + 10{,}53\,x_2 + 22{,}15\,x_3 + 3{,}9\,x_1x_2 + 3{,}025\,x_1x_3 + 12{,}22\,x_2x_3 - 6{,}15\,x_2x_4. \qquad (21)$$

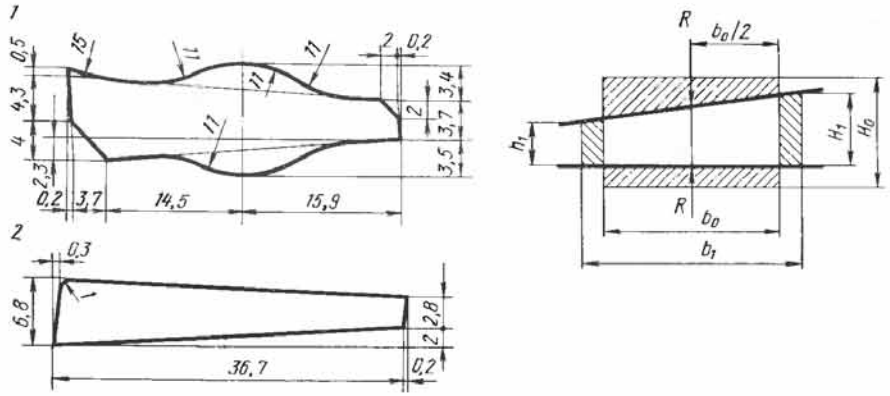


Рис. 47. Схема обжатия полосы при прокатке клиновидных профилей

Рис. 48. Калибровка клиновидного профиля $36{,}5^{+0{,}5}_{-1{,}0} \times 7^{\pm 0{,}5} \times 3^{\pm 0{,}5}$ мм на стане 300 (исходное сечение – круг диаметром 22 мм)

После перехода от переменных x_i и m_i согласно зависимостям (18) получены окончательные формулы для определения коэффициентов β и Δ, которые определены для интервалов изменения параметров m_i, указанных в системе неравенств (15):

$$\beta = -0{,}520 + 1{,}44\, m_1 - 1{,}39\, m_2 + 0{,}00949\, m_3 + 0{,}165\, m_4 - 0{,}165\, m_1 m_4 - 0{,}715\, m_2 m_3 + 0{,}825\, m_2 m_4; \quad (22)$$

$$\Delta = 318{,}6 - 355{,}0\, m_1 - 6056\, m_2 - 42{,}04\, m_3 + 14{,}76\, m_4 + 7800\, m_1 m_2 + 30{,}25\, m_1 m_3 + 611{,}0\, m_2 m_3 - 492{,}0\, m_2 m_4. \quad (23)$$

Средние величины ошибок

$$\delta_1 = \frac{\beta_э - \beta_р}{\beta_э} 100\,\% \text{ и } \delta_2 = \frac{\Delta_э - \Delta_р}{\Delta_э} 100\,\%.$$

Индексы э и р относятся к экспериментальным и расчетным данным, для зависимостей (22) и (23) соответственно равны 1,3 и 11,6 %. В отдельных случаях величина серповидного изгиба весьма значительна.

При анализе зависимостей (22) и (23) установлено, что наибольшее влияние на коэффициенты β и Δ оказывает изменение параметров m_2 и m_3. При этом при увеличении m_2 коэффициент β возрастает, а при увеличении m_3 – уменьшается. Коэффициент серповидного изгиба Δ увеличивается с ростом параметров m_2 и m_3. Незначительное влияние m_1 и m_4 на β и Δ объясняется сравнительно малым интервалом варьирования указанных параметров.

Серповидный изгиб и скручивание наиболее нежелательны, конечно, в чистовом калибре. Однако при производстве простых и фасонных профилей высокой точности, т.е. когда при горячей прокатке получают подкат, который затем подвергается холодной прокатке или волочению, серповидный изгиб или скручивание после чистового калибра не имеют столь уж существенного значения, если при этом не создается каких-либо неудобств при прокатке. Поэтому при получении горячекатаных подкатов особое внимание обращают на предчистовой калибр и стараются избежать в нем как серповидного изгиба, так и особенно скручивания полос.

Серповидный изгиб является в основном следствием неравномерности относительных обжатий по ширине полосы, причем для большинства профилей эта неравномерность обуславливается самой формой профилей и избежать ее не представляется возможным. Поэтому, как правило, равномерность относительных обжатий по ширине полосы выдерживается более или менее точно (желательно точнее) в чистовых и предчистовых калибрах. Для калибров, где происходит первоначальное формирование профиля и для черновых калибров существует как бы обобщенное правило равномерности относительных обжатий. В этом случае делят вертикальной линией калибр пополам, чтобы площади этих половинок были друг другу равны. Для задаваемой полосы также соблюдают равенство площадей правой и левой частей. Таким образом обеспечивается равенство коэффициентов вытяжки правой и левой частей и, соответственно, должны избежать серповидного изгиба.

На ПО "Ижсталь" для прокатки клиновидных профилей предложена новая форма предчистового калибра (рис. 48) с утолщением посредине, которая, по данным авторов изобретения, обеспечивает прямолинейный выход полосы (отсутствует серповидный изгиб) из чистового калибра.

В отдельных случаях, чтобы как-то устранить или хотя бы уменьшить серповидный изгиб, устанавливают мощные и хорошо закрепленные выводные линейки. Однако изгиб полосы начинается в очаге деформации, и поэтому выводные линейки не обеспечивают полного устранения серповидного изгиба.

В этом случае заслуживает внимания и представляет интерес предложенная и испытанная в отраслевой лаборатории прокатки Днепродзержинского индустриального института конструкция сквозной линейки (рис. 49), предназначенной для устранения серповидного изгиба при прокатке клиновидных профилей. Сквозная линейка *1* располагается между валками и закрепляется передним и задним концами на арматурных брусьях. Чтобы обеспечить достаточную жесткость, средняя часть линейки опирается через вращающийся ролик *2* в вертикальные опорные бурты валков.

Существенной проблемой при калибровке профилей является скручивание полос. По общему мнению, причиной скручивания является неуравновешенность сил, действующих на левую и правую части поперечного сечения. Если при принятом расположении калибра в валках [2] разделить поперечное сечение профиля на две равные по площади части и определить катающие диаметры для этих частей и при этом окажется, что для одной части будет верхнее давление, а для другой – нижнее, то обязательно будет наблюдаться скручивание полосы. Чтобы не было скручивания, необходимо так расположить калибр в валках, чтобы для обеих частей иметь примерно одинаковое верхнее (или иногда нижнее) давление.

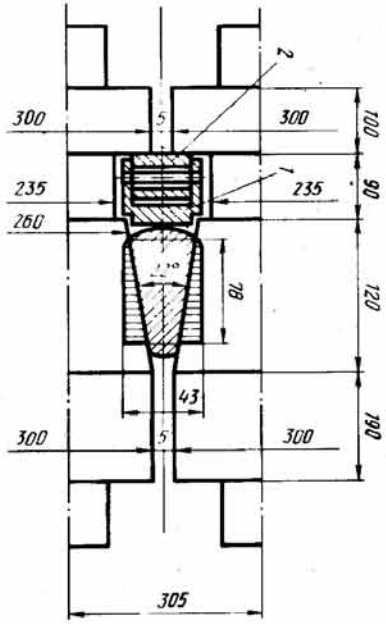


Рис. 49. Сквозная линейка при прокатке клиновидных профилей

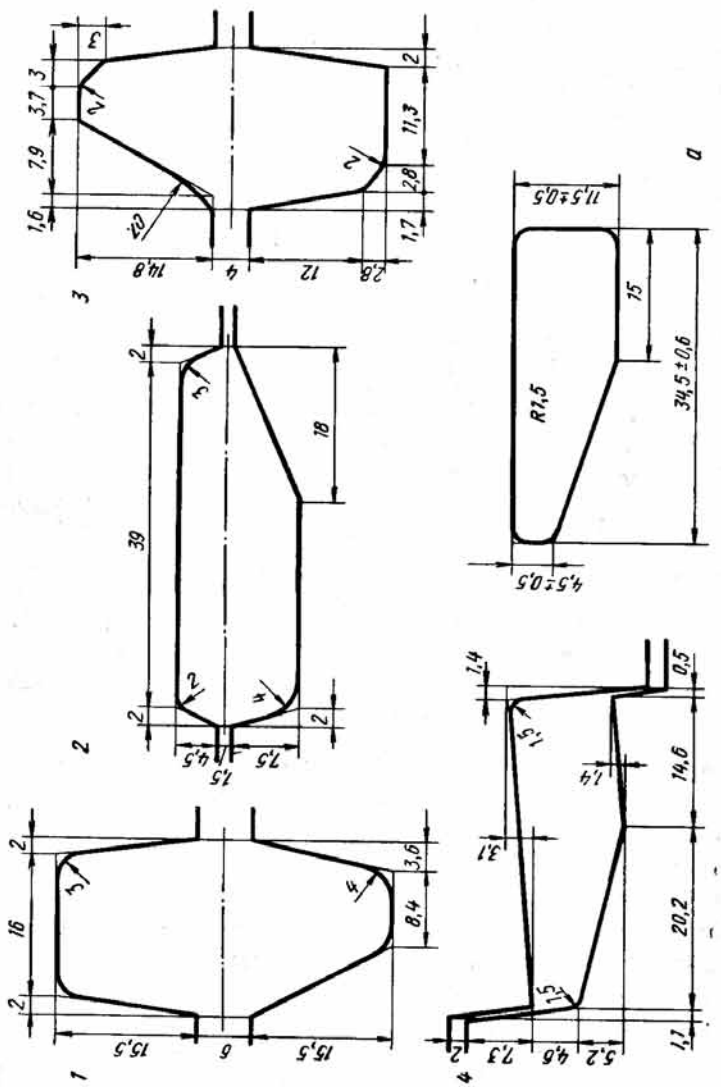


Рис. 50. Калибровка клиновидного полосового профиля № 1580 на стане 300 (исходное сечение 45X14; *а* – готовый профиль)

Однако при такой постановке не учитывается форма задаваемой полосы и, следовательно, неравномерность относительного обжатия по ширине полосы. Поэтому следует оговаривать, как и при серповидном изгибе, примерную равномерность относительных обжатий. Для этого, как уже говорилось выше, следует калибр разделить на две равные по площади части S_1 и S_2 и обеспечить равенство коэффициентов вытяжки по этим частям, т.е.

$$S_{01}/S_1 = S_{02}/S_2, \qquad (24)$$

где S_{01} и S_{02} – площади соответствующих частей до прохода.

Конечно, выполнить полностью все эти условия, обеспечивающие прямолинейный выход полосы из валков (в особенности отсутствие скручивания), вряд ли всегда возможно, но надо стараться к этому приблизиться.

И еще по расположению калибров на валках следует сделать следующее замечание. При прокатке профилей чередуются попеременно врезы калибра, то в один, то в другой валки (закрытые и открытые ручьи). В закрытом ручье в результате уширения или по условиям калибровки происходит более или менее значительное защемление полосы, которое в отдельных случаях может привести к оковыванию валков. Поэтому отдельные калибровщики стали использовать косорасположенные калибры. Эти косорасположенные калибры позволяют избавиться от защемления и, кроме того, обеспечить в случае необходимости параллельность боковых кромок профиля. Недостаток такого расположения – возможность скручивания полосы. Поскольку наклон калибра относительно поперечной горизонтальной оси незначителен, а боковые кромки ввиду их малой толщины вряд ли должны способствовать скручиванию. Пример калибровки клиновидного профиля с косорасположенным чистовым калибром приведен на рис. 50.

8. Коэффициенты деформации и распределение обжатий по проходам

Первоначальные научные рекомендации по коэффициентам деформации и распределению их по проходам относятся еще ко времени Л. Жеза, Э. Кирхберга и В. Тафеля. Очень часто калибровка того или иного профиля должна быть связана с определенным, заранее заданным числом проходов, отклонения от которого нежелательны или иногда просто невозможны. Так, например, при прокатке на станах, работающих по принципу "в каждой клети – один проход" (полунепрерывные, непрерывные), с последовательным расположением клетей, общее число проходов не может превышать имеющегося числа клетей, а при прокатке на других станах (например, типа "трио") – числа калибров, которые можно разместить на бочке валков. Если задано сечение исходной заготовки или сортамент заготовки (хотя вообще стан работает более мобильно при одном-двух исходных сечениях), то общий коэффициент вытяжки является заранее предопределенным и главным вопросом является распределение коэффициентов вытяжки или, чаще всего, коэффициентов обжатия по проходам.

Правильный выбор и распределение коэффициентов обжатия (или вытяжки) по проходам играет важнейшую и основную роль при калибровке любого профиля, и поэтому при разработке калибровки должно быть у калибровщика ясное представление о влиянии различных факторов на величину обжатия или вытяжки и правильное распределение их по проходам.

Так как от числа проходов в некоторых случаях зависит производительность стана или даже возможность получения на данном стане того или иного профиля, то часто приходится вести прокатку с максимальными обжатиями, хотя таких обжатий следует избегать.

Основными факторами, которые определяют максимально возможные обжатия (а следовательно, и вытяжку) в данном проходе, являются форма калибра, пластичность металла, прочность прокатных валков, мощность привода, угол захвата, износ валков и т.д.

Учет всех этих перечисленных факторов представляет значительные трудности, так как некоторые из них еще недостаточно разработаны теоретически, а существующие методы расчета весьма громоздки, недостаточно точны и часто дают противоречивые результаты.

В настоящее время не существует достаточно надежных методов для расчета оптимальных обжатий по проходам и калибровщик должен решать эту задачу, основываясь на опыте работы аналогичных калибровок, интуиции и личных наблюдений.

При прокатке фасонных профилей неизбежные обжатия, разные по величине, обычно осуществляются в первых проходах, причем стараются сделать так, что после одного или самое большее двух проходов получают черновой профиль, в котором металл распределяется по сечению примерно соответственно готовому профилю. При последующих проходах стремятся получить окончательный профиль постепенным деформированием с одинаковым обжатием всех частей сечения. Такая схема деформации основана на следующем:

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

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

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

Одним из методов определения режима обжатий является использование опыта работы при прокатке профилей какого-либо одного типа на различных прокатных станах. В работе [2] изложена методика калибровки по типовой схеме полосовых профилей с круглыми утолщениями по краям, основанная на обобщении режимов прокатки в производственных условиях.

Интервалы изменения по проходам коэффициентов обжатия полот-

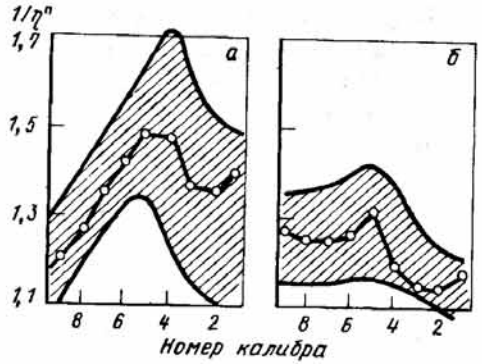


Рис. 51. Графики изменения коэффициентов обжатия полотна $1/\eta^{п}$ (*а*) и головок $1/\eta^{г}$ (*б*) при прокатке профилей для дверных петель автомобилей

на $1/\eta_{г.п}$ (рис. 51, *а*) и головок $1/\eta_{г}$ (рис. 51, *б*) получены на основании данных более сорока различных отечественных и зарубежных заводских калибровок. Диапазон применяемых коэффициентов на рис. 51 показан штриховкой. Усредненные значения коэффициентов выделены жирными линиями. Нумерация калибров принята по ходу прокатки.

Методики, аналогичные только что рассмотренной, часто используются на практике и могут быть рекомендованы как для действующих, так и для вновь строящихся прокатных станов.

Н. Мец рекомендует два метода определения толщин полосы по проходам на основе пропорциональности проектируемого режима обжатий и эталонного (оптимального) для данного стана при одинаковом числе проходов.

Первый метод Меца

Известны размеры последнего калибра и размеры первого, или исходной заготовки, а также отношение толщины исходной заготовки к толщине полосы в чистовом калибре, которое представляет собой произведение всех коэффициентов обжатия:

$$\frac{\text{исходная заготовка}}{\text{чистовой калибр}} = \frac{1}{\eta_1'} \cdot \frac{1}{\eta_2'} \cdot \frac{1}{\eta_3'} \cdots \frac{1}{\eta_n'}.$$

Если взять серию коэффициентов, называемых основными коэффициентами, объединенную сходством профилей, экономично прокатываемых на одном стане, число проходов которых соответствует калибровке, подлежащей расчету, то можно легко определить серию коэффициентов, соответствующих отношению начальной и конечной толщин.

Пусть $1/\eta_1$, $1/\eta_2$, $1/\eta_3$, ..., $1/\eta_n$ будет серия основных коэффициентов, а K — их произведение:

$$K = \frac{1}{\eta_1} \cdot \frac{1}{\eta_2} \cdot \frac{1}{\eta_3} \cdots \frac{1}{\eta_n}.$$

Если обозначим отношение начальная толщина/конечная толщина = $= P$, то при $K = P$ серию коэффициентов надо принять без изменения; если же $K \neq P$, то все коэффициенты надо умножить на величину

$\sqrt{P/K} = c$,

и серия действительных коэффициентов будет

$$c\,\frac{1}{\eta_1}\;c\,\frac{1}{\eta_2}\;c\,\frac{1}{\eta_3}\cdots c\,\frac{1}{\eta_n}.$$

Пример. Для калибровки в три прохода соотношение толщины:

$$\frac{\text{начальная толщина}}{\text{конечная толщина}} = \frac{40}{10} = 4{,}00.$$

Серия допустимых основных коэффициентов

$1/\eta_1' = 1{,}4;\quad 1/\eta_2' = 1{,}3;\quad 1/\eta_3' = 1{,}2.$

Их произведение равно $1{,}40 \cdot 1{,}30 \cdot 1{,}20 = 2{,}18$.

Поправочный коэффициент серии коэффициентов равен

$\sqrt{4{,}00/2{,}18} = 1{,}224.$

Серия фактических коэффициентов следующая:

$1/\eta_1 = 1{,}4 \cdot 1{,}224 = 1{,}72;\quad 1/\eta_2 = 1{,}3 \cdot 1{,}224 = 1{,}59;\quad 1/\eta_3 = 1{,}2 \cdot 1{,}224 = 1{,}46.$

Толщина калибров $h_1 = 10$ мм; $h_2 = 10 \cdot 1{,}46 = 14{,}6$ мм; $h_3 = 14{,}6 \cdot 1{,}59 = 23{,}21$ мм.

Толщина заготовки $H_0 = 23{,}21 \cdot 1{,}72 = 40$ мм.

Второй метод Меца

Для того, чтобы линейное обжатие от одного калибра к другому было пропорционально обжатиям некоторой известной уже калибровки, находим сначала разницу между начальной и конечной толщинами и делим эту разницу на части, пропорциональные линейным обжатиям в каждом проходе, принятом в эталонной калибровке. Следовательно, решение проблемы заключается в делении аналитически или графически некоторого определенного числа на части, пропорциональные другим известным числам.

Можно взять серию коэффициентов и разделить разницу между первоначальной и конечной толщинами на части, пропорциональные разности произведений этих коэффициентов, которые являются основными.

Пример. Для прокатки исходной заготовки толщиной 21,82 мм до конечной толщины 10 мм предложена калибровка (эталонная) с линейными обжатиями по проходам 6,22; 3,60; 2,0 мм с суммарным обжатием 11,82 мм.

Калибр.	Чистовой	Черновые	
Номер калибра	3	2	1
Линейное обжатие, мм	2,0	3,60	6,22
Толщина после прохода, мм	10	12	15,6
Коэффициенты обжатия, h_1/h_2	1,20	1,30	1,40

Необходимо вычислить толщины в том же числе калибров для начальной толщины 40 мм и конечной 10 мм, суммарное обжатие 40 – 10 = 30 мм надо разделить пропорционально калибровке, принятой за образец (эталон), т.е. 2; 3,60; 6,22; коэффициент пропорциональности 30 : 11,82 = 2,538

Калибр.	3	2	1
Линейное обжатие, мм	2·2,538 = 5,07	3,6·2,538 = 9,13	6,22·2,538 = 15,78
Толщина, мм	10	15,07	24,22
Коэффициент обжатия, h_1/h_2	1,507	1,610	1,652

Глава 2.

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ И КАЛИБРОВКИ

1. Сущность оптимизации в прокатном производстве

В работах по исследованию процессов прокатки можно выделить три основных направления [9]:

1. Изучение традиционных для теории прокатки вопросов о формоизменении и энергосиловых затратах в отдельных процессах прокатки, а также условий осуществимости этих процессов.

2. Изучение локальных эффектов в очаге деформации, нацеленное на повышение качества прокатной продукции.

3. Исследование операций в прокатном производстве, т.е. изучение функционирования прокатных комплексов как единых технологических систем.

После определения основных направлений необходимо рассмотреть в первом приближении главные этапы постановки проблемы при исследовании операций:

1. Предполагается, что исследователь знаком с объектом оптимизации, т.е. знаком со "средствами своими", которыми желает "распорядиться" так, чтобы достичь, по выражению П.Л. Чебышева, "по возможности большей выгоды". Здесь возникает первый важный вопрос, решение которого в значительной степени предопределяет характер и содержание всего исследования, – что считать "выгодой", т.е. как оценить эффективность функционирования объекта оптимизации, что принять за критерий оптимальности? Здесь на переднем плане оказывается понимание общих целей исследования и знание конкретной производственной обстановки.

2. После того, как критерий оптимальности выбран, возникает вторая задача – выявление тех условий, при которых исследователь должен получить не наибольшую, а по возможности большую выгоду. Эти условия – совокупность ограничений (уравнений связи и краевых условий), накладываемых на исследуемый процесс конкретными особенностями технологии и организации производства, а также взаимоотношениями исследуемой системы с "внешней средой", т.е. с другими системами.

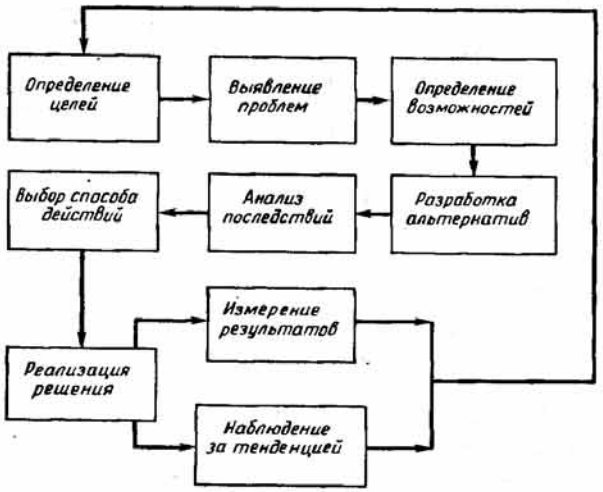


Рис. 52. Схема цикла оптимизации

Для решения второй задачи необходимо построить математическую модель исследуемого процесса, т.е. найти те уравнения, которые выражают связи, действующие внутри системы, и ограничения, накладываемые на действия этих соотношений. Математическая модель должна быть адекватна исследуемой системе, т.е. должна содержать характеристики системы, которые существенно отражаются на выбранном критерии оптимальности, и учитывать те связи, которые ощутимо сужают область существования этого критерия. Построение математической модели – наиболее важная и ответственная часть исследования, требующая глубоких знаний, и не столько в математике, сколько в существе моделирующих явлений.

3. Когда критерий оптимальности выбран и математическая модель системы построена (четко установлены "средства свои" и ясен смысл "по возможности большей выгоды"), задача оптимизации предстает перед исследователем во всем своем объеме: "как располагать средствами своими для достижения по возможности большей выгоды?" Здесь в действие вступает математический аппарат теории исследования операций, ее разнообразные методы, выбор которых зависит от конкретного содержания рассматриваемой проблемы оптимизации. Задача оптимизации при этом может быть сформулирована следующим образом:

известен (уже выбран) критерий эффективности системы, включающий в себя управляемые и неуправляемые параметры системы;

известна (уже построена) математическая модель, учитывающая основные особенности ("механизм") исследуемой системы, значения неуправляемых параметров и ограничения на управляемые параметры системы;

требуется найти также значения управляемых параметров, которые

при заданных ограничениях обеспечивают экстремальное значение критерия эффективности системы.

Примерная схема цикла оптимизации представлена на рис. 52.

2. Задачи оптимизации калибровки прокатных валков

На практике разработка калибровки прокатных валков даже тогда, когда сортамент стана не очень широк, отнимает, как правило, много труда и требует всестороннего изучения большого числа всевозможных материалов. Иногда одновременно разрабатывают несколько вариантов калибровки, чтобы последовательными испытаниями установить лучший из них.

Работа над калибровкой не заканчивается получением правильного профиля. В процессе работы стана необходимо систематически искать новые возможности для дальнейшего улучшения калибровки.

Основные правила, сформулированные З. Вусатовским, которыми руководствуются калибровщики состоят в том, что при калибровке валков главное внимание обращают на подбор соответствующих форм отдельных калибров, чтобы получить правильный профиль при возможно минимальной затрате труда и максимальной производительности. Проектирующий калибровку старается подбирать такие промежуточные калибры, которые обеспечивают хорошее заполнение их металлом и получение проката без поверхностных дефектов. По мнению З. Вусатовского, правильная калибровка должна в большей степени, чем до сих пор, учитывать технологические факторы, что способствует получению проката хорошего качества.

Р. Бейнон писал, что если просмотреть графики практических схем обжатий, то может показаться, что руководством для их составления чаще служат исключения, чем правила, т.е. не существует какого-либо шаблона для выбора режима обжатий. Действительно, если постепенное уменьшение абсолютного обжатия по ходу прокатки типично для калибровки большинства профилей, то относительное обжатие редко меняется по определенному правилу. В целом же заводские калибровки приходится разрабатывать с учетом многочисленных факторов, и поэтому невозможно использовать какой-либо единый четко сформулированный принцип распределения обжатий. Однако поиск теоретических принципов распределения обжатий не бесполезен, если он производится применительно к станам конкретных типов и применительно к схемам прокатки конкретных профилей.

И.М. Павлов и М.Л. Зайцев предложили методику сопоставления калибровок валков по эффективности деформации. Определение коэффициентов деформации в виде соотношений, включающих площади исходного и конечного сечений, а также площадь, смещенную за проход, позволяет как полагают авторы, сопоставлять результаты деформации в калибрах любой формы. В качестве критерия эффективности деформации может быть использовано отношение объема, смещенного в продольном направлении, к объему, смещенному по высоте.

Во многих исследованиях по калибровке рекомендуют рациональные схемы прокатки простых и сложных профилей, предлагают методы определения деформаций и энергосиловых параметров, рассматривают расчеты режимов обжатий и технологические приемы, обеспечивающие высокое качество проката, низкий износ прокатных валков, устойчивость профиля и др., предлагают правила построения калибров и т.д. В качестве совершенных схем прокатки можно назвать прокатку швеллеров по методу сгибания.

В последние годы предприняты попытки использовать для расчетов калибровки электронные вычислительные машины, при этом обычно указывают, что на ЭВМ можно быстро провести расчет нескольких вариантов калибровки и выбрать оптимальный вариант, обеспечивающий плавное формоизменение металла и, как следствие, устойчивость процесса прокатки швеллеров [12].

К сожалению, задачу обеспечения минимальных затрат труда и максимальной производительности стана обычно рассматривают без учета конкретных особенностей стана и в лучшем случае сводят к выбору режима обжатий по проходам или к распределению проходов по клетям для уже разработанной калибровки. Дальнейшее улучшение уже спроектированной калибровки в процессе работы стана редко приводит к ее принципиальному изменению, хотя и представляет собой направленный процесс поиска оптимального варианта. Улучшение калибровки происходит медленно, так как многие возможные способы преобразования исходного сечения в готовый профиль остаются невыявленными и не рассматриваются. В то же время бурное развитие математических методов исследования сложных систем и использование ЭВМ дают возможность разработать надежный метод калибровки сортовых профилей.

Задачу разработки оптимальной калибровки прокатных валков сформулировали в терминах теории управления [11]. Во-первых, такая формулировка в данном случае весьма удобна и, во-вторых, позволяет еще раз подчеркнуть, что задачи оптимизации прокатного производства поддаются математическому истолкованию с разнообразных точек зрения.

Процесс прокатки состоит из ряда связанных между собой ступеней преобразования исходной заготовки в конечный профиль и является управляемым процессом.

В соответствии с данными работы [9] состояние объекта на ступени i определяется r числами $x_i^{(1)}, x_i^{(2)}, \ldots, x_i^{(r)}$, которые называются фазовыми координатами объекта и могут изменяться, т.е. являются переменными величинами.

Переход управляемого объекта из одного состояния в другое может быть осуществлен различными способами, поэтому возникает вопрос о выборе такого пути (в нашем случае пути преобразования заготовки в готовый профиль), который может оказаться наиболее выгодным.

Оптимальный путь можно найти, так как преобразования объекта происходят не самопроизвольно — ими можно управлять, изменяя

управляющие параметры $m_i^{(1)}, m_i^{(2)}, \ldots, m_i^{(s)}$, которые удобно считать координатами вектора. Точно так же величины $x_i^{(1)}, x_i^{(2)}, \ldots, x_i^{(r)}$ удобно рассматривать как координаты некоторого вектора (или точки) $x_i\,(x_i^{(1)}, x_i^{(2)}, \ldots, x_i^{(r)})$. Эту точку и называют фазовым состоянием ступени (или объекта). Каждое фазовое состояние является точкой r-мерного пространства (фазового пространства рассматриваемой ступени) с координатами $x_i^{(1)}, x_i^{(2)}, \ldots, x_i^{(r)}$.

Обычно управляющие параметры $m_i^{(1)}, m_i^{(2)}, \ldots, m_i^{(s)}$ не могут принимать совершенно произвольные значения, а подчинены некоторым ограничениям (при прокатке ограничения связаны с размерами заготовки, готового профиля, с условиями деформации, с конструктивными особенностями стана и вспомогательных механизмов). В дальнейшем будем полагать, что для i-той ступени система ограничений может быть определена следующим образом:

$$\underline{C}_i^{(1)} \leqslant m_i^{(1)} \leqslant \overline{C}_i^{(1)};$$

$$\underline{C}_i^{(2)} \leqslant m_i^{(2)} \leqslant \overline{C}_i^{(2)};$$

$$\cdots\cdots\cdots\cdots$$

$$\underline{C}_i^{(s)} \leqslant m_i^{(s)} \leqslant \overline{C}_i^{(s)},$$

где $\underline{C}_i^{(s)}$ и $\overline{C}_i^{(s)}$ — нижняя и верхняя константы.

Из записи системы ограничений следует, что каждая из величин $m_i^{(1)}, m_i^{(2)}, \ldots, m_i^{(s)}$ представляет собой отдельный управляющий параметр, область изменения которого не зависит от значений остальных управляющих параметров.

Если в соответствии с конструкцией объекта и условиями его эксплуатации для каждой ступени задано в пространстве переменных $m_i^{(1)}, m_i^{(2)}, \ldots, m_i^{(s)}$ некоторое множество M_i возможных значений, то разрешается рассматривать лишь управления вида $m_i \in M_i$. Множество M_i называют областью управления на i-той ступени.

При переходе от одной ступени к другой можно мгновенно (скачком) изменять значения управляющих параметров $m_i^{(1)}, m_i^{(2)}, \ldots, m_i^{(s)}$. Поиск оптимального решения такой задачи методом простого перебора невозможен из-за необходимости рассматривать столь большое число вариантов. Это оказывается непосильным даже для современных быстродействующих вычислительных машин. Поэтому для сокращения объема вычислений приходится использовать специальные численные методы, например метод динамического программирования. При этом оказывается весьма полезным опыт калибровщика, позволяющий наметить правильную стратегию с последующим ее улучшением в процессе решения и ввести более жесткую систему ограничений.

Разработку калибровки валков для прокатки профиля на действующем сортовом стане следует начинать с выбора схемы прокатки. Размеры и конфигурация готового профиля заданы и обычно известны

сечения заготовок, поступающих с блюминга или заготовочного стана. Таким образом, приходится рассматривать задачу с закрепленными концами и только в исключительно редких случаях вводить дополнительный типоразмер заготовки. Но тогда уже следует рассматривать вопрос об оптимизации прокатного комплекса, например комплекса заготовочный стан – среднесортный стан.

При выборе схемы прокатки целесообразно разработать не одну, а несколько схем и после расчета оптимальных вариантов калибровки провести сравнение. Для каждой схемы прокатки намечают конфигурацию фасонных и вытяжных калибров и основные размеры калибров. Размеры чистового калибра определяют по размерам готового профиля с учетом допускаемых отклонений и температуры конца прокатки.

Для станов, работающих по принципу "в каждой клети – один проход", размещение калибров определяют самим типом стана, т.е. на валках отдельной клети располагают только идентичные калибры (при этом в большинстве случаев нет смысла для прокатки каких-либо профилей использовать не все клети стана). При прокатке на трехвалковых станах (рельсобалочных, крупносортных и среднесортных) возможно расположение различного числа калибров в отдельных клетях и только в чистовой клети обычно осуществляют один проход. Поэтому здесь необходимо наметить возможные варианты размещения калибров и в процессе решения выбрать из них наилучший. Аналогично решается вопрос совмещения проходов.

Для определения числа дублирующих калибров необходимо иметь данные по их износу в зависимости от условий прокатки и таблицы времени, затрачиваемого на смену валков той или иной клети

Длина полосы $L_{1N} + \Delta L_{1N}$ после чистового калибра с целью снижения обрези ΔL_{1N} и соответственно уменьшения расходного коэффициента металла должна быть близка к максимально допустимой длине L_{max}, которую определяют, исходя из характеристик отводящего рольганга, холодильника, удобства резки и пр., и в то же время она должна быть кратной заданной мерной длине $L_м$ готового профиля:

$$L_{1N} + \Delta L_{1N} = KL_м + \Delta L_{1N} \leqslant L_{max}, \qquad (25)$$

где $K = E[(L_{max} - \Delta L_{1N})/L_м]$,

или $E[(L_{max} - \Delta L_{1N})/L_м] - 1$, или 1,

причем E означает целую часть числа, стоящего в круглых скобках.

Длина полосы L_j после j-того калибра ограничивается длиной $[L_j]$ раскатных полей, передающих устройств и подъемно-качающихся столов $L_j \leqslant [L_j]$.

Длину заготовки $L_{заг}$ предопределяют конструктивными особенностями заготовочного стана и нагревательных устройств сортового стана.

Следующим этапом построения математической модели является

определение для каждого калибра диапазонов изменения параметров, характеризующих форму очага деформации. К геометрическим параметрам относятся коэффициенты обжатия различных частей профиля $1/\eta_{1j}$, $1/\eta_{2j}$, $1/\eta_{3j}$, ..., углы раскрытия полок γ_j и другие параметры, специфические для каждого профиля.

Допустимые обжатия определяют с учетом износа валков, температурных условий, материала валков, условий захвата полосы валками, точности прокатки и др. Итогом этого этапа работы над математической моделью является система ограничений типа управляющих параметров, записанная только для геометрических параметров.

Для станов с регулированием скорости дополнительно вводят ограничения по частоте вращения валков. Средний диаметр валков для данного стана обычно принимают минимально допустимым. Материал валков: сталь или чугун с известными характеристиками; размеры валков строго определены.

Механические характеристики металла в j-том проходе определяют по имеющимся зависимостям или графикам. Графики предварительно аппроксимируют формулами.

Неизвестные фазовые координаты j-того калибра: коэффициент вытяжки λ_j, суммарный крутящий момент M_j, усилие прокатки P_j, отношение крутящих моментов на нижнем и верхнем валках M_{1j}/M_{2j} и пр. должны быть представлены в виде функций от параметров $m_j^{(1)}$, $m_j^{(2)}$, ..., $m_j^{(s)}$, а именно:

$$\left.\begin{aligned} \lambda_j &= \lambda_j(m_j^{(1)}, m_j^{(2)}, \ldots, m_j^{(s)}); \\ M_j &= M_j(m_j^{(1)}, m_j^{(2)}, \ldots, m_j^{(s)}); \\ P_j &= P_j(m_j^{(1)}, m_j^{(2)}, \ldots, m_j^{(s)}); \\ &\ldots\ldots\ldots\ldots \end{aligned}\right\} \qquad (26)$$

Анализ различных способов построения калибров и методов расчета фазовых координат (26) показывает, что число проходов N является следующей функцией параметров управления:

$$N = N(m_1^{(1)}, m_1^{(2)}, \ldots, m_1^{(s)}, \ldots, m_n^{(1)}, m_n^{(2)}, \ldots, m_n^{(s)}). \qquad (27)$$

Дополнительные ограничения на параметры управления и на фазовые координаты определяются характеристиками основного и вспомогательного оборудования. Методы расчета валков на прочность и усталость известны по литературе.

При построении математической модели сортовой прокатки важно знать износостойкость материала валков. Существуют понятия абсолютной и относительной износостойкости. Относительная износостойкость показывает, насколько долго данный материал сопротивляется износу по сравнению с другим, принятым за эталон. Сравнение во всех случаях должно проводиться относительно одного и того же материала при одинаковых условиях испытания, при одинаковых технологических параметрах и твердости. За эталон целесообразно принимать

сталь 55Х, которую наиболее часто используют для валков рельсобалочных и крупносортных станов.

Ограничение по допустимому превышению номинального крутящего момента с электродвигателем стана $M_{дв.ном}$ при постоянной скорости прокатки во время прохода металла через валки записывается в виде $M_{дв.пик} \leqslant K_п M_{дв.ном}$, где $K_п$ – коэффициент допустимой перегрузки двигателя; $M_{дв.пик}$ – пиковый момент на валу двигателя.

Кроме того, необходимо проверить двигатель на нагрев по среднеквадратичному моменту за время одного цикла

$$M_{кв} = \sqrt{\Sigma\,(M^2_{дв}\, t_м + M^2_{х.х}\, t_п)/\Sigma\,(t_м + t_р)},$$

$$M_{кв} \leqslant M_{дв.ном}, \qquad (28)$$

где $t_м$ – затраты машинного времени на отдельных характерных участках скоростной диаграммы двигателя при соответствующем моменте на валу двигателя; $M_{х.х}$ – момент холостого хода, приведенный к валу двигателя; $t_п$ – длительность пауз.

Знак Σ означает суммирование по всем характерным участкам скоростной диаграммы, образующим цикл прокатки.

Если приходится дополнительно проверять основное и вспомогательное оборудование (это имеет место, когда параметры проектируемого режима значительно отличаются от принятых на данном стане), то используют методы расчета оборудования на прочность.

В дальнейшем задача оптимизации сводится к определению таких значений управляющих параметров, которые обеспечивают экстремум критерия оптимальности.

В качестве критериев оптимальности при разработке оптимальной калибровки может быть принят один из следующих критериев: производительность; расход энергии при заданной производительности; себестоимость или прибыль; критерий качества проката. Иногда целесообразно принимать в качестве целевой функции иные критерии.

В отдельных случаях задача оптимизации калибровки может быть сведена к распределению коэффициентов вытяжки между проходами. При распределении вытяжек следует иметь в виду, что концентрация вытяжек в начале цикла прокатки ведет к быстрому нарастанию длин раската и к увеличению суммарной длины его во всем цикле прокатки в целом. При постоянной скорости прокатки следствием указанного распределения вытяжек является увеличение машинного времени.

Формулируя требования к калибровке прокатных валков, многие авторы обращают внимание на решение технологических задач: получения заданного профиля высокого качества, максимальной простоты настройки стана, наибольшей универсальности схемы калибровки. Однако большинство исследователей, занимающихся вопросами калибровки, считают, что одним из важнейших требований к калибровке является обеспечение высокой производительности стана при заданных требованиях к качеству проката.

Оптимальным распределением обжатий по проходам (коэффициентов вытяжки) с точки зрения производительности стана будет такое, при котором обеспечивается минимальная длительность прокатки, т.е. минимальный такт.

Часто обжатия или вытяжки по проходам распределяют эмпирически в одних случаях более, в других менее удачно. Между тем величиной вытяжки в каждом проходе можно варьировать в определенных пределах, и эти пределы можно использовать для некоторого регулирования длины раската, а следовательно, и машинного времени прокатки.

Хотя и делаются попытки расчетов оптимальных калибровок [10], однако их пока все-таки немного. Кроме того, и это главное, основные трудности возникают с формулировкой критерия оптимальности. Такое впечатление, что сформулированные выше критерии не являются верными, так как сама постановка задачи не совсем правильна. По мнению авторов, объектом оптимизации должен являться хозрасчетный участок, и калибровка должна входить в качестве составной части. Таким образом, выделение калибровки в объект оптимизации нуждается в серьезном обосновании.

3. Расчет калибровки на ЭВМ

Расчет калибровок фасонных профилей на ЭВМ пока еще не получил широкого распространения. Это связано с тем, что каждый или почти каждый калибровщик имеет свои излюбленные методы и приемы, которыми он всегда старается пользоваться.

Отдельные институты (например, УкрНИИмет, УПИ, МИСиС и ДонНИИчермет) довольно много занимаются системами автоматического проектирования калибровок. Расчеты на ЭВМ могут быть важны [10] при расчетах оптимальных калибровок. Но опять же при этом очень трудно сформулировать подлежащую оптимизации целевую функцию. Создание систем автоматизированного проектирования технологических процессов прокатки на базе современных ЭВМ является весьма трудоемким и сложным процессом. Основные трудности состоят в создании математической модели прокатки в фасонных калибрах, формализации целей и критериев проектирования, а также многих практических приемов калибровщиков. Вследствие сложности решения такой задачи оптимизации технологии целесообразно применять диалоговые системы оптимизации на основе различных эвристических приемов для решения не полностью формализованных задач.

Работая на ЭВМ в диалоговом режиме, инженер-проектировщик может быстро получать сведения о результатах расчета, оценивать их и при необходимости оперативно вносить коррективы в исходную информацию, а также управлять ходом расчета, исходя из своих знаний, практического опыта и интуиции. Диалоговый режим позволяет наиболее эффективно распределить функции между человеком и машиной на основе взаимного дополнения и использования преимуществ каждого из партнеров.

В УкрНИИмете разработана автоматизированная система проектирования технологии прокатки фасонных профилей, состоящая из ЭВМ, графического дисплея с функциональной клавиатурой и графопостроителя, алфавитно-цифрового печатающего устройства, а также библиотеки стандартных программ и математического обеспечения диалога человек – машина.

С помощью этой системы можно спроектировать оптимальную калибровку

профиля, затем рассчитать комплекс технологических параметров прокатки и автоматизировать подготовку технологической документации.

Для расчета калибровки с выводом графического изображения калибров на экране дисплея используют два различных способа кодирования и преобразования геометрической информации:

кодирование линейных размеров элементов профиля (калибра) и радиусов сопряжения;

кодирование координат базовых точек калибра, т.е. вершин многоугольника, описывающего контур поперечного сечения профиля (калибра) и скругляющих их радиусов.

Так как полностью формализовать расчет калибровки фасонных профилей не удается, то рекомендуется процесс проектирования калибровки разделить на два этапа – автоматического и ручного режимов расчета.

На первом этапе выполняется та часть расчета, которая формализована и полностью описана в алгоритме. На втором этапе калибровка "доводится" вручную путем оценки и корректировки результатов расчета в той части алгоритма, которая либо вообще не формализована, либо формализована недостаточно. Расчет калибров ведется последовательно от чистового до разрезного (формирующего). В автоматическом режиме определяются также и размеры исходной заготовки. После расчета очередного калибра на экране дисплея высвечивается его геометрическое изображение и соответствующие расчетные параметры. Оператор предварительно оценивает правильность выбранной схемы прокатки и режима деформации. При положительной оценке расчет продолжается, при отрицательной оператор с пульта ЭВМ или дисплея изменяет исходную информацию и расчет начинается сначала. В автоматическом режиме предусмотрена возможность всестороннего изменения калибровки.

Если результаты расчета калибровки в автоматическом режиме в общем удовлетворительны, то при необходимости делается ее "доводка" в ручном режиме. Здесь изменения касаются только одного рабочего калибра. В оперативной памяти ЭВМ одновременно хранится информация о трех калибрах – эталонном, рабочем и корректируемом. Эталонный калибр в процессе работы не изменяется и предназначен только для сравнительных оценок. В рабочем калибре происходят изменения геометрических характеристик, коэффициентов деформации и вытяжек, которые связаны с эталонным калибром. В корректируемом калибре происходит изменение только коэффициентов деформаций и вытяжек.

При изменении какого-либо размера в рабочем калибре ЭВМ автоматически пересчитывает другие, взаимосвязанные с ним размеры, коэффициенты деформации и вытяжки. Все изменения контролируются визуально. На экран дисплея можно одновременно выводить два смежных калибра и совмещать их на "просвет" для оценки правильности входа раската в калибр, центрирование раската валками, уширение и т.д. Расчет температурно-скоростных, энергосиловых и других технологических параметров прокатки ведется по специальной программе после определения размеров всех калибров. Программа является универсальной и используется для расчета параметров прокатки различных станов с различным составом и расположением оборудования.

Универсальность программы достигается использованием матричного способа описания исходной информации.

Разработанная система автоматизированного проектирования технологического процесса прокатки реализована на современных ЭВМ с графическим дисплеем "Интограф-2" и графопостроителем "Дигиграф". По этой системе были рассчитаны калибровки на стане 250 Нижнесергинского металлургического завода и стане 600 Коммунарского металлургического комбината.

4. Математическое моделирование технологического процесса стана 370

Процесс прокатки состоит из ряда связанных между собой единичных операций, каждая из которых представляет собой этап превращения заготовки (или слитка) в готовый профиль. На каждом из этапов затрачивается определенное количество средств. Естественно построить цепочку превращений таким образом и так ею управлять, чтобы можно было получить максимально возможный полезный выход от процесса в целом без существенного увеличения затрат.

Рассмотрим задачу оптимизации технологии рессорного стана 370 (рис. 53). Для определения параметров управления, соответствующих экстремальному значению выбранной функции цели (резерв времени после выполнения годового плана в заданном сортаменте), необходимо построить математическую модель процесса.

Расположение основного и вспомогательного оборудования стана приведено на рис. 53. Агрегаты стана пронумерованы против хода прокатки. Во всех формулах, используемых ниже, индексы j и k обозначают номер профиля и номер агрегата соответственно.

Функцию цели запишем в виде

$$T^* = \max\left[T - \sum_{m=1}^{M} t_{м} - \sum_{j=1}^{J} \frac{Q_j}{П_j}\right], \qquad (29)$$

где T^* – резерв времени за год, остающийся после выполнения государственного плана, ч; T – годовое календарное время, ч; $t_{м}$ – время j-того простоя стана, ч; M – число часов простоев стана за год; Q_j –

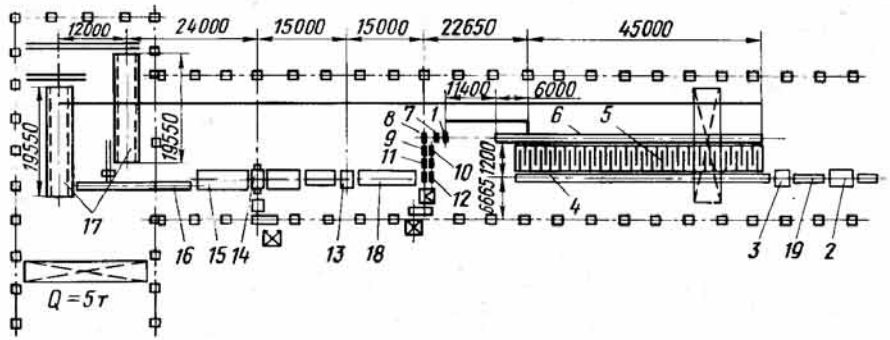


Рис. 53. Расположение основного и вспомогательного оборудования рессорного стана 370:

1 – чистовая клеть; *2* – правильная машина; *3* – ножницы холодной резки; *4* – отводящий рольганг холодильника; *5* – холодильник; *6* – подводящий рольганг холодильника; *7* – предчистовая клеть; *8–12* – рабочие клети черновой линии; *13* – ножницы горячей резки; *14* – обжимная клеть; *15* – подводящий рольганг обжимной клети; *16* – печной рольганг; *17* – нагревательные печи; *18* – рольганг за ножницами горячей резки; *19* – рольганг перед правильной машиной

годовое плановое число j-того профиля, т; Π_j – производительность стана при прокатке j-того профиля, т/ч; J – число профилей проката в годовой программе.

При заданном Q_j максимизация функции цели (29) осуществляется уменьшением времени простоев, вызванных поломками и сменой изношенных калибров, и повышением производительности Π_j стана. Устранение поломок может быть достигнуто рациональным выбором режимов обжатий полосы по проходам, обеспечивающих необходимые запасы прочности силовым узлам агрегатов стана.

Максимальная производительность $\Pi_{j\,max}$ стана имеет ограничение вида

$$\Pi_{j\,max} \leqslant \min(\Pi_{j\,1}, \Pi_{j\,2}, \dots, \Pi_{j\,k}, \dots, \Pi_{j\,K}), \qquad (30)$$

где $\Pi_{j\,k}$ – производительность j-того агрегата стана (согласно рис. 53 $K = 19$) при прокатке j-того профиля.

Выражая $\Pi_{j\,k}$ через геометрические параметры и кинематические характеристики k-того агрегата, получим:

1. Часовая производительность правильной машины

$$\Pi_{j\,k} = 3600\,\frac{k_{j\,2} g_j v_{j\,2} p_j}{g_j + v_{j\,2} p_j n_j t_{pj2}},$$

где $k_{j\,2}$ – число полос, одновременно подвергаемых правке или резке, j-того профиля; g_j – масса заготовки, т; $v_{j\,2}$ – скорость правки, м/с; p_j – масса 1 м длины готового профиля, т; $n_j = n'_j n''_j$, n'_j, n''_j – число полос j-того профиля, получающееся после резки одной полосы на ножницах горячей и холодной резки соответственно; $t_{pj\,2}$ – время паузы между отдельными наборами полос, с.

2. Часовая производительность ножниц холодной резки

$$\Pi_{j\,3} = 3600\,\frac{k_{j\,1} g_j}{t_{мj\,3} k_{j\,3} + t_{pj\,3}},$$

где $t_{мj\,3}$ – время одного реза, с; $k_{j\,3}$ – число резов при резке набора полос j-того профиля с учетом отрезки обрези; $t_{pj\,3}$ – время паузы, с.

3. Часовая производительность отводящего рольганга холодильника

$$\Pi_{j\,4} = 3600\,\frac{k_{j\,1} g_j}{\sum_{f=1}^{k_{j\,3}} (l^f_{j\,4}/v_{j\,4} + t_{pj\,4})},$$

где $l^f_{j\,4}$ – расстояние транспортировки при производстве одного реза, м; $v_{j\,4}$ – окружная скорость ролика рольганга, м/с; $t_{pj\,4}$ – время паузы между подачами набора для одного реза, с.

4. Часовая производительность холодильника

$$\Pi_{j\,5} = \frac{g_j}{t_{j\,5} + t_{pj\,5}}\,3600,$$

где $t_{j\,5}$ – время охлаждения полосы j-того профиля до температуры фазовых превращений, с; $t_{pj\,5}$ – временная пауза между полосами, поступающими на холодильник, с.

5. Часовая производительность косого рольганга холодильника

$$\Pi_{j\,6} = \frac{g_j v_{j\,6} \cos\alpha}{l_{j\,6}}\,3600,$$

где $v_{j\,6}$ – окружная скорость роликов, м/с; $l_{j\,6}$ – расстояние транспортировки полосы, м.

6. Часовая производительность клетей: чистовой, зджера, IV, III и II определяются по формуле

$$\Pi_{j\,r} = 3600\,\frac{g_j p_{jr} a_{jr} v_{jr}}{g_j + t_{pjr} p_{jr} a_{jr} v_{jr}} \quad (r = 1, 7, 8, 9, 10, 11),$$

где

$$a_{j\,r} = 1 + \frac{(D_{jr} - h_{jr})\,\Delta h_{jr}}{16\,D_r h_{jr}}\,\left(2 - \frac{1}{\varphi_{jr}}\sqrt{2\,\Delta h_{j\,r}/D_r}\right)^2,$$

a_{jr} – коэффициент опережения при прокатке j-того профиля в чистовой клети; v_{jr} – окружная скорость валков r-ной клети, м/с; p_{jr} – масса 1 м длины полосы, прокатываемой в r-ной клети, т; t_{pjr} – время паузы при прокатке j-того профиля в r-ной клети, с; D_{jr} – катающий диаметр валков r-ной клети, мм; h_{jr} – высота j-того профиля после r-ной клети, мм; Δh_{jr} – обжатие в r-ной клети, мм; φ_{jr} – угол трения в r-ной клети, рад;

$$\operatorname{tg}\varphi_{jr} = k_{jr}\,(1{,}05 - 0{,}0005\,\theta_{jr}),$$

k_{jr} – коэффициент, учитывающий материал валков; θ_{jr} – температура прокатки в r-ной клети для j-того профиля, °С.

7. Часовая производительность ножниц горячей резки

$$\Pi_{j\,13} = 3600\,\frac{g_j}{t_{мj\,13} k_{j\,13} + t_{pj\,13}},$$

где $t_{мj\,13}$ – время одного реза, с; $k_{j\,13}$ – число резов одной полосы; t_{pj13} – время паузы, с.

8. Часовая производительность клетей первой черновой линии и обжимной клети при прокатке с максимальным числом совмещенных проходов определяются по формуле

$$\Pi^r_{j\,e} = \frac{g_j}{\sum_{s=1}^{n^r_e}\left(\frac{f^e_0 L^e_0}{F^e_{nr}\bar{\lambda}^e_s v^e_{bs} a^e_{1s}} + t^e_{ps}\right) - \sum_{z=1}^{n^r_{1e}}\left(\frac{F^e_0 L^e_0}{F^e_{nr}\bar{\lambda}^e_z v^e_{bz} a^e_{1z}} + t^e_{pz}\right)}\,3600,$$

$$(e = 12, 14;\ r = \begin{cases} 1 & \text{при } e = 14, \\ 1, 2 & \text{при } e = 12 \end{cases}),$$

где n_e^r – число проходов в e-ной клети при r-ном режиме ($n_e^r = 3, 5, 7$); n_{1e}^r – число совмещенных проходов в e-ной клети при r-ном режиме ($n_{1e}^r = 2, 3, 4$); F_0^e, F_n^e – площади поперечных сечений полосы до и после прокатки в e-ной клети, мм^2; L_0^e – длина полосы на входе e-ной клети, м; v_{bs}^e, v_{bz}^e – окружные скорости валков e-ной клети в сечении по соответствующему (s-тому и z-тому) калибру, м/с;

$$\overline{\lambda}_s^e = \lambda_{n_e^r} \lambda_{n_{e-1}^r} \ldots \lambda_{s+1};$$

$\overline{\lambda}_s^e$ – коэффициент вытяжки за $n_e^r - s$ проходов, считая от n_e^r-ного; $\lambda_{n_e^r}, \lambda_{n_{e-1}^r}, \ldots, \lambda_{s+1}$ – коэффициент вытяжки в каждом из рассматриваемых калибров; t_{ps}, t_{pz} – время пауз в основном и совмещенном проходах, с.

9. Часовая производительность подводящего и печного рольгангов

$$\Pi_{j\,c} = 3600 \frac{g_j\, v_c}{l_c}, \quad (j = 15, 16),$$

где v_c – окружная скорость роликов c-ного рольганга, м/с; l_c – длина c-ного рольганга, м;

10. Часовая производительность двух нагревательных печей

$$\Pi_{j\,17} = 7200 \frac{g_j}{t_{м17} + t_{р17}},$$

где $t_{м17}$ – время нагрева одной заготовки до начальной температуры прокатки, с; $t_{р17}$ – время подачи одной заготовки j-того профиля в печь и транспортировки от печи до печного рольганга, с.

Алгоритм поиска оптимальных параметров построим следующим образом.

Управляющие параметры функционала (29) обозначим $\delta_1, \delta_2, \ldots, \delta_r, \ldots, \delta_R$. Варьируя параметр δ_r при фиксированных остальных $R - 1$ параметрах, ищем T^* при ограничении (30). Процесс повторяется R раз.

Распределим агрегаты стана на две группы:

а) агрегаты, повышение производительности которых невозможно без крупных капитальных затрат, например чистовая, черновая и обжимная клети, нагревательные печи, шестеренные клети и т.д.;

б) агрегаты, производительность которых может быть повышена с незначительными затратами, например правильная машина, холодильник и т.д.

При ограничении функции цели T^* производительностями $\Pi_{j\,\beta}$ ($\beta = \beta_1, \beta_2, \ldots$) агрегатов группы (*б*) увеличиваются $\Pi_{j\,\beta}$ в возможных пределах. Ограничения $\Pi_{j\,\alpha}$ ($\alpha = \alpha_1, \alpha_2, \ldots$) из группы (*а*) не изменяются.

Для данной модели расчет режима обжатий является составной частью технологического процесса стана 370 и подробно рассмотрен в работе [8].

По результатам оптимизации работы стана 370 могут быть сделаны следующие выводы:

1. Применение математического моделирования является весьма эффективным при решении многоэкстремальных задач.

2. Анализ полученных результатов решения подтверждает обоснованность выбора математической модели с точки зрения точности и простоты расчетных соотношений, образующих модель, что позволяет использовать эту модель для принятия других возможных перспективных решений, например при реконструкции стана 370.

3. Экспериментирование на модели показывает, что процент обрези концов рессорной полосы может быть выбран в качестве критерия оптимальности. В данной задаче годовой объем производства и процент обрези концов являются непротиворечивыми критериями оптимизации.

4. При реализации оптимального раскроя в существующих условиях (G = 1580 кг, длина холодильника L_5 = 45 м, ширина печи L_{17} = = 3,3 м) снижается процент обрези концов рессорной полосы от 4,1 до 3,93 % и увеличивается годовой объем производства на 7000 т, что составляет экономическую эффективность в размере 56,8 тыс. рублей в год.

5. Расширение нагревательной печи до 3,7 м и удлинение холодильника до 47 м при существующей массе слитка 1580 кг позволит получить при оптимальном раскрое увеличение годового объема производства на 13–14 тыс. т, что дает 140 тыс. руб. годового эффекта.

6. Оптимальным сочетанием массы слитка G, длины холодильника L_5 и ширины посадочного окна печи L_{17} является G = 1850 кг, $L_5 \geqslant$ $\geqslant$ 90 м, $L_{17} \geqslant$ 3,5 м, при котором годовой объем производства рессоры увеличивается до 277,5–282,5 тыс. т, процент обрези уменьшается до 2,63–2,7 %, годовой экономический эффект составляет 380,3–405,0 тыс. руб.

Глава 3.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ ПРИ ПРОКАТКЕ ФАСОННЫХ ПРОФИЛЕЙ

1. Факторы формы калибра, определяющие течение металла в очаге деформации

При прокатке фасонных профилей разнообразной конфигурации необходимо иметь общие инженерные методы расчета формоизменения, которые позволяют с достаточной для практики точностью определять необходимые коэффициенты деформации. Таким методом является приведение реального калибра к соответственному. Характеристику основных параметров калибра в очаге деформации, влияющих на формоизменение металла при прокатке фасонных профилей, целесообразно дать на примере калибров различного вида (рис. 54).

Общим признаком этих калибров является наличие выступов (гребней)

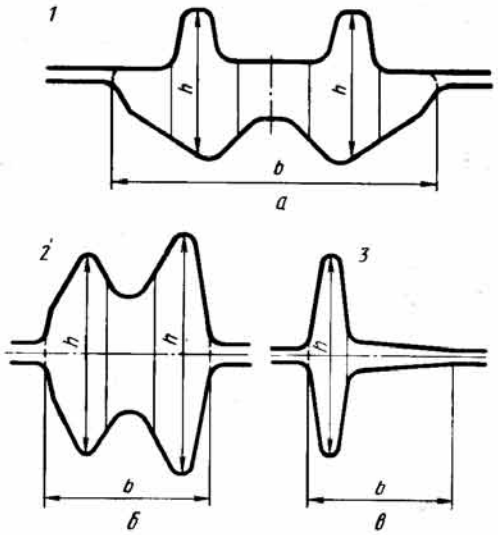


Рис. 54. Виды калибров для прокатки фасонных профилей: *а* – профиль для подкладки к рельсам; *б* – профиль с продольными пазами; *в* – тавровый профиль

и большой перепад высот по ширине калибра, что приводит к неравномерности деформации, характерной для профилей сложной формы. Можно считать, что основное влияние на формоизменение металла в фасонных калибрах оказывают следующие факторы: различие высот калибра по ширине, наклон стенок калибра, неравномерность обжатий по ширине.

При этом физико-механические и термодинамические параметры считаются постоянными величинами. В методах, применяемых в практике расчета калибровок, учитывается обычно влияние только некоторых из этих факторов. Так, например, метод соответственной полосы основан на использовании поправочных коэффициентов уширения для калибров с вогнутым или выпуклым периметром при усреднении других характеристик. В методе приведенной полосы также используются коэффициенты стеснения или вынужденного уширения. Так или иначе моделирование процесса прокатки в фасонных калибрах прокаткой на гладких валках имеет тот недостаток, что возникает необходимость введения и определения поправочных и различных вспомогательных коэффициентов, причем эта задача тем труднее, чем сложнее калибр. Следует избегать введения дополнительных коэффициентов или хотя бы уменьшить их число и упростить определение их значений. Поэтому целесообразно использовать в качестве модели для расчета формоизменения при прокатке фасонных профилей более подходящий калибр, который бы сохранил основные особенности, определяющие течение металла в исходном калибре. В этом смысле наиболее простую и приемлемую форму имеет калибр (профиль), состоящий из участков прямоугольной формы и называемый в дальнейшем соответственным.

Различие высот фасонного калибра по ширине и наклон стенок (рис. 54) отображаются различием высот участков соответственного калибра. Усредняются и моделируются неравномерность обжатия и необжимаемые участки фасонного профиля. По этим характеристикам выделяются четыре типа соответственных калибров (рис. 55). При этом форма каждого соответственного калибра может быть изменена путем удаления одного или нескольких участков. Относительные обжатия на участках могут варьироваться по отношению друг к другу, причем некоторые участки могут быть и необжимаемыми: например, прокатка в калибрах *1* и *2* (рис. 54) моделируется прокаткой в соответственном калибре рис. 55, *а*, а прокатка в калибре *3* (рис. 54) – прокаткой в соответственном калибре рис. 55, *б*.

Для реализации предложенного подхода необходимо решить две основные задачи: получить формулы и алгоритмы для расчета коэффициентов формоизменения в соответственных калибрах и разработать способы приведения реального калибра к соответственному виду.

Прокатка в соответственном калибре достаточно полно моделирует реальное формоизменение металла в фасонных калибрах, поэтому коэффициенты формо-

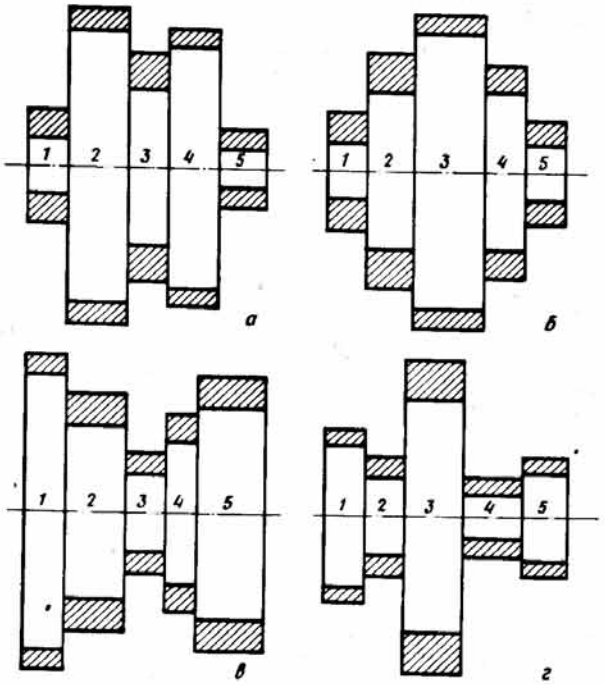


Рис. 55. Основные виды соответственных калибров (профилей)

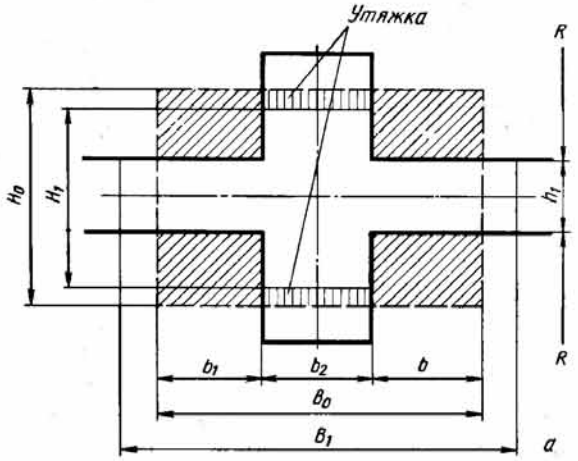
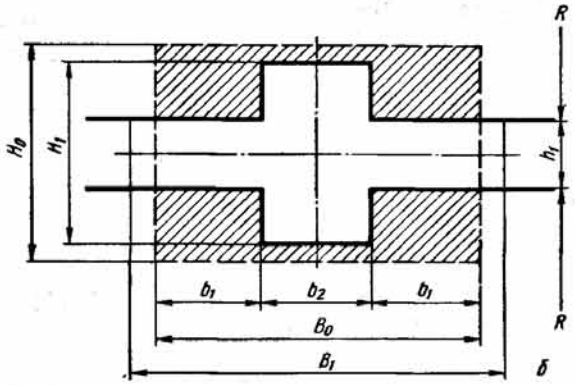


Рис. 56. Эталонные виды соответственных калибров (профилей): *а* – с обжатием только боковых частей; *б* – с неравномерным обжатием по ширине



Продолжение рис. 56

изменения, полученные данным методом, будут иметь более высокие точность и степень достоверности, чем коэффициенты, рассчитанные с помощью соответственных, приведенных полос и других подобных методик.

При экспериментальном определении формоизменения в соответственных калибрах (рис. 55) целесообразно провести их некоторое упрощение с целью практической возможности осуществления эксперимента в разумных объемах. Такое упрощение выполнено для калибра типа *2* (рис. 55, *б*) с учетом отсутствия боковых участков *1* и *5*. В калибрах (рис. 56), которые названы эталонными, основными параметрами являются обжатие и соотношение площадей обжимаемых и необжимаемых (или слабо обжимаемых) участков.

С учетом того, что, кроме определения коэффициентов формоизменения, по ходу прокатки требуется их расчет и против хода прокатки, возможны два способа перехода к соответственному калибру, применение каждого из которых зависит от постановки задачи.

2. Методы приведения фасонного калибра к соответственному

Рассмотрим методы приведения фасонного калибра к соответственному с использованием средних высот и приведения фасонного калибра к соответственному с использованием максимальных высот.

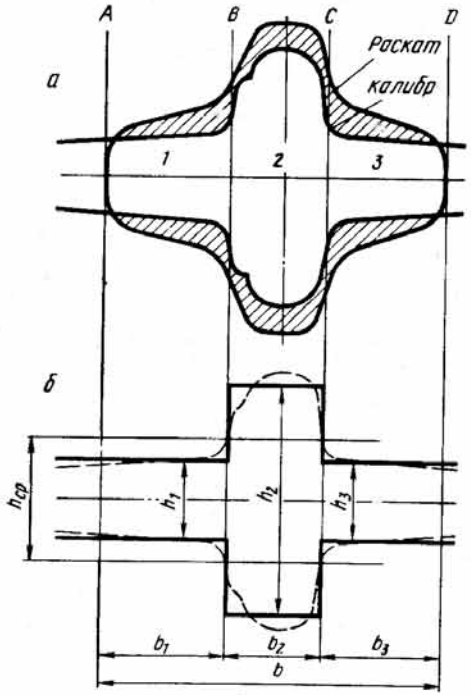
Метод приведения с использованием средних высот рассмотрим на примере чернового калибра для прокатки профиля оконных переплетов (рис. 57). При этом размеры калибра (рис. 57, *а*) и расстояние между осями валков заданы и известны размеры исходной заготовки, а следовательно, и обжатия по ширине полосы. При переходе от реального калибра к соответственному (рис. 57, *б*) делим реальный калибр вертикалями на участки, имеющие различные средние высоты. Соответственный калибр строится поэтапно следующим образом:

1. Находим ширину калибра, которая в рассматриваемом случае совпадает с шириной задаваемого раската и равна b.

2. Определяем среднюю высоту калибра $h_{ср}$ и делим калибр на участки *1*, *2* и *3* с высотами, большими или меньшими $h_{ср}$. Вертикали *A*, *B*, *C* и *D* служат границами участков.

3. Участки *1*, *2* и *3* фасонного калибра заменяются прямоугольниками одинаковых ширин b_1, b_2, b_3 и с высотами h_1, h_2, h_3, равными

Рис. 57. Черновой калибр для прокатки профиля оконных переплетов (*а*) и соответственный калибр (*б*)



средним высотам участков фасонного калибра. В результате получаем соответственный калибр, изображенный на рис. 57, *б*.

4. Определяем смещенные по высоте площади S_{h_1}, S_{h_2} и S_{h_3} на участках фасонного профиля. Считая, что эти площади равны смещенным площадям на участках соответственного калибра, рассчитываем высоты h_4, h_5 и h_6 соответственного раската, т.е. находим обжатия.

В данном случае получаем соответственный калибр, состоящий из трех участков, используя при этом условия равенства площадей участков исходного и соответственного калибров, равенства ширин участков и смещенных по высоте площадей. Используя изложенный способ построения соответственного калибра и задаваемого раската, можно рассчитать формоизменение реального калибра как по ходу, так и против хода прокатки при условии задания обжатия.

Способ приведения фасонного калибра к соответственному с использованием экстремальных высот в принципе незначительно отличается от первого способа. Однако второй способ обладает более широкими возможностями в тех случаях, когда профиль несколько асимметричен относительно горизонтальной оси, хотя может использоваться и для симметричных калибров. Условия геометрического и физического подобия соответственного и реального очагов деформации также соблюдаются в этом способе. Метод приведения рассмотрим на примере профиля для оконных переплетов (рис. 58):

1. Ширина соответственного калибра равна ширине задаваемого (или выходящего) раската b. Калибр по ширине ограничиваем вертикальными w_1 и w_2.

2. Определяем минимальные и максимальные высоты калибра h_1, h_2, h_3 и высоты на боковых границах калибра w_1 и w_3, которые в данном случае совпадают с h_1 и h_3.

3. Проводим вертикали w там, где калибр имеет минимальные и

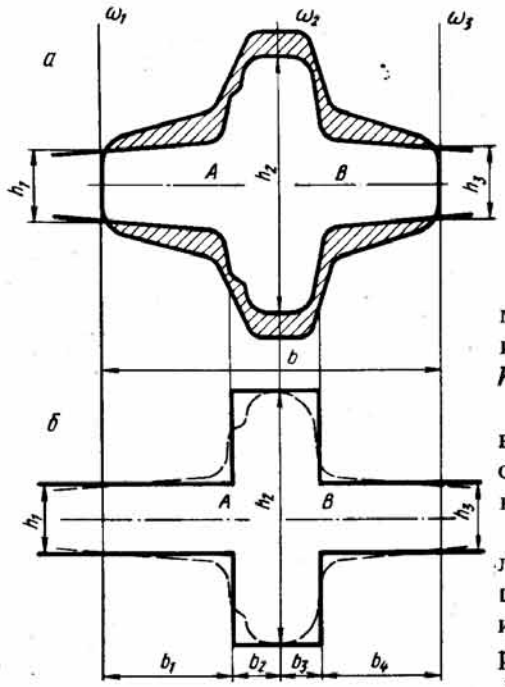


Рис. 58. Второй по ходу прокатки калибр для профиля оконных переплетов (*а*) и соответственный калибр (*б*)

максимальные высоты. Здесь h_1 и h_3 совпадают с w_1 и w_3, а через h_2 проведена вертикаль w_2.

4. Делим калибр (рис. 58, *а*) вертикалью w_2 на участки A и B и определяем площади этих участков S_A и S_B.

5. Строим соответственный калибр (рис. 58, *б*), полагая, что: ширины и площади участков A и B соответственного калибра равны ширинам и площадям участков A и B фасонного профиля; участки A и B соответственного калибра имеют ступенчатый вид, причем высоты границ участков фасонного и соответственного калибров равны.

6. Учитывая условие равенства площадей участков, определяем неизвестные размеры b_1, b_2, b_3, b_4 соответственного калибра.

Поскольку $h_1 b_1 + h_2 b_2 = S_A$; $h_3 b_4 + h_2 b_3 = S_B$, а $b_1 + b_2 = b_A$ и $b_3 + b_4 = b_B$ (где S_A, b_A — площадь и ширина участка A; S_B, b_B — площадь и ширина участка B), то $b_1 = (h_2 b_A - S_A)/(h_3 - h_1)$; $b_4 = (h_2 b_B - S_B)/(h_2 - h_3)$; $b_2 = b_A - b_1$; $b_3 = b_B - b_4$.

7. В итоге имеем соответственный калибр (рис. 59), где $b_5 = b_2 + b_3$. Если нужно определить обжатия на участках *1,2* и *3*, то используем условие равенства смещенных по высоте площадей.

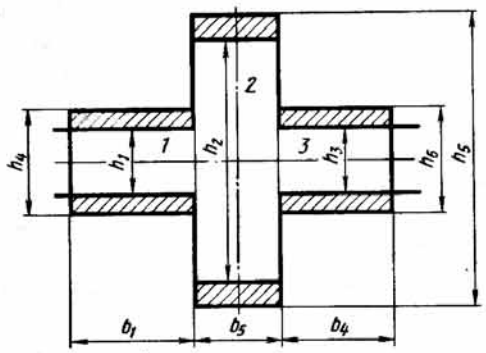


Рис. 59. Соответственный калибр и раскат, полученный методом экстремальных высот

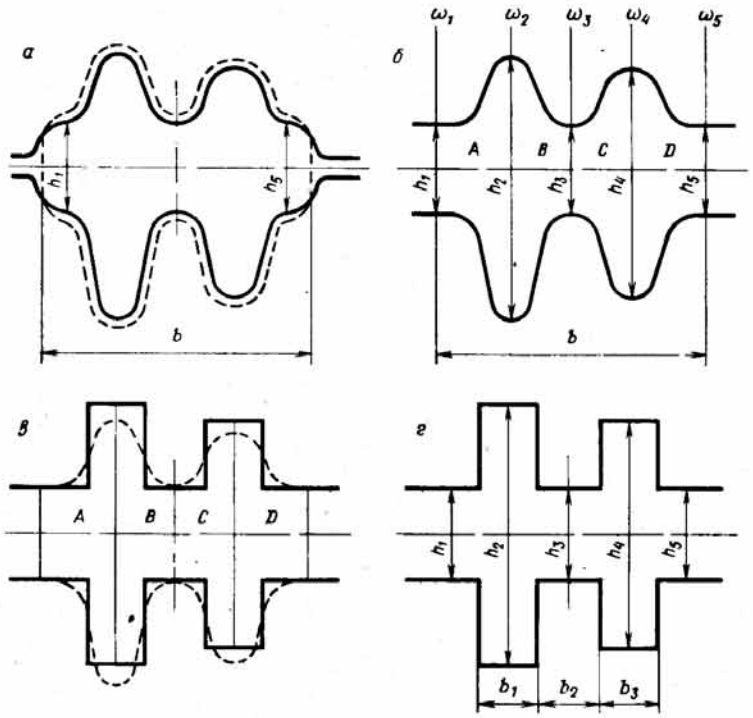


Рис. 60. Этапы построения соответственного калибра для расчета свободного уширения при прокатке профиля двухребордчатой подкладки для рельсов

Тогда

$$\Delta h_1 = h_4 - h_1 = S_{h_1}/b_1;\quad \Delta h_2 = h_5 - h_2 = S_{h_2}/b_5;\quad \Delta h_3 = h_6 - h_3 = S_{h_3}/b_4,$$

где S_{h_1}, S_{h_2}, S_{h_3} — смещенные по высоте площади на соответствующих участках фасонного калибра (раската).

Рассмотрим пример более сложного калибра (рис. 60, *а*), предназначенного для прокатки профиля двухребордчатой подкладки для рельсов метрополитена. Этапы приведения калибра и основные критерии остаются теми же, что и для калибра на рис. 58, но так как калибр на рис. 60, *а* асимметричен, то он приводится к соответственному калибру, состоящему из пяти участков (см. рис. 55, *а*).

Так как в фасонном калибре (рис. 60, *а*) следует определить свободное уширение, чтобы получить заданную ширину раската, то исключаем боковые стенки калибра и находим высоты h_1 и h_5 боковых участков калибра (рис. 60, *б*). Ширину калибра берем равной ширине раската b. Определяем максимальные и минимальные высоты калибра h_2, h_3 и h_4 в местах сужения и расширения калибра, а также h_1 и h_5 — на его границах (рис. 60, *б*).

Проводя через точки экстремальных высот вертикали w_1, w_2, w_3, w_4 и w_5, делим калибр на четыре участка *A, B, C* и *D*. Находим площади этих участков. Заменяем участки фасонного калибра равновеликими по площади ступенчатыми участками соответственного калибра, симметричного относительно горизонтальной оси (рис. 60, *в*). Сходственные высоты границ одних и тех же участков фасонного и соответственного калибров равны. Размеры b_1, b_2 и b_3 определяются из условий равенства площадей участков.

В результате получаем соответственный калибр (рис. 60, *г*). Обжатия на участках определяются при необходимости из условия равенства смещенных по высоте площадей.

Рассмотрим далее достоинства и недостатки обоих методов, называя для краткости их "первый" и "второй" в той последовательности, в которой они были изложены. Первый способ подходит для приведения к соответственному виду только симметричных относительно горизонтальной оси или очень близких к симметричным фасонных калибров, тогда как второй – для симметричных и асимметричных калибров, т.к. второй способ имеет более широкую область приложения. Этот способ позволяет даже сравнительно простой фасонный калибр привести к соответственному калибру, состоящему из пяти участков, если это необходимо для повышения точности расчетов коэффициентов формоизменения. Число участков соответственного калибра, полученного вторым способом, однозначно определено формой фасонного калибра и не может быть ни увеличено, ни уменьшено. Это является недостатком второго способа, поскольку иногда препятствует увеличению точности расчетов формоизменения за счет увеличения числа участков. В целом оба способа не имеют существенных принципиальных различий и должны давать примерно одинаковую точность результатов. Первый способ целесообразно применять к более простым и симметричным относительно горизонтальной оси фасонным калибрам, второй – к асимметричным и более сложным калибрам.

3. Экспериментальные исследования формоизменения при прокатке с неравномерным обжатием

Расчеты формоизменения при прокатке соответственных профилей с помощью теоретических (обычно это вариационные методы) исследований должны быть обязательно дополнены экспериментом, дающим бо́льшую точность и надежность результатов. В числе факторов, определяющих процесс прокатки фасонных профилей, одним из основных или даже основным фактором является неравномерность деформации по ширине полосы, с целью изучения влияния которой проведены две серии планируемого эксперимента по прокатке стальных образцов из стали марки Ст3.

Прокатка проводилась на трехклетевом опытно-промышленном стане 300 (Днепродзержинского индустриального института): диаметр бандажей 300 мм, длина образцов 300–350 мм, привод стана от электродвигателя мощностью 120 кВт с частотой вращения 76,85 рад/с,

передаточное число редуктора 23,34, температура нагрева образцов 1100 °С.

В первой серии планируемого эксперимента прокатывали образцы прямоугольного поперечного сечения с обжатием только боковых частей, т.е. по существу в крестообразном калибре. Эти эксперименты должны служить основой расчета формоизменения (коэффициентов вытяжки λ, уширения β и утяжки δ) при прокатке фасонных профилей с обжимаемыми и необжимаемыми участками.

В качестве независимых переменных приняты (рис. 56, *а*) геометрические размеры очага деформации и калибра: H_0 и h_1 – толщина полосы до обжатия и после обжатия; b_2 – ширина вреза калибра; B_0 – ширина полосы до прохода, где $B_0 = b_2 + 2\,b_1$; R – радиус валков.

На основании анализа действующих калибровок при прокатке на станах с диаметром 250–350 мм и исходя из технической характеристики стана 300, на размеры образцов получены следующие ограничения:

$$12\text{ мм} \leqslant H_0 \leqslant 50\text{ мм},\quad 5\text{ мм} \leqslant b_1 \leqslant 30\text{ мм};$$
$$10\text{ мм} \leqslant h_1 \leqslant 20\text{ мм},\quad 10\text{ мм} \leqslant b_2 \leqslant 30\text{ мм}. \qquad (31)$$

Радиусы R нижнего и верхнего валков приняты одинаковыми и равными 150 мм.

Безразмерные относительные параметры m_i определены как отношения геометрических размеров и с учетом их физического смысла

$$m_1 = H_0/h_1,\ m_2 = 2\,b_1H_0/b_2H_0,\ m_3 = b_2/h_1,\ m_4 = h_1/R, \qquad (32)$$

где основными параметрами являются коэффициент обжатия $m_1 = H_0/h_1$ и отношение площадей обжимаемых и необжимаемых участков $m_2 = 2\,b_1H_0/b_2H_0$.

Учитывая равенства (31) и (32) и значение $R = 150$ мм, находим пределы изменения параметров m_i :

$$1{,}2 \leqslant m_1 \leqslant 2{,}5,\quad 1{,}0 \leqslant m_3 \leqslant 1{,}5,$$
$$1{,}0 \leqslant m_2 \leqslant 2{,}0,\quad 0{,}067 \leqslant m_4 \leqslant 0{,}133. \qquad (33)$$

Для получения эмпирических зависимостей для коэффициентов вытяжки ($\lambda = L_1/L_0$), уширения ($\beta = B_1/B_0$) и утяжки ($\delta = H_1/H_0$) в виде полиномов первой степени спланирован полный четырехфакторный эксперимент для линейной модели с числом экспериментальных точек плана $N = 2^n = 2^4 = 16$.

Переход от безразмерных параметров m_i к нормированным факторам x_i, значительно упрощающим вычисления, определяется по формуле

$$x_i = A_i\,m_i + B_i, \qquad (34)$$

где $A_i = \dfrac{1}{0{,}5\,\Delta m_i}$, $B_i = -\dfrac{1}{0{,}5\,\Delta m_i}m_{0i}$,

$$\Delta m_i = m_{i\,\max} - m_{i\,\min},\quad m_{0i} = 0{,}5(m_{i\,\max} + m_{i\,\min}).$$

Учитывая (33), находим из соотношения (34)

$$\left.\begin{aligned} &x_1 = 1{,}539\, m_1 - 2{,}846, \quad x_2 = 2\, m_2 - 3, \\ &x_3 = 4\, m_3 - 5, \qquad x_4 = 30{,}3\, m_4 - 3{,}03. \end{aligned}\right\} \tag{35}$$

Область планирования эксперимента в пространстве размерности $n = 4$ определяется неравенствами:

$$-1 \leqslant x \leqslant 1, \quad i = 1, 2, 3, 4. \tag{36}$$

Обработка результатов эксперимента производилась по разработанной стандартной программе на ЭВМ ЕС 1022, составленной для произвольного числа факторов m_i. В результате определены формулы для коэффициентов λ, β и δ в зависимости от переменных x_i.

После перехода по формулам (35) от переменных x_i к параметрам m_i и отбрасывания незначимых членов получим окончательно (ϵ — ошибка аппроксимации):

$$\lambda = 0{,}87 - 0{,}062\, m_1 + 0{,}0848\, m_2 + 0{,}202\, m_3 - 1{,}34\, m_4 + \\ + 0{,}0974\, m_1 m_2 + 0{,}947\, m_1 m_4 - 0{,}135\, m_2 m_3; \quad \epsilon = 1{,}1\ \% \tag{37}$$

$$\beta = 0{,}593 + 0{,}558\, m_1 + 0{,}118\, m_2 + 0{,}107\, m_3 - 3{,}95\, m_4 - \\ - 0{,}0969\, m_1 m_3 - 1{,}67\, m_1 m_4 - 0{,}196\, m_2 m_3 + 1{,}27\, m_2 m_4 + \\ + 3{,}12\, m_3 m_4; \quad \epsilon = 3{,}0\ \%, \tag{38}$$

$$\delta = 0{,}522 + 0{,}117\, m_1 + 0{,}121\, m_2 + 0{,}0918\, m_3 + 4{,}71\, m_4 - \\ - 0{,}0734\, m_1 m_2 - 0{,}449\, m_1 m_4 + 0{,}0630\, m_2 m_3 - 1{,}04\, m_2 m_4 - \\ - 1{,}86\, m_3 m_4; \quad \epsilon = 2{,}5\ \%. \tag{39}$$

Во второй серии планируемого эксперимента на том же стане 300 и при тех же условиях проведены исследования формоизменения для соответственного калибра с неравномерным обжатием по ширине (рис. 56, *б*).

В качестве безразмерных относительных параметров m_i приняты следующие отношения размеров:

$$\left.\begin{aligned} &m_1 = H_0/h_1, \quad m_2 = 2\, b_1 H_0 / b_2 H_0, m_3 = b_2/h_1, \\ &m_4 = h_1/R, \quad m_5 = (H_0 - h_1)/(H_0 - h_2), \end{aligned}\right\} \tag{40}$$

где основные параметры m_1 и m_2.

Число экспериментальных точек полного факторного эксперимента $N = 2^n = 2^5 = 32$.

Из ограничений на размеры образцов

$12\ \text{мм} \leqslant H_0 \leqslant 25\ \text{мм}, \quad 10\ \text{мм} \leqslant b_2 \leqslant 30\ \text{мм},$

$10\ \text{мм} \leqslant h_1 \leqslant 20\ \text{мм}, \quad 20\ \text{мм} \leqslant B_0 \leqslant 90\ \text{мм},$

$5\ \text{мм} \leqslant b_1 \leqslant 30\ \text{мм}, \quad 10{,}7\ \text{мм} \leqslant h_2 \leqslant 40\ \text{мм}$

определены пределы изменения параметров m_i

$1{,}2 \leqslant m_1 \leqslant 2{,}5, \quad 0{,}067 \leqslant m_4 \leqslant 0{,}133,$

$1{,}0 \leqslant m_2 \leqslant 2{,}0, \quad 1{,}5 \leqslant m_5 \leqslant 3{,}0,$

$1{,}0 \leqslant m_3 \leqslant 1{,}5.$

Переход к безразмерным факторам x_i, выполнение эксперимента и обработка результатов проводились точно так же, как и в предыдущем эксперименте.

После отбрасывания незначимых членов получены формулы для определения коэффициентов вытяжки $\lambda = L_1/L_0$ и уширения $\beta = B_1/B_0$

$$\lambda = 0{,}706 + 0{,}03\, m_1 + 0{,}0391\, m_2 + 0{,}0545\, m_3 - 0{,}529\, m_4 + 0{,}155\, m_5 + \\ + 0{,}129\, m_1 m_2 + 0{,}0962\, m_1 m_3 + 1{,}72\, m_1 m_4 - 0{,}0807\, m_1 m_5 - \\ - 0{,}155\, m_2 m_3 - 0{,}682\, m_4 m_5; \quad \epsilon = 0{,}8\ \%; \tag{41}$$

$$\beta = 1{,}91 + 0{,}544\, m_1 - 0{,}347\, m_2 - 0{,}784\, m_3 - 5{,}35\, m_4 - 0{,}231\, m_5 + \\ - 1{,}98\, m_1 m_4 - 0{,}0461\, m_1 m_5 + 1{,}97\, m_2 m_4 + 0{,}0667\, m_2 m_5 + \\ + 3{,}64\, m_3 m_4 + 0{,}147\, m_3 m_5; \quad \epsilon = 1{,}6\ \%. \tag{42}$$

4. Проверочный расчет калибровки крестообразного профиля сечением 48×34×12×7 мм

Для расчета вначале определим размеры соответственных калибров и раскатов в каждом проходе, учитывая результаты опытной прокатки, проведенной по рассчитанной калибровке.

Калибр 1 (рис. 61). В качестве исходной заготовки взят круг диаметром 40 мм. Ширина соответственного калибра, таким образом,

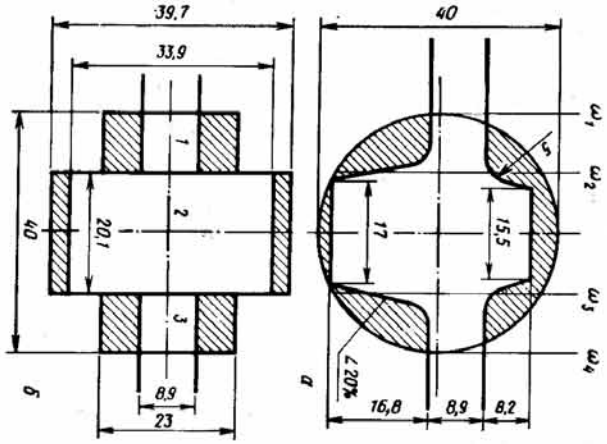


Рис. 61. Калибр 1 (*а*) и соответственный ему калибр (*б*) для прокатки крестообразного профиля

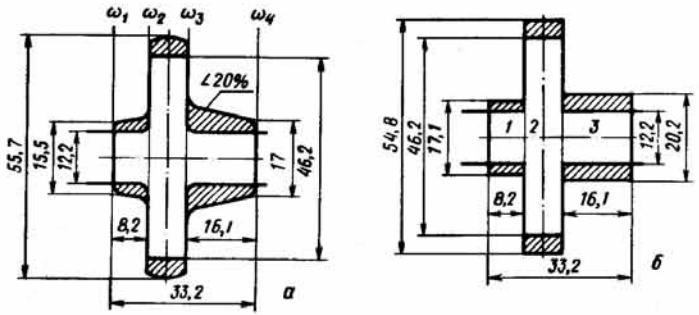


Рис. 62. Калибр 2 (*а*) и соответственный ему калибр (*б*) для прокатки крестообразного профиля

40 мм. Общая площадь калибра (рис. 61, *а*) $S_0 = 858{,}6$ мм^2. Высота участков *1, 2* и *3* соответственного калибра равны минимальной и максимальной высотам первого калибра: $h_{k_1} = 8{,}9$ мм; $h_{k_2} = 33{,}9$ мм; $h_{k_3} = 8{,}9$ мм.

Зная S_0 и высоту участков калибра (рис. 61, *б*), находим их ширину

$$b_1 = \frac{h_{k_2} b - S_0}{2(h_{k_2} - h_{k_1})} = 9{,}95 \text{ мм}; \; b_2 = 20{,}1 \text{ мм}; \; b_3 = 9{,}95 \text{ мм}.$$

Смещенные по высоте площади на участках *1, 2* и *3* соответственно равны $S_{h_1} = 140{,}3$ мм^2; $S_{h_2} = 117{,}4$ мм^2; $S_{h_3} = 140{,}3$ мм^2. Определяем абсолютные обжатия и высоты участков соответственного раската: $\Delta h_1 = 14{,}1$ мм; $\Delta h_2 = 5{,}8$ мм; $\Delta h_3 = 14{,}1$ мм; $h_1 = 23$ мм; $h_2 = 39{,}7$ мм; $h_3 = 23$ мм.

В результате получаем соответственный калибр и раскат, представленные на рис. 61, *б*.

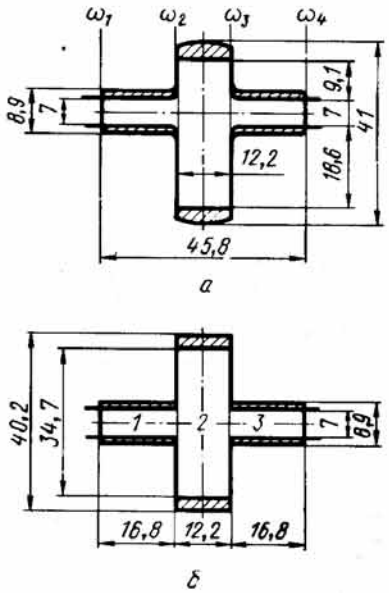
Калибр 2 (рис. 62). Исходный раскат получен прокаткой заготовки диаметром 40 мм в калибре *1*. Форма калибра здесь практически не отличается от соответственной, и поэтому размеры соответственного калибра (рис. 62, *б*) равны: $b_1 = 8{,}2$ мм; $b_2 = 8{,}9$ мм; $b_3 = 16{,}1$ мм; $h_{k_1} = 12{,}2$ мм; $h_{k_2} = 46{,}2$ мм; $h_{k_3} = 12{,}2$ мм.

Находим абсолютные обжатия, используя равенство смещенных по высоте площадей на участках *1, 2* и *3* реального и соответственного раскатов: $S_{h_1} = 40{,}2$ мм^2; $S_{h_2} = 76{,}3$ мм^2; $S_{h_3} = 128{,}5$ мм^2; $\Delta h_1 = 4{,}9$ мм; $\Delta h_2 = 8{,}6$ мм; $\Delta h_3 = 8{,}0$ мм.

Высоты участков соответственного раската $h_1 = 17{,}1$ мм; $h_2 = 54{,}8$ мм; $h_3 = 20{,}2$ мм.

Калибр 3 (рис. 63). Исходный раскат получен прокаткой круглой заготовки диаметром 40 мм в двух предыдущих калибрах. Ширины и высоты участков *1, 2* и *3* соответственного калибра (рис. 63, *б*) равны ширинам и высотам участков фактического калибра (рис.

Рис. 63. Калибр 3 (*а*) и соответственный ему калибр (*б*) для прокатки крестообразного профиля



63, *а*): $b_1 = 16{,}8$ мм; $b_2 = 12{,}2$ мм; $b_3 = 16{,}8$ мм; $h_{k_1} = 7$ мм; $h_{k_2} = 34{,}7$ мм; $h_{k_3} = 7$ мм.

Соответственный калибр в отличие от исходного симметричен относительно продольно-горизонтальной плоскости.

Площади, смещенные по высоте, $S_{h_1} = 31{,}9$ мм^2; $S_{h_2} = 66{,}7$ мм^2; $S_{h_3} = 31{,}9$ мм^2 позволяют определить абсолютные обжатия и высоты участков соответственного раската: $\Delta h_1 = 1{,}9$ мм; $\Delta h_2 = 5{,}5$ мм; $\Delta h_3 = 1{,}9$ мм; $h_1 = 8{,}9$ мм; $h_2 = 40{,}2$ мм; $h_3 = 8{,}9$ мм.

Таблица 2. Экспериментальные и расчетные значения коэффициентов формоизменения при прокатке крестообразного профиля сечением 48×34×12×7 мм

Номер прохода	Экспериментальные значения		Расчетные значения		Относительная ошибка, %	
	$\lambda_э$	$\beta_э$	$\lambda_р$	$\beta_р$	ϵ_λ	ϵ_β
1	1,31	1,39	1,32	1,38	3,5	3,5
2	1,22	1,24	1,23	1,23	4,5	4,5
3	1,18	1,06	1,19	1,05	4,5	4,5

По рассчитанной калибровке проведена опытная прокатка крестообразного профиля на стане 300 из заготовки круглого поперечного сечения с диаметром 40 мм. Марка стали заготовки МСт3, температура прокатки перед первым проходом 1100 °С. После каждого прохода взяты темплеты. В результате их изменений определены экспериментальные значения коэффициентов формоизменения в каждом калибре. Размеры соответственных калибров и раскатов использованы для расчета коэффициентов формоизменения с помощью программы числен-

ного решения вариационной задачи, рассмотренной в данной главе. Опытные и расчетные данные незначительно отличаются друг от друга (табл. 2), поэтому после опытной прокатки потребовалась лишь небольшая корректировка калибровки.

Глава 4.

ПОЛОСОВЫЕ СИММЕТРИЧНЫЕ И АСИММЕТРИЧНЫЕ ПРОФИЛИ

1. Сортамент и схемы прокатки

В соответствии с технологической классификацией (рис. 1) фасонные полосовые симметричные и асимметричные профили включают [1] следующие три группы:

1) полосовые профили с двумя осями симметрии;
2) полосовые профили с вертикальной осью симметрии;
3) полосовые асимметричные профили.

К первой группе относятся профили простой геометрической формы с острыми и полукруглыми кромками; профили, сечение которых представляет собой два равномерно суживающихся к середине клина; профили, средняя часть которых имеет форму прямоугольника, а кромки выполнены в виде двух клиньев. Калибровка симметричного полосового профиля приведена на рис. 64.

Ко второй группе относятся полосовые профили, центральный участок которых может иметь форму прямоугольника, а крайние участки – форму одностороннего суживающегося клина либо прямоугольника, расположенного параллельно среднему участку или наклоненного к нему под определенным углом. К этой группе относятся также профили, сечение которых образовано двумя односторонне суживающимися клиньями, соединенными толстыми или тонкими кромками. На рис. 65 приведены калибровки профилей с вертикальной осью симметрии, предназначенных для конусных шайб.

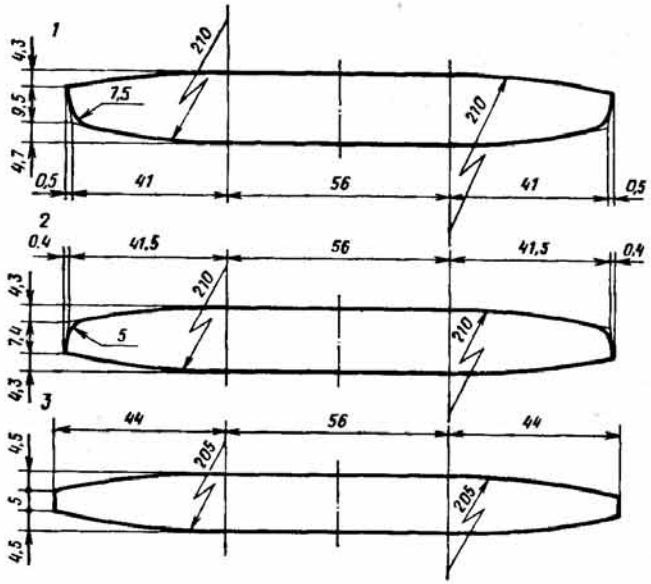


Рис. 64. Калибровка профиля стержня сороудерживающей решетки на линейном стане 585 (исходное сечение 125×24мм)

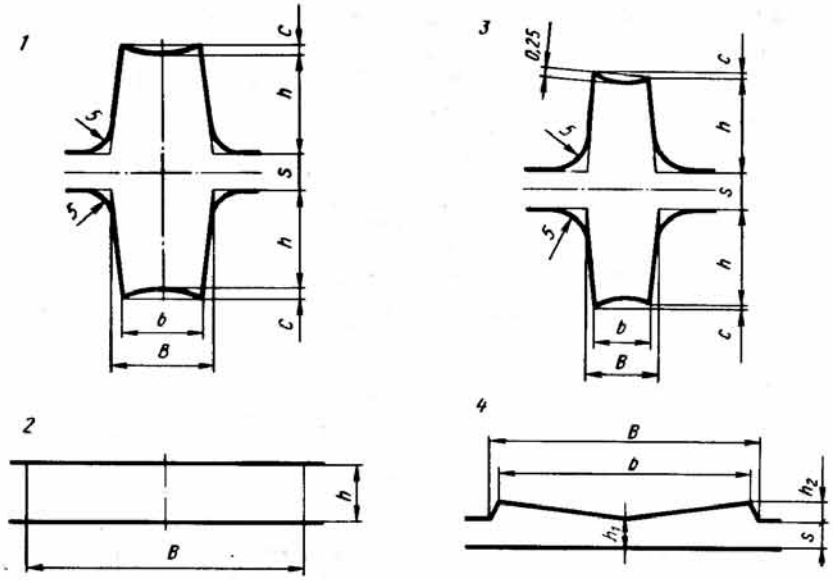


Рис. 65. Калибровка профилей для конусных шайб сечением 32×5,8×4 мм и 40×6,2×4 мм на линейном восьмиклетевом стане 280–1 и сечением 60×7,3×4 мм и 80×8,4×4 мм на линейном трехклетевом стане 450

К третьей группе относятся профили, не имеющие осей симметрии и обычно включающие участок прямоугольной формы с примыкающим участком. При этом клиновидные участки могут быть расположены с обеих сторон профиля. Примером являются калибровки двух асимметричных профилей с клиновидными элементами (рис. 66).

Основные методы прокатки полосовой стали: в закрытых калибрах, в открытых калибрах и по диагонали.

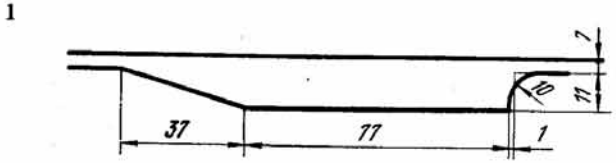
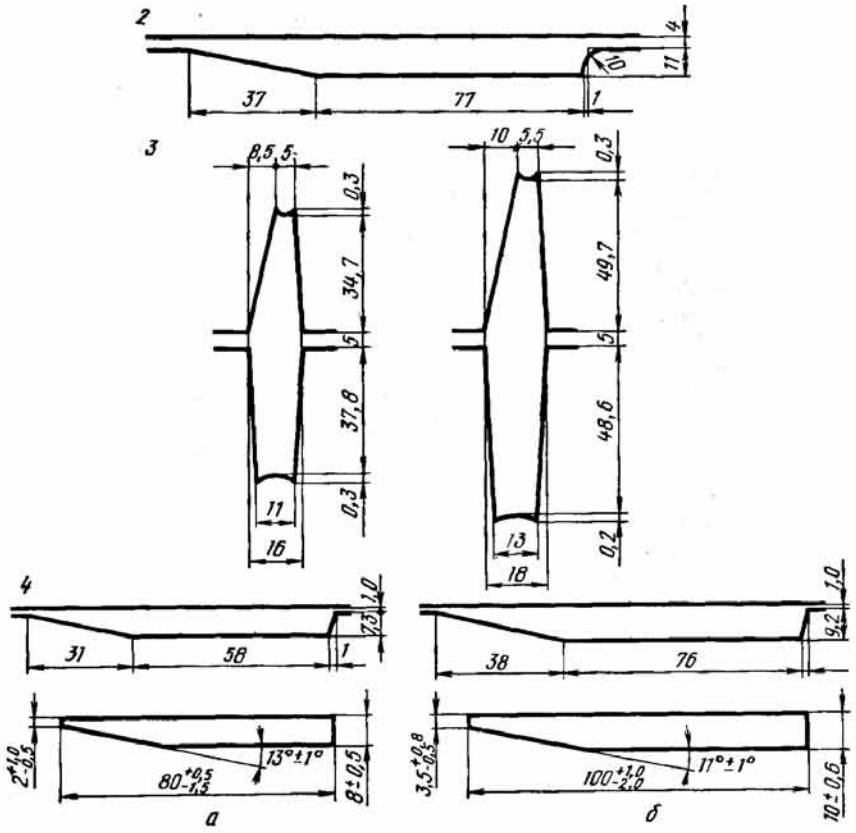


Рис. 66. Калибровка профиля сечением 80×8×2 мм для лемехов культиватора-плоскореза (*а*) из стали марок 45,50 и профиля 100×10×3,5 мм (*б*) из стали марки 65Г на линейном трехклетевом стане 450



Продолжение рис. 66

Прокатка в закрытых калибрах (рис. 67) является наиболее старым методом, который широко применялся ранее (применяется также и теперь, особенно для фасонных профилей) для прокатки полосовой стали почти всех размеров.

Наличие стесненного уширения в закрытых калибрах и интенсивная обработка боковых кромок полосы способствуют получению профиля высокого качества с правильными боковыми кромками. В некоторых случаях прокатка ведется практически без уширения. При ограниченном уширении повышается коэффициент вытяжки.

Недостатки этого метода следующие:

большое число валков, необходимых для прокатки ряда полосовых профилей, в результате – длительные остановки для перевалки валков;

износ боковых стенок закрытых калибров, вызывающий увеличение их ширины, вследствие чего и ширина полосовых профилей получается бо́льшая, чем требуется;

образование усов и складок, возможное при прокатке полос с пониженной температурой.

Предупреждение образования усов (переполнения в разъем калибров) достигается применением радиусов закруглений или скосов, как об этом было ска-

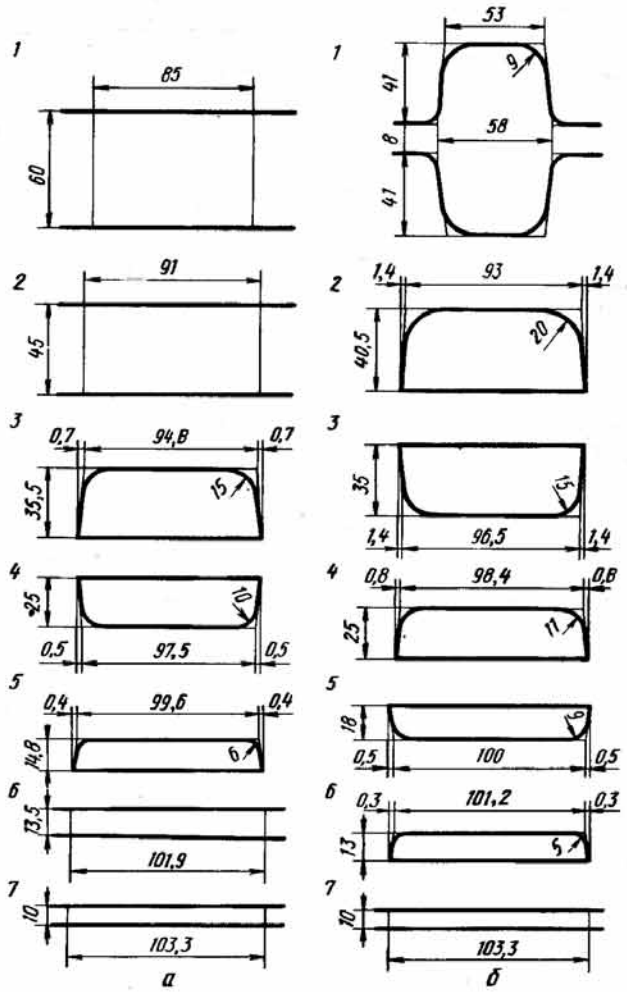


Рис. 67. Схема калибровки рессорной полосы сечением 102×10 мм на линейном четырехклетевом стане 400:
а – первый вариант; *б* – второй вариант

зано выше. Иногда с этой же целью последний калибр заменяют гладкой бочкой (рис. 67).

Другой способ предложен В.Е. Грум-Гржимайло. По этому способу краям полосы, задаваемой в чистовой калибр, придают некоторое утолщение. Тогда при небольшом обжатии центральной части полосы на кромках ее возникает устойчивое вынужденное уширение, размеры которого не меняются при изменении условий прокатки.

Иногда (рис. 67, *б*) при прокатке в закрытых калибрах для обеспечения точной ширины, т.е. для ее контроля, предусматривают перед закрытыми калибрами ребровой калибр.

Прокатку в открытых калибрах можно вести несколькими способами. Во-первых, в ступенчатых валках на трехвалковых станах. Применение ступенчатых валков позволяет прокатывать на трехвалковых станах широкий сортамент по-

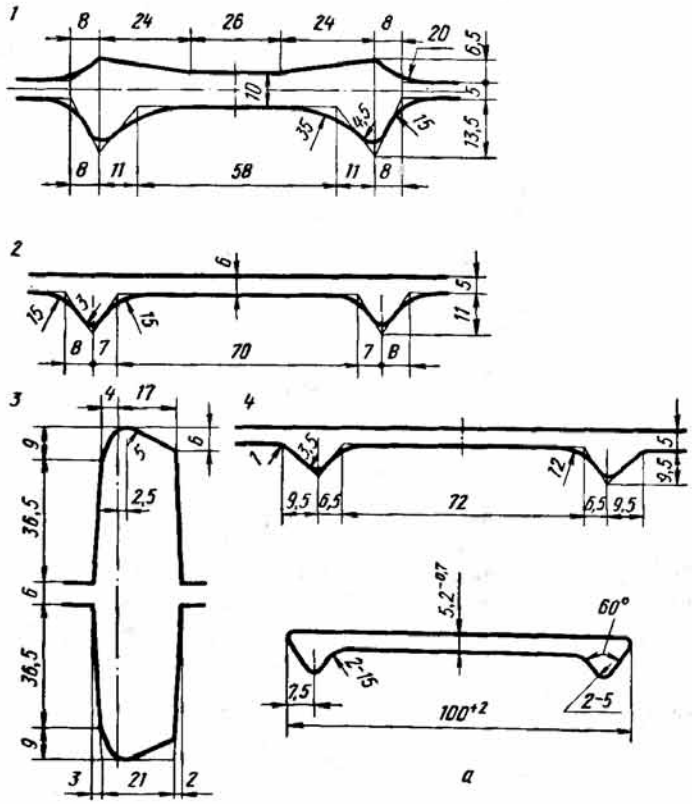


Рис. 68. Калибровка профиля сечением 100×12×5,2 мм для сельскохозяйственных кос из стали марок У7А, У8А и У8 на линейном стане 450 (*а* – готовый профиль)

лосовой стали различной ширины и толщины. Изменение толщины полос осуществляется простой настройкой за счет изменения зазора. Ширина ступеней обычно берется на 50 мм больше максимальной ширины полосовой стали. Так как основная трудность заключается в получении необходимой ширины, то обычно между клетью, имеющей ступенчатые валки, и чистовой клетью располагают двухвалковую клеть с ребровыми калибрами, обеспечивающими прокатку всего сортамента стана.

Прокатка в ступенчатых валках имеет небольшое применение при производстве фасонных полосовых профилей только в случае, когда используются ребровые калибры. По такой схеме можно прокатывать отдельные фасонные полосовые профили со скошенными углами, которые формируются в ребровом калибре.

Ко второму способу прокатки относится довольно распространенный способ – прокатка в открытых калибрах со свободным уширением и контролем ширины в ребровом калибре (рис. 68). На непрерывных сортовых станах ребровые проходы осуществляются в клетях с вертикальными валками. Однако при прокатке фасонных полосовых профилей шириной более 100 мм по схеме с ребровыми калибрами в клетях с горизонтальными валками очень нелегко удерживать полосу при задаче в ребровой калибр. Поэтому для таких профилей следует предпочесть прокатку в закрытых калибрах за исключением, может быть, последнего прохода, который вообще-то можно осуществлять в калибре со свободным уширением.

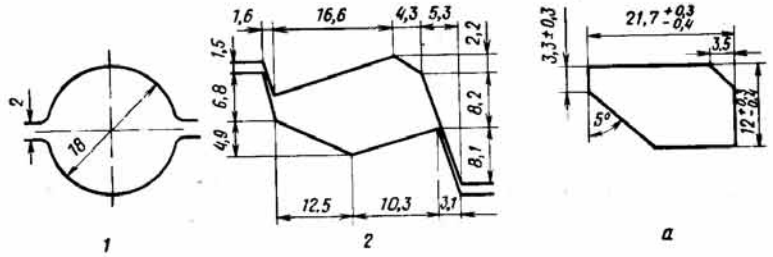


Рис. 69. Калибровка профиля сечением 21,7×12,0×3,3 мм на стане 300 (исходное сечение – овал 29×14,5 мм; *а* – готовый профиль)

Прокатка по диагонали применяется редко. Этот способ обеспечивает хорошее выполнение углов и одновременное обжатие полосы со всех четырех сторон. Недостатком является скручивание полос (особенно при малой толщине полос), устранить которое весьма трудно. Однако, как уже указывалось, косорасположенные калибры на некоторых заводах довольно часто используются в качестве чистовых. При этом отсутствие защемления при таком расположении калибра со стороны нижнего и верхнего валков обеспечивает прокатку без защемления полосы и соответственно прямолинейный выход полосы из валков. В качестве примера приведем калибровку асимметричного полосового профиля со скосами (рис. 69).

2. Прокатка профилей для рессор автомобилей и железнодорожного транспорта

Профили для рессорных полос могут быть выделены в отдельную подгруппу. На рис. 70 приведены [2] основные типы профилей для рессор автомобилей: прямоугольный (*г*), трапециевидный (*в*), Т-образный (*б*) и трапециевидно-ступенчатый (*а*). Наибольшее распространение получила прямоугольная рессора, хотя с каждым годом увеличивается и производство Т-образной и трапециевидной (с параболическими кромками) рессорных полос.

По технологической классификации [1] Т-образные, трапециевидные и ступенчато-трапециевидные рессорные профили входят в группу полосовых профилей с вертикальной осью симметрии.

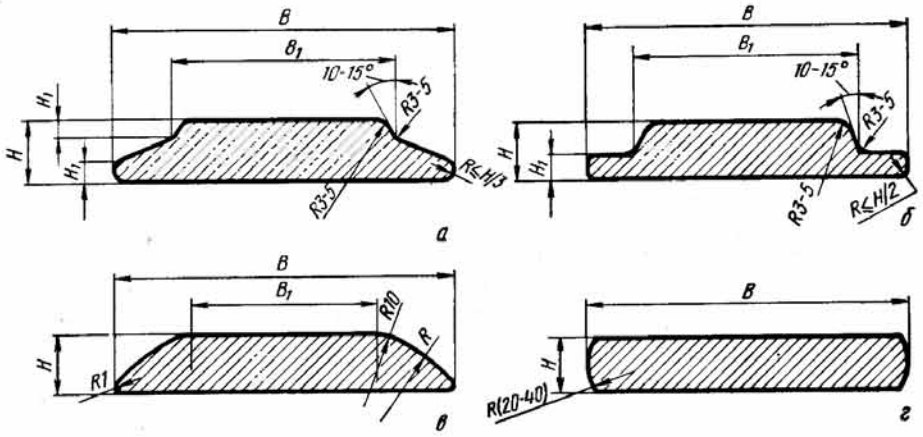


Рис. 70. Основные типы профилей для рессор автомобилей

Рессорные профили для автомобилей изготавливаются из кремнистых сталей 55С2, 55С2А, 60С2, 60С2А и хромомарганцовистых 50ХГ и 50ХГА.

Производство рессоры из кремнистых сталей составляет 55–57 % общего производства, а из хромомарганцовистых – 43–45 %. В небольшом количестве получают рессоры из стали 60ХГС. Сталь для рессор обычно выбирает завод-потребитель.

ГОСТ 7419.0–78 – ГОСТ 6419.8–79 включают 148 профилеразмеров прямоугольной, 24 трапециевидной, 75 профилеразмеров Т-образной и 62 трапециевидно-ступенчатой рессоры для автомобильной и других отраслей промышленности.

Освоение трапециевидной рессоры 45/25×6/2 мм для легковых автомобилей Горьковского автозавода впервые было произведено на линейном стане 325 [2]. Масса на 1 м длины рессоры 45/25×6/2 мм меньше по сравнению с прямоугольной на 5–10 %.

Особенностью прокатки трапециевидной рессоры 45/25×6/2 мм, как и других типоразмеров этого вида рессорных профилей, является трудность получения симметричного профиля с одинаковой толщиной правой и левой боковых кромок. Конфигурация трапециевидной рессоры не способствует устойчивости полосы в калибре, и поэтому повышение устойчивости должно осуществляться за счет режима распределения обжатий по ширине полосы.

При прокатке трапециевидной рессоры возможны два варианта распределения обжатий по ширине полосы: обжатие по кромкам полосы меньше, чем в центральной части; обжатие в центральной части меньше, чем по кромкам.

В процессе освоения на стане 325 калибровки с четырьмя фасонными калибрами из квадрата 28×28 мм и с минимальным обжатием кромок в чистовом калибре выявлен ряд существенных недостатков данной схемы:

малая толщина кромок в ребровом (предчистовом) и предшествующих ему по ходу прокатки калибрах;

незаполнение кромок полосы в предчистовом ребровом калибре при малейшей несимметричности кромок задаваемой полосы, что приводит к неустойчивой прокатке и требует постоянной настройки стана;

усложнение калибровки за счет сравнительно большого числа фасонных калибров;

серповидный изгиб полос при прокатке в чистовом калибре при незначительном поперечном смещении задаваемой полосы относительно валков вследствие неравномерности обжатий по ширине полосы;

высокий брак по несимметричности кромок, который составил более 25 %.

На основании результатов освоения была разработана и применена калибровка с интенсивным обжатием кромок полосы (рис. 71, *а*), сопровождающимся значительным вынужденным уширением кромок, что приводит к появлению значительных поперечных усилий, которые центрируют полосу в калибре, препятствуя ее смещению в поперечном направлении. При этом исключается брак по разнотолщинности кромок и увеличивается производительность стана. Применение трех фасонных калибров и формирование исходной полосы в гладких валках дало возможность использовать обводной аппарат для передачи квадратного раската и тем самым ликвидировать на этом участке ручной труд вальцовщиков.

При разработке калибровки форма закругления вершин предчистового ребрового калибра выбирается из условия симметричности закругления кромок готового профиля относительно горизонтальной оси. Величина обжатия кромок полосы в чистовом калибре должна обеспечить получение плавного закругления кромок готового профиля.

Так как согласно техническим условиям на трапециевидный рессорный профиль 45/25×6/2 мм не требовалось высокой точности закруглений кромок, то калибровка была в дальнейшем усовершенствована (рис. 71, *б*) при формировании профиля только в двух фасонных калибрах. Применение такой калибровки позволило прокатывать трапециевидную рессору высокой точности. Производительность стана значительно увеличилась. Брак по разнотолщинности кромок составил всего лишь 0,2 т на 570 т проката, а общий брак 2,6 %.

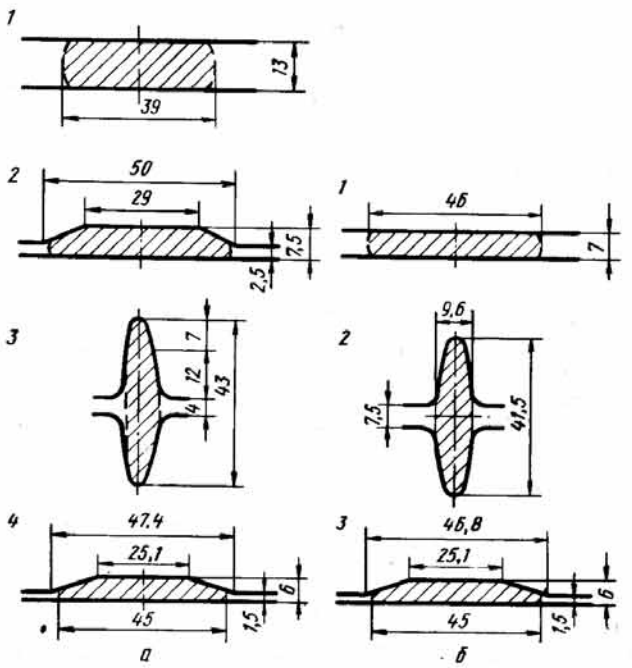


Рис. 71. Калибровка трапециевидной рессоры 45/25×6/2 мм:
а – с тремя фасонными калибрами и интенсивным обжатием кромок в чистовом калибре; *б* – с двумя фасонными калибрами

Прокатка трапециевидных рессорных профилей шириной 65 мм и толщиной 7, 8, 9, 10 и 11 мм из стали 50ХГ и 50ХГА для рессор грузовых автомобилей освоена [2] на полунепрерывном стане 370 Чусовского металлургического завода, на котором накоплен значительный опыт прокатки желобчатой рессоры для железнодорожного транспорта, экспериментальных партий рессор с одножелобчатой выемкой и двумя желобчатыми выемками, Т-образной, трапециевидной и трапециевидно-ступенчатой рессоры.

Прокатка всех профилеразмеров трапециевидных рессор проводится в трех фасонных калибрах. Основное затруднение при прокатке этих профилей связано с расположением клетей стана 370 и заключается в том, что задача прямоугольной полосы в первый фасонный калибр, расположенный на валках клети *IV* линейной группы, проводится по обводному горизонтальному аппарату. В этих условиях после захвата полосы и образования петли происходит прижатие (смещение) полосы к левому пропуску вводной коробки. Затем после выхода заднего конца полосы из валков клети *III* задний конец полосы располагается по дуге основания обводного аппарата и происходит смещение полосы к правому пропуску вводной коробки. В результате получается разная толщина кромок полосы в первом фасонном калибре, которая сохраняется и на готовом профиле, приводя к увеличению выхода брака и второго сорта.

Разнотолщинность кромок трапециевидной рессоры устранена в основном за счет точной установки пропусков вводной коробки клети *IV* при уменьшении зазора между ними по сравнению с прокаткой прямоугольной рессоры 65×6 мм. При этом было учтено то обстоятельство, что при передаче по горизонтальному аппарату полоса в момент захвата поступает к калибру клети *IV* под некоторым углом и поэтому горизонтальная проекция полосы меньше ее ширины. Кроме того, самоцентрированию полосы в первом фасонном калибре

способствует сама форма калибра вследствие более интенсивного обжатия кромок по сравнению с центральной частью.

Т-образная рессорная полоса с размерами, указанными на рис. 70, *в* представляет собой профиль с неодинаковой толщиной поперечного сечения: толщина средней части соответствует толщине данного типоразмера, а толщина крайних частей значительно уменьшена. От средней части к крайним предусмотрен плавный переход. Эти профили предназначены для рессор грузовых автомобилей, автобусов и троллейбусов и вначале были освоены на полунепрерывном рессорном стане 370. В дальнейшем такие профили были включены в специализацию непрерывного стана 300 Челябинского металлургического комбината, на котором освоены профили из сталей 55С2, 60С2 и 60ХГС следующих типоразмеров: 65/38×10/4 мм; 75/52,5×9/3,6 мм; 75/52,5×10/4 мм; 90/63×12/4,8 мм; 90/63×11/4,4 мм; 90/63×18/7,2 мм.

Т-образные рессорные профили из сталей 60С2 и 60ХГС размерами 90/63×14/5,6 мм; 90/63×18/7,2 мм и 100/70×16/6,4 мм прокатываются на стане 400 Донецкого металлургического завода из заготовки сечением 135×135 мм и длиной 1500 мм. Перепад температуры по длине раската при прокатке составляет 40–60 °С, что вызывает увеличение толщины полос по их длине на 0,15–0,17 мм.

На непрерывном стане 300 принята [2] схема прокатки Т-образных профилей в открытых калибрах с формированием готового профиля в зависимости от его размеров в четырех или пяти фасонных калибрах валков чистовой группы клетей (рис. 72). Одна или две клети с фасонными калибрами должны быть с вертикальными валками для контроля размеров по ширине. После клети *V* черновой линии деформация полос производится в гладких валках (клети *V*, *VI* и *VII*). При разработке калибровки наибольшая неравномерность деформации принимается в первых по ходу прокатки фасонных калибрах. В чистовом калибре предусматривается более равномерная высотная деформация по ширине.

В формирующем фасонном калибре *1* (рис. 72) происходит интенсивное обжатие крайних частей полосы и незначительное обжатие средней части. В следующем калибре *2* неравномерность деформации существенно уменьшается и полоса по своей форме и размерам достаточно близка к готовому профилю. Далее для контроля ширины раскат деформируется в ребровом калибре *3* с вертикальными валками.

Настройка стана должна быть произведена таким образом, чтобы обеспечить беспрепятственный заход тонких частей раската в ребровой предчистовой калибр. Обжатие должно начинаться с тонких частей, а затем на значительно меньшую величину должна деформироваться по ширине и средняя (толстая) часть полосы. Толщина тонкой части реброваго калибра проектируется больше примерно на 1 мм соответствующего размера, задаваемого в ребровой калибр раската. Радиус закругления дна ручья предчистового реброваго калибра в целях предотвращения налипания, плен принимается равным примерно половине толщины тонкой части раската. Коэффициент вытяжки в чистовом калибре обычно незначительный и равен 1,04–1,07.

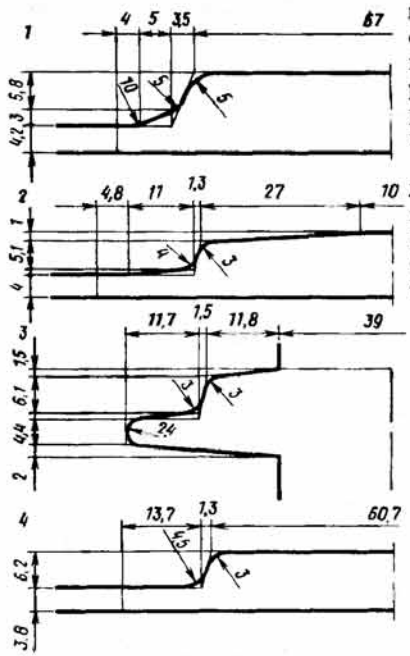


Рис. 72. Калибровка профиля Т-образной рессорной полосы сечением 90/63×10/4 на непрерывном стане 300 – 2 (исходное сечение 83×14,5 мм)

Схемы калибровки рессорных полос постоянно совершенствуются.

При этом наиболее совершенной является, пожалуй, схема всего лишь с двумя фасонными калибрами со свободным уширением. Формирование выступа начинается в предчистовом калибре, а впадина формируется только в чистовом калибре. Такая схема обеспечивает хорошее качество и высокую точность размеров.

3. Экспериментальные исследования формоизменения при прокатке Т-образных профилей

Полосовые Т-образные профили находят широкое применение в электротехническом и станкостроительном машиностроении и прокатываются на специализированных малоклетевых непрерывных станах. Исходная заготовка имеет круглое поперечное сечение и нагрев ее осуществляется в индукционных печах.

При использовании исходной заготовки круглого сечения важное значение имеет определение заполнения первого формирующего калибра.

Экспериментальные исследования при формоизменении заготовок круглого сечения в Т-образных калибрах проведены [2] на полупромышленном стане 300. В соответствии с техническими возможностями стана 300 и на основании анализа сортамента и калибровок Т-образных профилей была выбрана область изменения геометрических параметров (рис. 73):

$$\left.\begin{aligned} &d = 30 \div 70 \text{ мм};\ H_1 = 20 \div 35;\ h_1 = 10 \div 25 \text{ мм};\\ &b_1 = 30 \div 55 \text{ мм};\ D_0 = 280 \text{ мм}, \end{aligned}\right\} \qquad (43)$$

где $D_0 = 0{,}5\ (D_н + D_в)$.

Планируемый эксперимент проводился по ортогональному нейтральному композиционному плану для четырех факторов m_1, m_2, m_3, m_4:

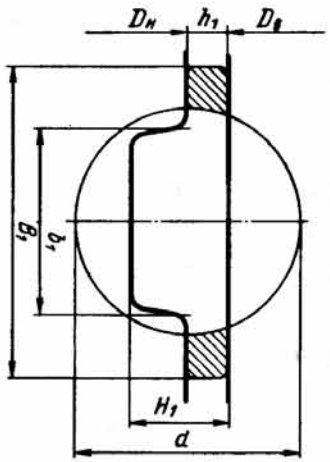


Рис. 73. Схема формоизменения заготовки круглого сечения в Т-образном формирующем калибре

$$m_1 = d/H_1,\ m_2 = h_1/H_1,\ m_3 = b_1/H_1,\ m_4 = D_0/H_1 \qquad (44)$$

с областью изменения

$$\left.\begin{aligned} m_1 &= 1{,}617 \div 2{,}183; \quad m_2 = 0{,}451 \div 0{,}699; \\ m_3 &= 1{,}444 \div 1{,}656; \quad m_4 = 8{,}865 \div 12{,}673 \end{aligned}\right\} \qquad (45)$$

полного факторного эксперимента 2^4 для линейных моделей.

При определении расчетных формул для коэффициента уширения

$$\beta = \Delta B/\Delta h = (B_1 - d)/(d - H_1)$$

и коэффициента вытяжки λ проведена проверка адекватности линейных моделей.

В процессе обработки полученных данных проверены воспроизводимость опытов по критерию Кохрена при 5 % значимости, значимость коэффициентов по критерию Стьюдента при доверительной вероятности 0,95 и адекватность моделей по критерию Фишера при 5 %-ном уровне значимости [11, 13]. В результате проверки получено, что дисперсии однородны и линейные модели адекватны. После отбрасывания незначимых членов уравнения для определения β и λ имеют вид:

$$\beta = 0{,}1593 + 1{,}1743\, m_1 - 0{,}5143\, m_2 - 1{,}2451\, m_3 + \\ + 0{,}0188\, m_4 - 1{,}3681\, m_1 m_2 + 1{,}8489\, m_2 m_3; \qquad (46)$$

$$\lambda = 0{,}6756 + 0{,}7156\, m_1 - 0{,}3621\, m_2 - 0{,}166\, m_3 - 0{,}0087\, m_4. \qquad (47)$$

Формулы использованы при расчете калибровок Т-образных профилей ЭП-4124-537 и ЭП-4125-538, освоение которых проведено на полупромышленном стане 300.

4. Калибровки полосовых симметричных и асимметричных профилей

Череповецкий сталепрокатный завод прокатывает широкий сортамент фасонных профилей, в том числе и фасонных профилей полосового типа. На заводе освоено производство новых профилей, предназначенных для деталей сменного захватывающего элемента к хлопкоуборочным машинам.

Основные требования к этому профилю, изготавливаемому из стали 65Г, заключаются в выполнении размеров по четвертому классу точности, достижении чистоты поверхности по ГОСТ 1051–73, группа Б и обеспечении глубины обезуглероженного слоя не более 0,05 мм.

После анализа 11 технологических схем, применяемых в цехе, выбрали схему исходная заготовка – горячая прокатка – протяжка – готовый профиль как наиболее рациональную для выполнения требований к готовому профилю. Двустадийное получение точного профиля (горячая прокатка фасонной заготовки и чистовая холодная обработка) в настоящее время признается наиболее эффективным.

Цикл получения профиля состоит из следующих основных операций: индукционный нагрев заготовки (квадрат 7,2×7,2 мм с временным сопротивлением 790–840 МПа), горячая прокатка на одноклетевом стане 300 консольного типа, подготовка поверхности к протяжке в неприводных роликах, протяжка в четырехвалковом стане УРС-196 конструкции ВНИИметмаша в два прохода с промежуточными отжигами и подготовкой поверхности, контроль, смазка и упаковка.

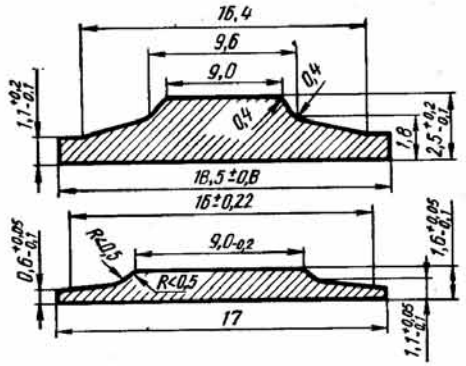


Рис. 74. Размеры подката после горячей прокатки на стане 300 (*а*) и готового профиля ШВ-17×1,5 (*б*) (исходная заготовка квадрат 7,08 мм)

Выполнение требований к точности и чистоте поверхности и по гарантированной минимальной глубине обезуглероженного слоя зависит прежде всего от температурного режима обработки фасонного подката на стане 300, а также от калибровки, состояния рабочего инструмента (валков) и технических возможностей оборудования. Фасонный подкат с формой, близкой к форме готового профиля, получен на стане 300 за один проход (рис. 74) в валках из стали 9Х. На образцах прокатанного металла глубина обезуглероженного слоя не превышала 0,065 мм, а свойства были следующими: $\sigma_в$ = 650÷840 МПа, δ = 2,4÷5,4 % и 207 НВ.

Первые опыты такой прокатки были неудовлетворительны – наблюдались случаи поломки верхнего валка и смятие ручья калибра; качество поверхности тоже не соответствовало требованиям – имелись отпечатки сетки разгара, а точность размеров была невысокой. Разгар поверхности калибра обнаружен уже на первом опытном бунте массой 30 кг (всего в первой опытной партии прокатали около 500 кг в восьми бунтах). Сетка разгара интенсивно увеличивалась около 500 кг в восьми бунтах). Сетка разгара интенсивно увеличивалась от бунта к бунту и особенно на верхнем валке. Исследование выявило влияние микротрещин, образовавшихся при изготовлении валка, на усиление сетки разгара. Поверхность калибра валка постоянно подвергается температурным колебаниям. В результате импульсного нагрева горячей полосой и охлаждения водой в теле валка возникает температурный градиент, который вызывает остаточные напряжения растяжения в поверхностном слое валка при охлаждении. Это приводит к постоянному разрыхлению материала у поверхности трения и усталостному разрушению в результате образования микротрещин. Срок службы калибра значительно повысился при изменении режима охлаждения валков и предотвращении попадания воды в очаг деформации. В результате анализа опытной прокатки выявлено ощутимое влияние материала валков на качество поверхности, в особенности для высокоуглеродистых сталей. Применение валков из стали 50ХН, корректировка калибровки, изменение температуры прокатки и правильный режим охлаждения валков позволили получать профиль с гарантированным качеством.

На сортовом стане 500 ММК освоено производство полосовых желобчатых профилей 180×18×6 мм и 180×12×6 мм из стали 65Г для лемехов автогрейдеров. Допускаемые отклонения по ширине +2÷–4 мм, по толщине ±0,8 мм и по кромкам профиля +1÷–2 мм. При проектировании калибровки профиля ножевой стали сечением 180×12×6 мм рассмотрены две типовые схемы: прокатка в открытых калибрах со свободным уширением и в закрытых калибрах со стесненным уширением. Для условий стана 500 приняли вторую схему (рис. 75),

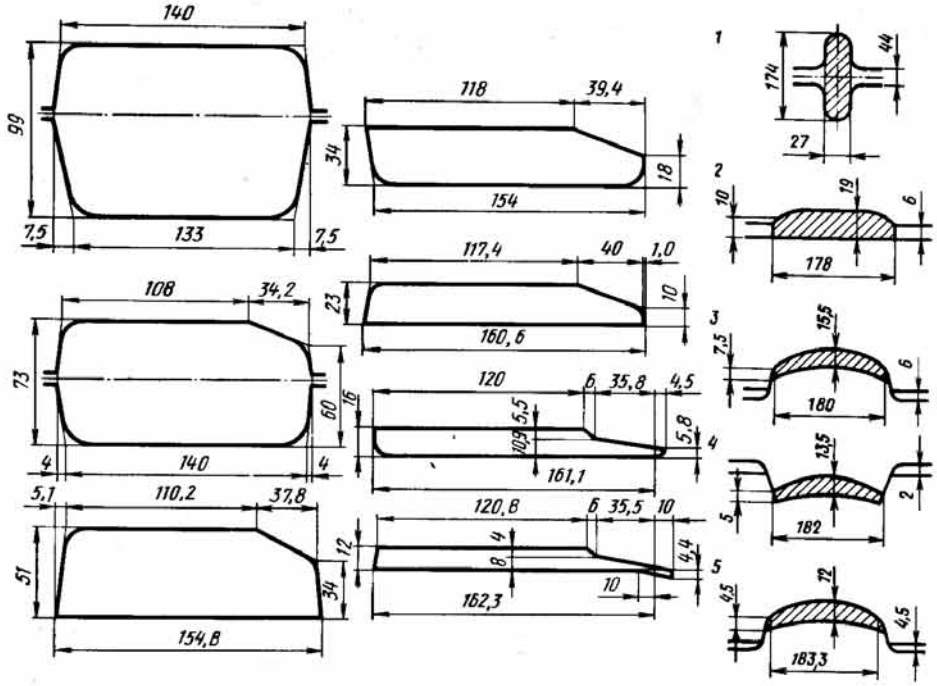


Рис. 75. Схема прокатки ножевой стали сечением 180×12×6 мм

Рис. 76. Калибровка профиля лемеха-плоскореза сечением 160×12×3 мм

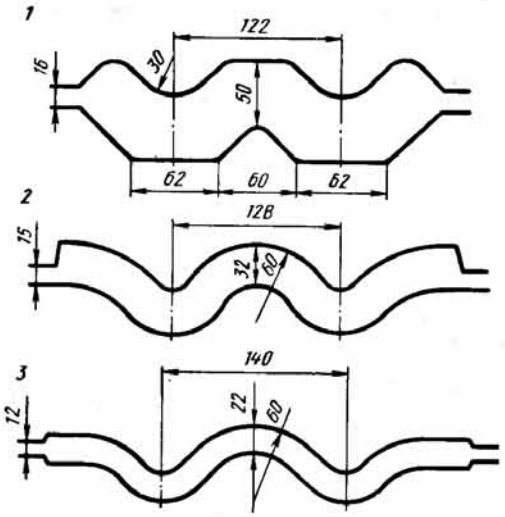


Рис. 77. Калибровка ленты 260–270×9 мм с использованием разгонных калибров

Продолжение рис. 77

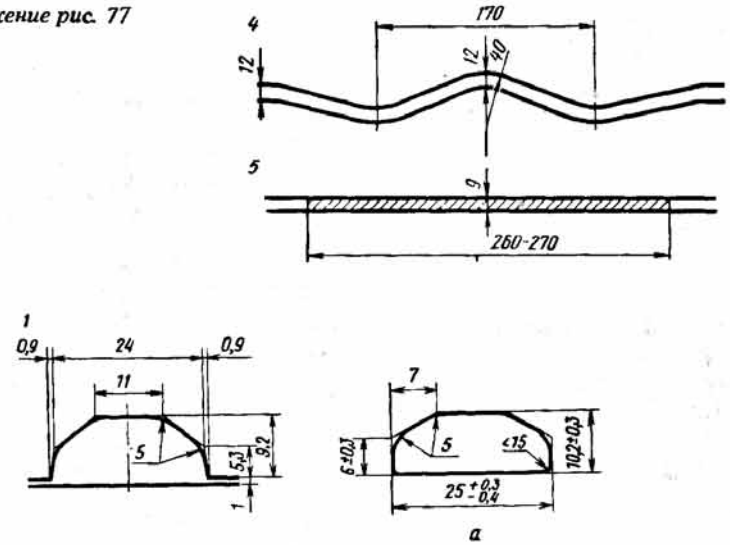


Рис. 78. Калибровка полосового профиля № 360 на шестиклетевом стане 300 (исходное сечение – круг 19 мм; *а* – готовый профиль)

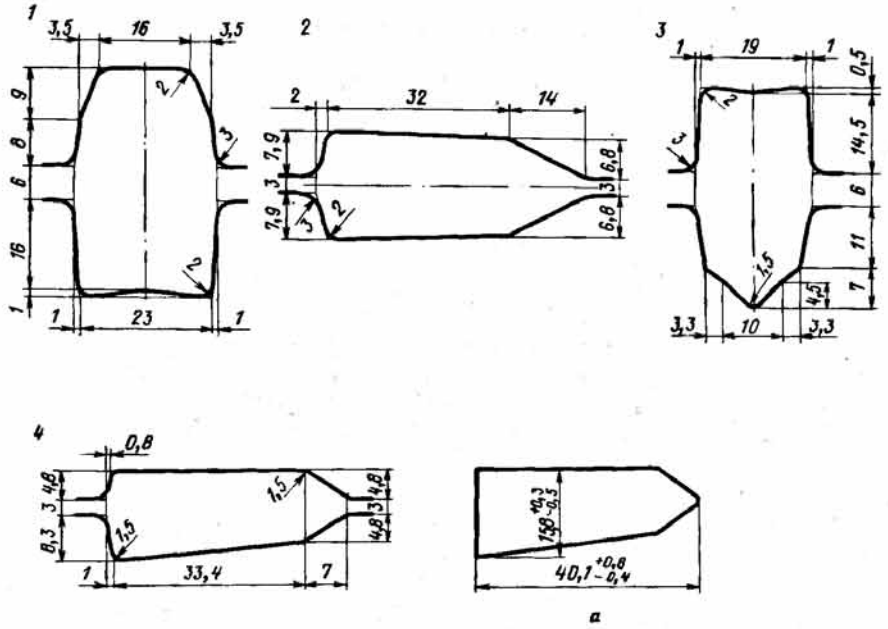


Рис. 79. Калибровка клиновидного профиля № 53 на линейном стане 180 (исходное сечение 50×22 мм; *а* – готовый профиль)

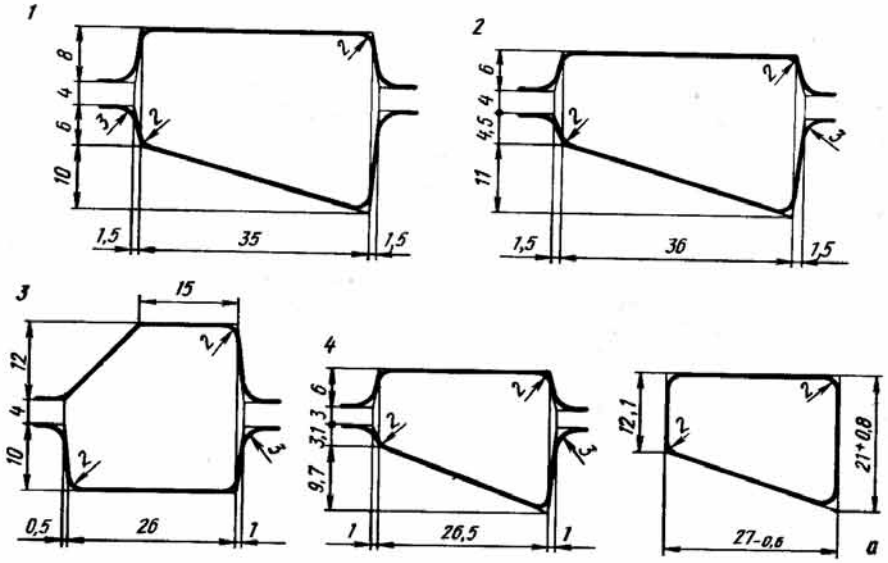


Рис. 80. Калибровка клиновидного профиля сечением 27×21×12,1 мм на линейном стане 180 (исходное сечение 30×30 мм; *а* – готовый профиль)

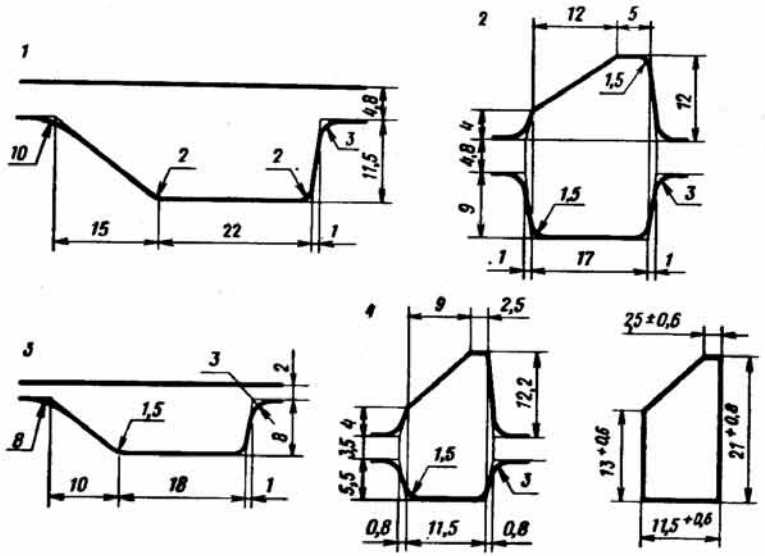


Рис. 81. Калибровка клиновидного профиля сечением 21×11,5×2,5 мм на линейном стане 180 (исходное сечение 30×20 мм; *а* – готовый профиль)

обеспечивающую легкость настройки стана, стабильность прокатки и точность размеров готового профиля.

Общие и частные коэффициенты деформации выбирали на основании практических данных с учетом следующих положений:

наибольшая неравномерность деформации по ширине профиля осуществляется в первом фасонном калибре;

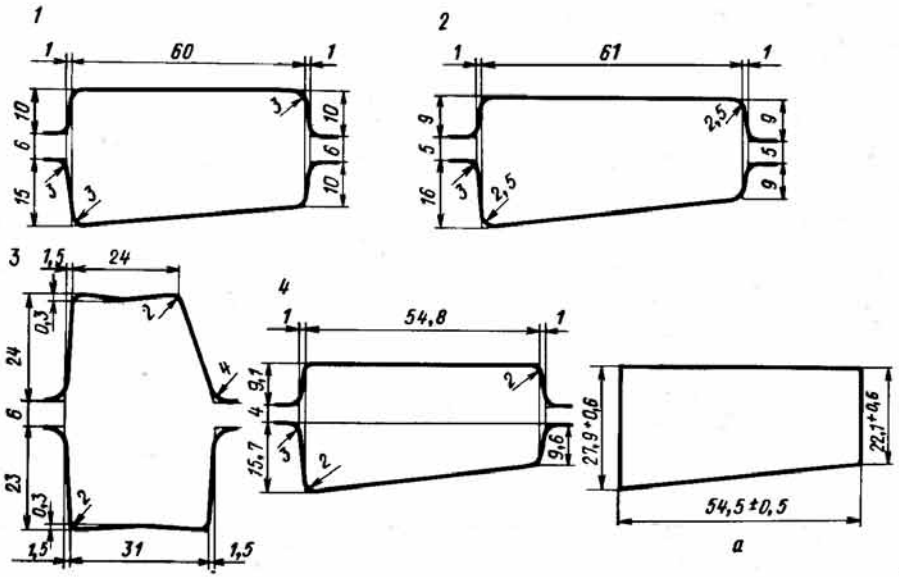


Рис. 82. Калибровка клиновидного профиля сечением 54,5×27,9×22,1 мм на двухклетевом стане 180 (исходное сечение 55×32 мм; *а* – готовый профиль

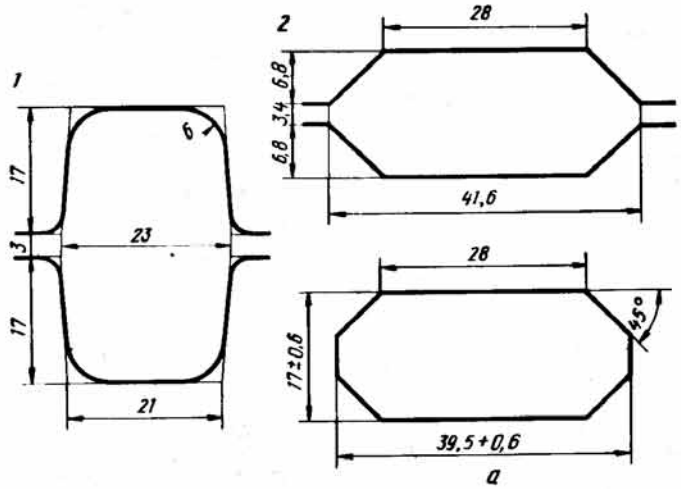


Рис. 83. Калибровка полосового профиля сечением 39,5×17 мм со скошенными углами на линейном стане 180 (исходное сечение 45×20 мм; *а* – готовый профиль)

по мере приближения к чистовому калибру разница между коэффициентами обжатия по краям и средней частью профиля уменьшается;

в чистовом калибре величины коэффициентов обжатия по краям и середине профиля принимаются одинаковыми;

свободное уширение рассчитывается по формуле Б.П. Бахтинова. В закрытых калибрах уширение принимается равным 0,7–0,8 от свободного.

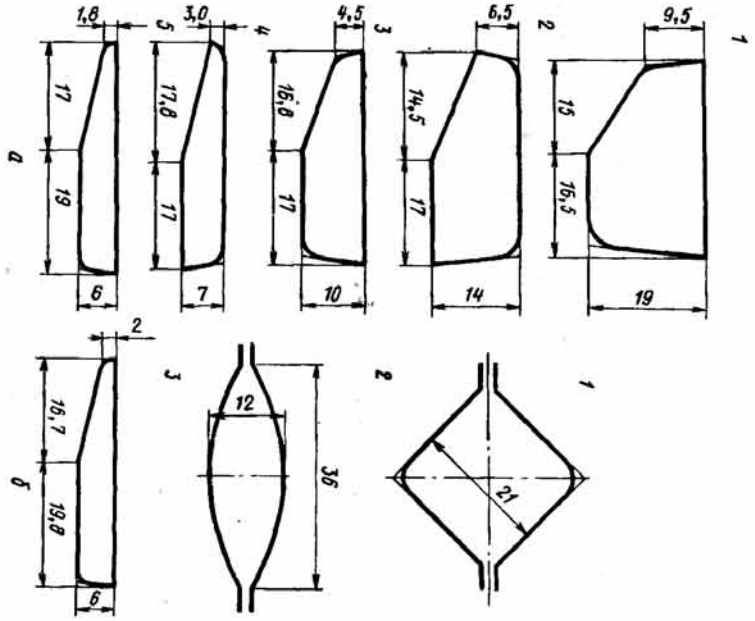


Рис. 84. Калибровка штанцевого профиля № 4 на линейном стане 265: *а* – первый вариант; *б* – второй вариант

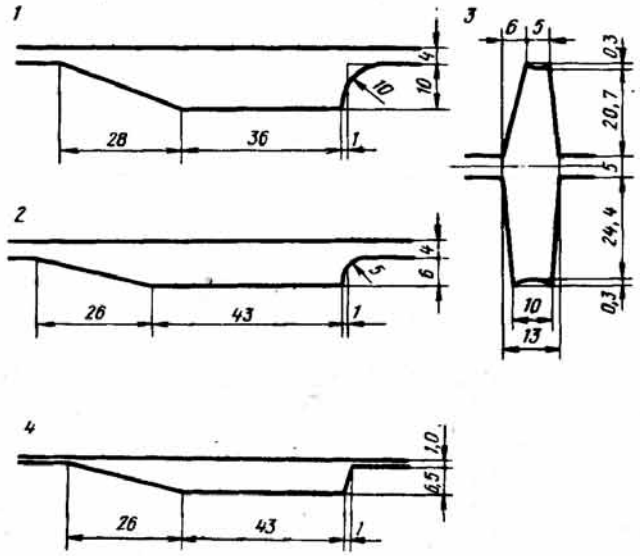


Рис. 85. Калибровка профиля для обувной промышленности из сталей марок У7–У13 и У7А–У13А на линейном стане 450 (*а* – готовый профиль)

Продолжение рис. 85

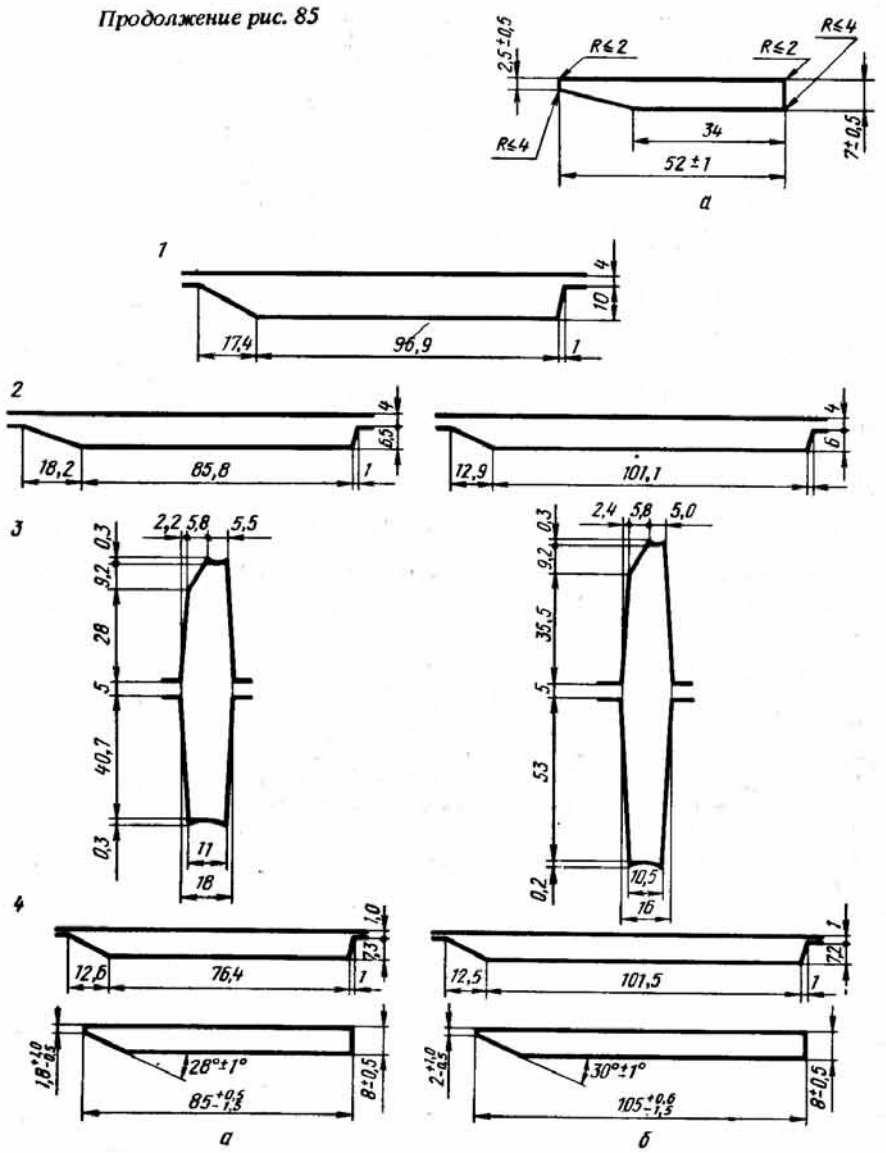


Рис. 86. Калибровка профиля сечением 85×8×1,8 мм (*а*) для деталей сельскохозяйственных машин из стали марки 65Г и профиля сечением 105×8×2 мм (*б*) для ножей режущих машин силосоуборочных комбайнов из стали марки 65Г и 70Г на линейном стане 450

По аналогичной схеме прокатан также профиль сечением 180×18×6 мм. Отклонения фактических значений параметров прокатки от расчетных незначительны. Выход первого сорта составил 99,5 %, средняя производительность 105 т/ч.

На рис. 76 показана схема прокатки лемеха-плоскореза сечением 160×12×3 мм за семь проходов на стане 450 Кузнецкого металлургического комби-

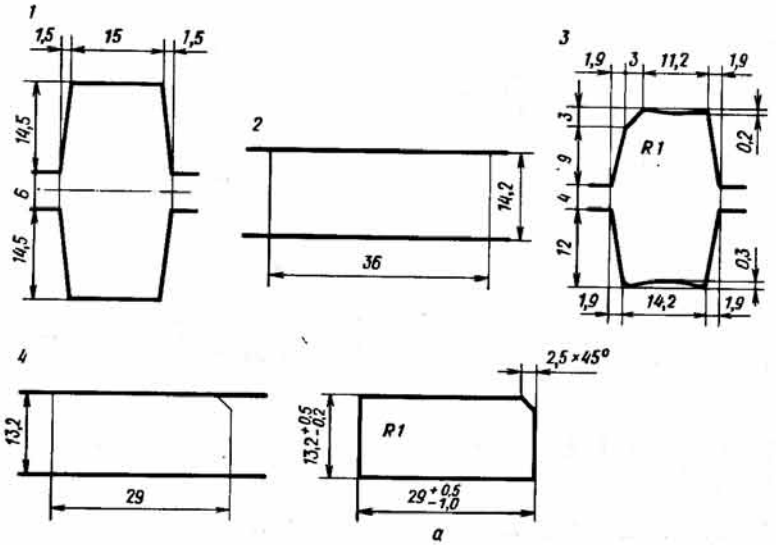


Рис. 87. Калибровка полосового профиля сечением 29×13,2 мм со скошенным углом на стане 300 (исходное сечение 43,5×15 мм; *а* – готовый профиль)

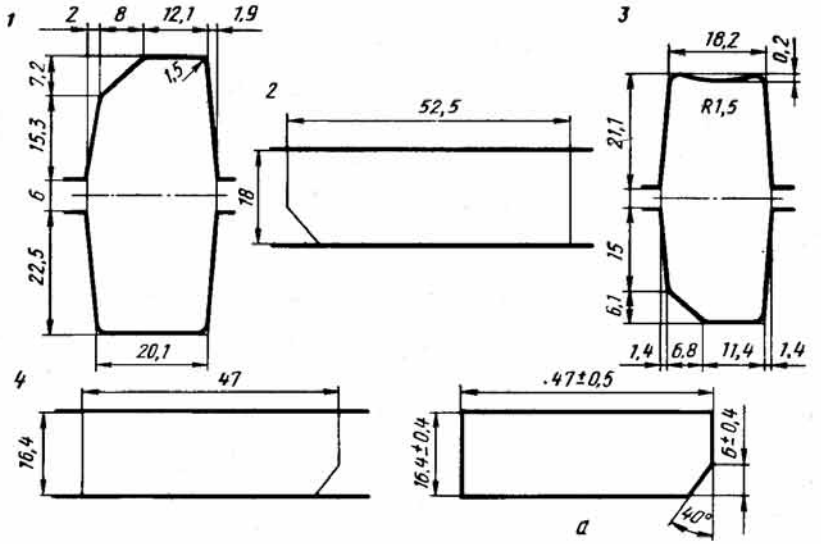


Рис. 88. Калибровка полосового профиля сечением 47×16,4 мм со скошенным углом на стане 300 (исходное сечение 58×20 мм; *а* – готовый профиль)

ната. Схема прокатки профиля сечением 125×12×8×3 мм подобна предыдущей. Применение ручного труда на стане 450 не позволило использовать ребровой калибр при прокатке этих профилей. Однако допуск на ширину не позволяет получать профиль заданной ширины даже при значительных колебаниях температуры прокатки, а оформление кромок профиля допускается произвольным.

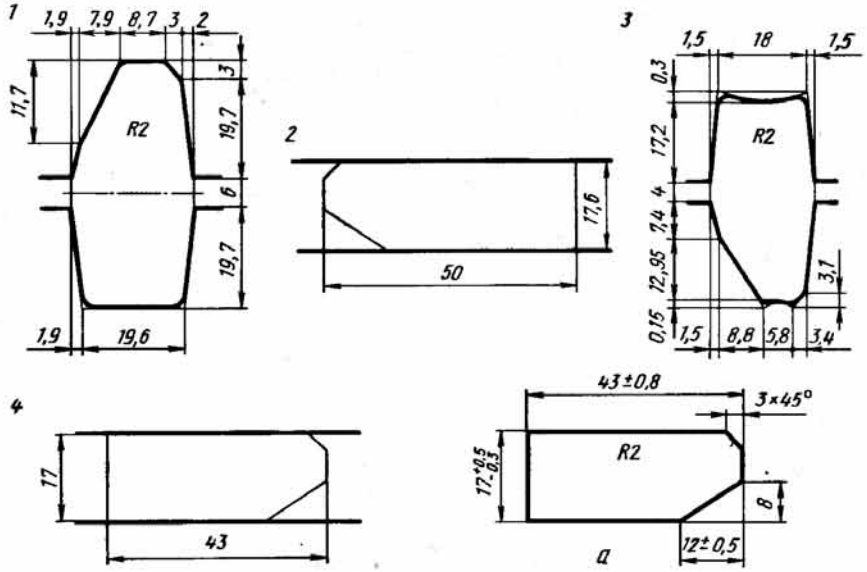


Рис. 89. Калибровка полосового профиля сечением 43×17 мм со скошенными углами на стане 300 (исходное сечение 58×19 мм; *а* – готовый профиль)

Неравномерность деформации по кромкам профиля почти не отражается на прямолинейности выхода полосы из валков. В чистовом калибре, чтобы гарантировать нормальный выход полосы, относительные высотные обжатия по кромкам приняты одинаковыми. Профилированные профили для лемехов-плоскорезов являются экономичными и нет необходимости в обработке их на фрезерных станках.

На рис. 77–89 приведены представляющие интерес калибровки фасонных полосовых профилей.

Глава 5.

ПРОФИЛИ С КЛИНОВИДНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

1. Сортамент и схемы прокатки

Полосовые профили клиновидной формы относятся [2] к одной из четырех групп: асимметричные профили, профили клиновидной формы с горизонтальной осью, клиновидные асимметричные профили и асимметричные профили с клиновидными утолщениями. Основной особенностью прокатки полосовых профилей, в том числе и клиновидных, является использование пластовых проходов и в большинстве случаев отсутствие ребровых контрольных калибров. Последнее связано с тем обстоятельством, что наиболее распространены полосовые профили с отношением ширины к высоте ≥ 5, и их прокатка ввиду сравнительно небольших партий проводится на станах с линейным расположением клетей. Применение же ребровых калибров на линейных станах приводит к затруднениям, особенно при прокатке крупных профилей, так как связано с кантовками прокатываемых полос. При наличии клетей с вертикальными валками или кантователей, безусловно, целесообразно использовать контрольные ребровые калибры.

Полосовые асимметричные профили не имеют осей симметрии и обычно состоят из участка прямоугольной формы с примыкающим к нему клиновидным участком. При этом клиновидные участки могут быть расположены с обеих сторон профиля.

Прокатка профилей клиновидной формы с горизонтальной осью симметрии обычно сопровождается искривлением полосы в горизонтальной плоскости (серпением) и скручиванием. На серпение и скручивание заметно влияет разница коэффициентов высотной деформации, различие температуры металла в тонкой и толстой частях профиля, неравномерность износа калибров и неодинаковые давления и скорость валков. Для обеспечения устойчивой прокатки таких профилей и прямолинейного выхода полосы из валков калибрам стараются придать такую форму и расположение, которые по возможности обеспечивали бы одинаковую разность катающих диаметров по кромкам профиля.

Как показали исследования авторов, для устранения серпения универсальным средством является применение сквозной линейки (рис. 49). Чтобы исключить скручивание клиновидных полос в случае их большой ширины и малой толщины, следует между нижней и верхней проводками и поверхностью прокатываемой клиновидной полосы допускать возможно меньший зазор, а иногда даже предусматривать жесткое соединение между собой нижней и верхней проводок. Если есть опасность образования царапин и задиров, то следует применять роликовые линейки и проводки.

Что касается режима обжатий по проходам, то, как всегда, следует предусматривать неравномерную деформацию в первых по ходу прокатки калибрах, а в чистовом калибре, как правило, неравномерная деформация по ширине калибра должна быть исключена.

Для полосовых профилей клиновидной формы с горизонтальной осью симметрии чаще всего используется схема прокатки в открытых калибрах со свободным уширением. При этом обязательно предусматривается контрольный проход в ребровом черновом (рис. 90) или предчистовом (рис. 91) калибрах.

Схемы эти примерно одинаковы, хотя каждая из них имеет все-таки свои особенности. По схеме с черновым ребровым калибром при нормальном процес-

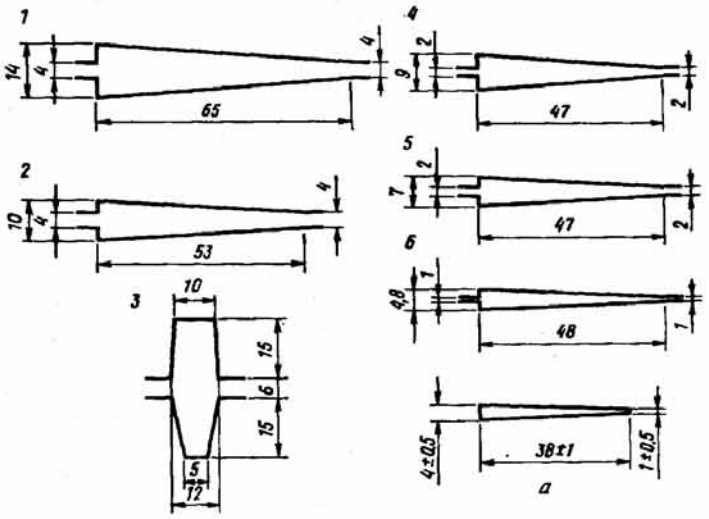


Рис. 90. Калибровка профиля сечения 38×4×1 мм клина топора из стали марки 10 на линейном стане 280–1; *а* – готовый профиль

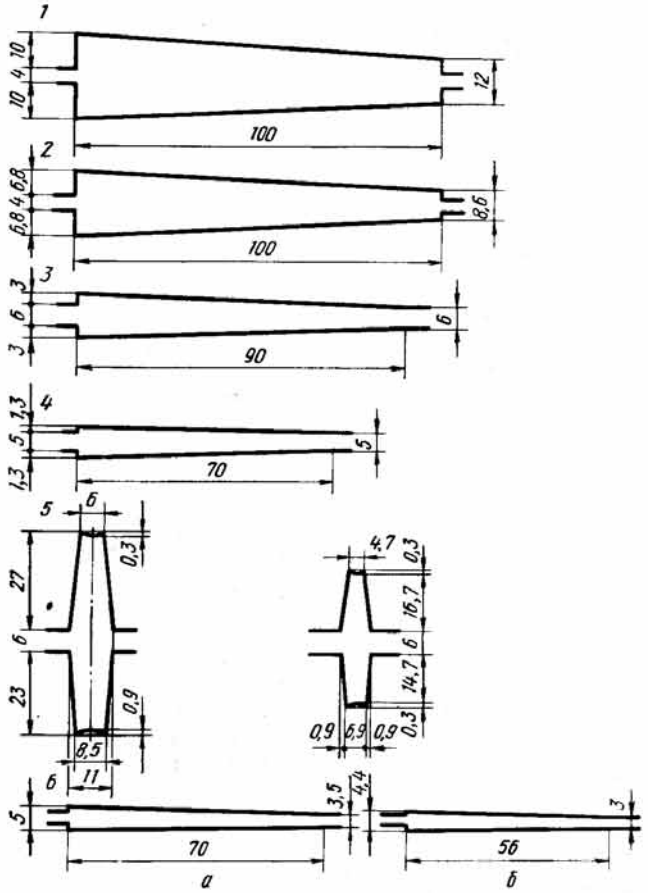


Рис. 91. Калибровка профилей сечением 58×5×3,5 мм (*а*) и 40×4×3 мм (*б*) для лезвий коньков на линейном стане 280–7

се прокатки без искривлений и скручивания несколько труднее контролировать уширение и вследствие колебаний условий прокатки будет иметь место и колебание величины уширения. Но в то же время при тонких и широких клиновидных полосах по второй схеме полоса в предчистовом ребровом калибре будет занимать неустойчивое положение, вследствие чего также будет наблюдаться колебание уширения, а следовательно, и ширины полосы.

Используются также и схемы с применением закрытых и полузакрытых калибров.

Полосовые клиновидные асимметричные профили обычно более массивные (значительно большее отношение толщины к ширине), чем симметричные. Для прокатки асимметричных клиновидных профилей можно выделить три характерных типа схем прокатки:

прокатка в закрытых калибрах (рис. 92);

прокатка в закрытых калибрах с ребровым контрольным калибром (рис. 93), в качестве чистового по этой схеме иногда применяется диагональный калибр (рис. 94);

прокатка в открытых калибрах (рис. 95).

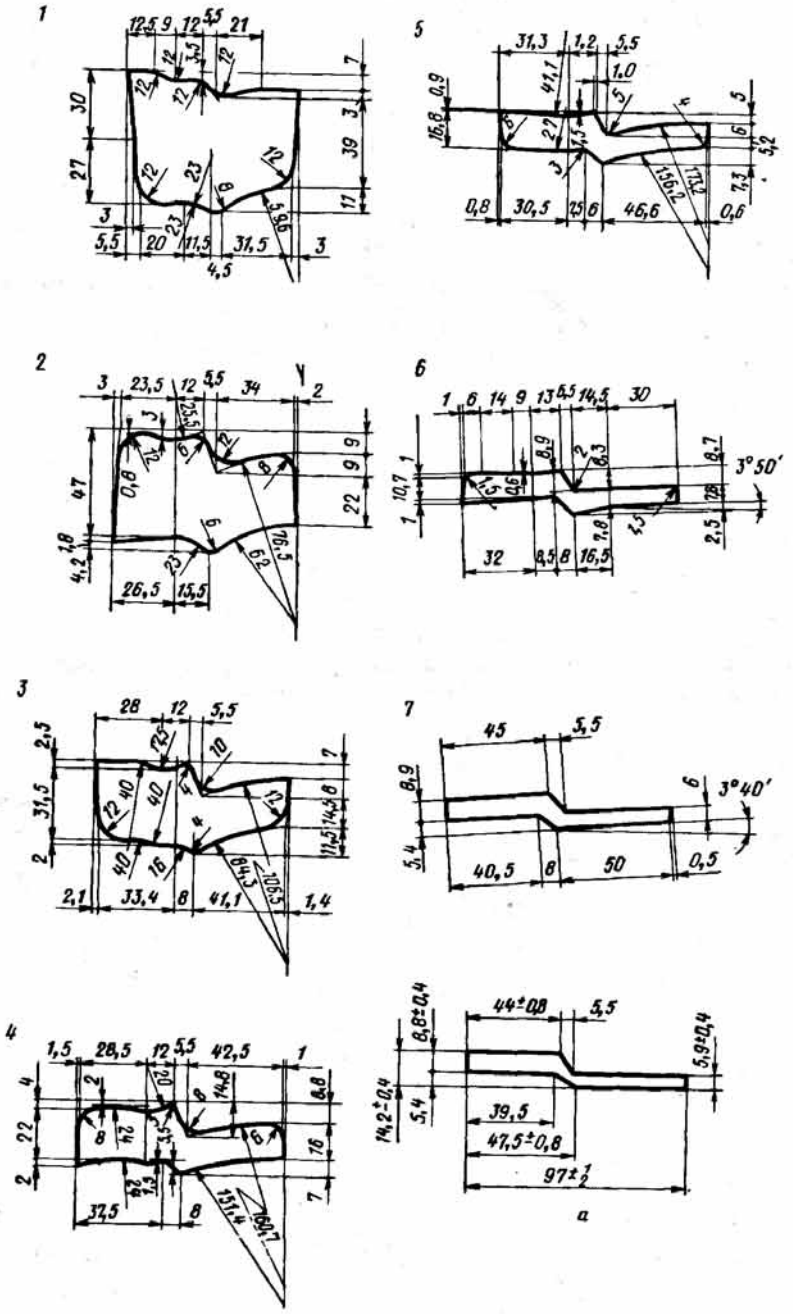


Рис. 92. Калибровка профиля для свеклорезных ножей на линейном стане 450 (исходное сечение 69×69 мм); *а* – готовый профиль)

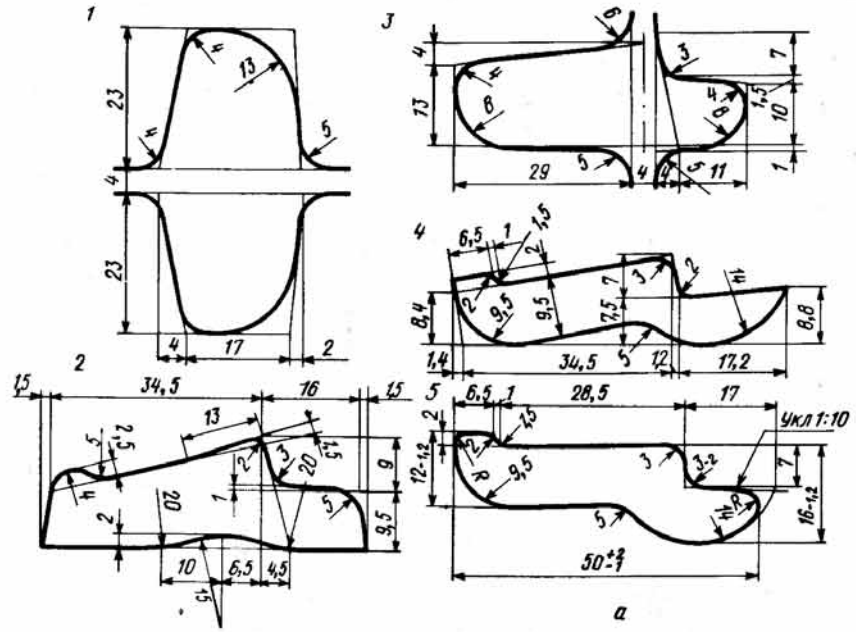


Рис. 93. Калибровка профиля прижима лифтовых направляющих на комбинированном полунепрерывном стане 250 (исходное сечение 58×17 мм; *а* – готовый профиль)

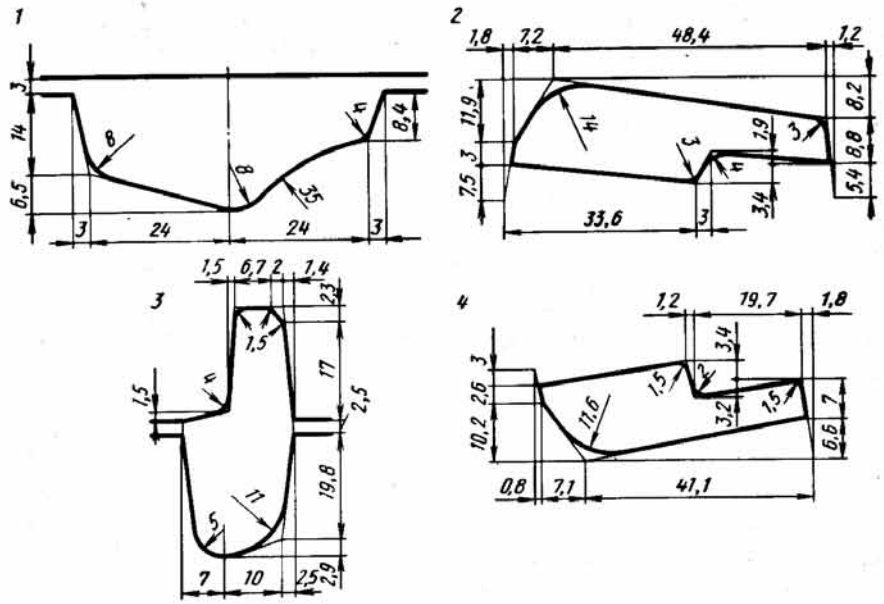


Рис. 94. Калибровка профиля № 157 на стане 300 (исходное сечение – ребровой овал 38×46 мм)

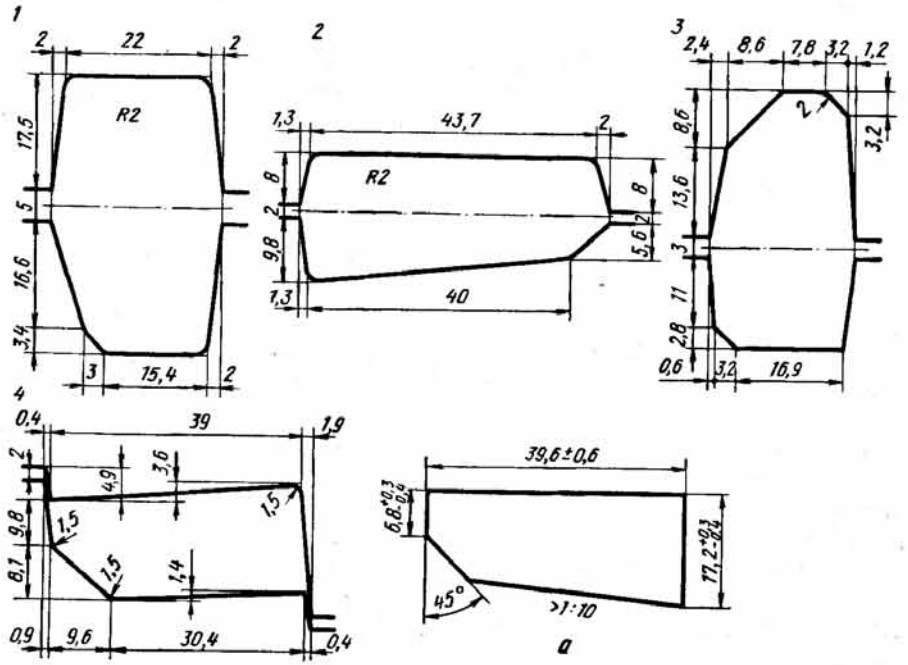


Рис. 95. Калибровка асимметричного клиновидного профиля сечением 39,6×17,2×6,8 мм на стане 300 (исходное сечение 52×21,5 мм; *а* – готовый профиль)

Для чистового калибра можно использовать диагональное расположение, как это принято на приведенной на рис. 95 схеме, или же чистовой калибр может быть открытым или закрытым.

2. Экспериментальные исследования формоизменения при прокатке клиновидных профилей

Экспериментальные исследования формоизменения с целью определения коэффициентов вытяжки $\lambda = L_1/L_0$ и уширения $\beta = B_1/B_0$ выполнены на современном опытнопромышленном четырехклетевом стане 400 с последовательным расположением клетей. Привод каждой клети индивидуальный от асинхронных электродвигателей типа А114-6М мощностью 320 кВт и частотой вращения 985 об/мин, шестеренные клети комбинированные с двухступенчатыми редукторами при передаточном числе 19,25, скорость прокатки 0,94 м/с, валки бандажированные, материал валков – сталь 45. Образцы длиной 300–350 мм изготавливали из стали МСт3. Нагрев образцов до 1100 °С осуществлялся в электропечи СНЗ–8.16.5/12М1 с установленной мощностью $71^{+7,1}$ кВт. Номинальная температура печи 1200 °С, напряжение питающей сети 380 В, число фаз 3.

Для определения формоизменения проведены две серии планируемых опытов (рис. 96) из прямоугольной заготовки (*а*) и из заготовки круглого сечения (*б*).

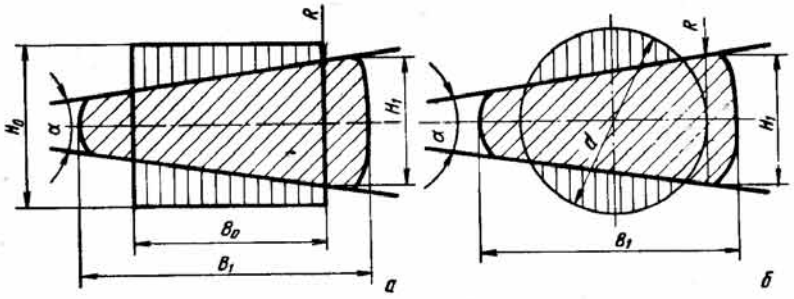


Рис. 96. Схема очага деформации при прокатке клиновидных профилей: *а* – из заготовки прямоугольного сечения; *б* – из заготовки круглого сечения

В качестве плана эксперимента использован полный факторный эксперимент с числом экспериментальных точек: для прямоугольной исходной заготовки $N = 2^4 = 16$, для круглой исходной заготовки $N = 2^3 = 8$.

Пределы значений геометрических размеров определены на основании анализа действующих калибровок и технических возможностей стана 400 и соответственно для прямоугольной и круглой заготовки равны:

$$\left.\begin{array}{l} 30\ \text{мм} \leqslant H_0 \leqslant 50\ \text{мм};\quad 25\ \text{мм} \leqslant B_0 \leqslant 66\ \text{мм}; \\ 20\ \text{мм} \leqslant H_1 \leqslant 45{,}5\ \text{мм};\quad 10^\circ \leqslant \alpha \leqslant 20^\circ \end{array}\right\} \qquad (48)$$

$$\left.\begin{array}{l} 30\ \text{мм} \leqslant d \leqslant 60\ \text{мм};\quad 20\ \text{мм} \leqslant H_1 \leqslant 54{,}5\ \text{мм}; \\ 10^\circ \leqslant \alpha \leqslant 20^\circ. \end{array}\right\} \qquad (49)$$

Радиусы нижнего и верхнего валков приняты постоянными и равными 175 мм.

Из параметров очага деформации образованы безразмерные относительные параметры

для прямоугольной заготовки

$$m_1 = H_0/H_1,\ m_2 = \operatorname{tg}\alpha,\ m_3 = H_0/R,\ m_4 = H_0/B_0; \qquad (50)$$

для круглой заготовки

$$m_1 = d/H_1,\ m_2 = \operatorname{tg}\alpha,\ m_3 = d/R. \qquad (51)$$

Параметры m_i являются варьируемыми и определяют собой область факторного пространства.

Из условий (48) и (49) при $R = 175$ мм определены пределы изменения безразмерных относительных параметров:

для прямоугольной заготовки

$$\left.\begin{array}{l} 1{,}1 \leqslant m_1 \leqslant 1{,}5;\quad 0{,}176 \leqslant m_2 \leqslant 0{,}364; \\ 0{,}2 \leqslant m_3 \leqslant 0{,}4;\quad 0{,}75 \leqslant m_4 \leqslant 1{,}2 \end{array}\right\} \qquad (52)$$

для круглой заготовки

$$\left.\begin{aligned} &1{,}1 \leqslant m_1 \leqslant 1{,}5; \quad 0{,}176 \leqslant m_2 \leqslant 0{,}364; \\ &0{,}17 \leqslant m_3 \leqslant 0{,}34. \end{aligned}\right\} \qquad (53)$$

Кодированные переменные x_i и параметры m_i связаны зависимостями

для прямоугольной заготовки

$$\left.\begin{aligned} &x_1 = 5\,m_1 - 6{,}5; \quad x_2 = 10{,}638\,m_2 - 2{,}873; \\ &x_3 = 10\,m_3 - 3; \quad x_4 = 4{,}444\,m_4 - 4{,}333 \end{aligned}\right\} \qquad (54)$$

для круглой заготовки

$$\left.\begin{aligned} &x_1 = 5\,m_1 - 6{,}5; \quad x_2 = 10{,}638\,m_2 - 2{,}873; \\ &x_3 = 11{,}76\,m_3 - 2{,}999. \end{aligned}\right\} \qquad (55)$$

Определение геометрических размеров образцов до и после прокатки и обработка результатов планируемого эксперимента проведены на основании экспериментальных данных по методике, указанной в работе [11].

Окончательные формулы для определения коэффициентов вытяжки и уширения после отбрасывания незначимых слагаемых имеют вид:

для прямоугольной заготовки

$$\lambda = 2{,}59 - 1{,}15\,m_1 - 3{,}08\,m_2 + 0{,}710\,m_3 - 0{,}916\,m_4 + 3{,}06\,m_1m_2 - 0{,}125\,m_1m_3 + 0{,}694\,m_1m_4 - 0{,}532\,m_2m_3 - 0{,}650\,m_2m_4 - 0{,}0555\,m_3m_4, \quad \epsilon = 6{,}5\ \%; \qquad (56)$$

$$\beta = 1{,}47 - 0{,}600\,m_1 + 0{,}152\,m_2 + 2{,}34\,m_3 - 1{,}10\,m_4 + 0{,}499\,m_1m_2 - 1{,}16\,m_1m_3 + 1{,}21\,m_1m_4 + 0{,}465\,m_2m_3 - 0{,}384\,m_2m_4 - 1{,}03\,m_3m_4, \quad \epsilon = 2{,}5\ \%; \qquad (57)$$

для круглой заготовки

$$\lambda = 0{,}812 + 0{,}298\,m_1 - 0{,}226\,m_2 - 1{,}091\,m_3 - 0{,}133\,m_1m_2 + 0{,}588\,m_1m_3 + 2{,}19\,m_2m_3, \quad \epsilon = 1{,}3\ \%; \qquad (58)$$

$$\beta = -0{,}240 + 1{,}23\,m_1 + 0{,}745\,m_2 + 1{,}40\,m_3 - 0{,}798\,m_1m_2 - 1{,}76\,m_1m_3 + 1{,}88\,m_2m_3, \quad \epsilon = 1{,}9\ \%. \qquad (59)$$

3. Прокатка клиновидных профилей

К группе клиновидных асимметричных профилей относятся штанцевые профили сечением 25×6×2 мм и 35×6×2 мм из инструментальной стали У7–У10. Эти профили освоены на мелкосортном линейном стане 265. По первоначальному варианту (рис. 97, *а*) штанцевый профиль сечением 25×6×2 мм прокатывался из квадрата 17,7×17,7 мм в четырех закрытых фасонных калибрах. Основным недостатком калибровки являлась значительная неравномерная деформация по ширине полосы в первом фасонном калибре. Коэффициент обжатия носка полосы превышал почти в три раза коэффициент обжатия толстой части, что приводило к сваливанию полосы в калибре, ее изгибу и скручиванию. Клиновидная форма калибра *1* приводит к смещению задаваемой полосы в сторону толстой части. При этом зачастую наблюдалось переполнение в разъеме калибра с левой стороны, которое приводило к закату. Опасность переполнения с последующим образованием закатов существовала и в остальных калибрах закрытого типа. Наличие сравнительно узкого и острого гребня, образующего скос в калибрах *1* и *3*, обусловило применение нижних стальных валков.

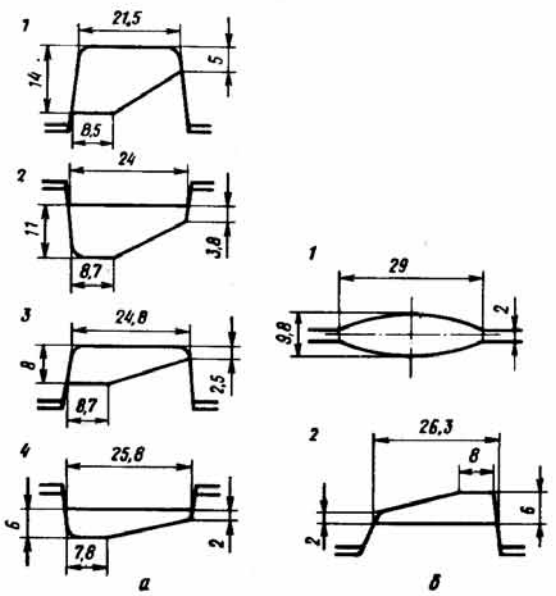


Рис. 97. Схема прокатки штанцевого профиля сечением 25×6×2 мм: *а* – первоначальная калибровка; *б* – усовершенствованная калибровка

В целях совершенствования калибровки, повышения технологичности и сокращения времени на перевалки валков применили новую схему прокатки (рис. 97, *б*) из квадратной полосы 15,5×15,5 мм. Прокатку в предчистовом калибре проводят со смещением вводных пропусков в сторону носка профиля. В результате получается так называемый односторонний свал и почти равномерное обжатие по ширине.

С применением калибров простой формы нет необходимости в специальных валках для штанцевого профиля, сократился парк валков и уменьшились потери времени на перевалку. Производительность стана увеличилась на 15–17 %. Аналогичные изменения внесены и в схему прокатки штанцевого профиля сечением 35×6×2 мм при сокращении числа фасонных калибров с пяти до двух.

Для дальнейшего усовершенствования калибровки штанцевого профиля сечением 25×6×2 мм предпринята попытка заменить закрытый чистовой калибр на открытый со свободным уширением. Однако проведенные испытания не дали положительных результатов, так как в открытом клинообразном калибре точная фиксация полосы в поперечном направлении затруднительна и вследствие этого на готовом профиле невозможно соблюдать точные размеры по ширине профиля и толщине носка.

На рис. 98 приведена калибровка асимметричного профиля сечением 35×132 мм, освоенного на линейном четырехклетевом стане 500. Характерными особенностями профиля сечением 35×132 мм являются значительная разница в толщине боковых кромок, утолщение средней части и скос на правой кромке профиля под углом 45° с обязательным выполнением угла в 3° над скосом.

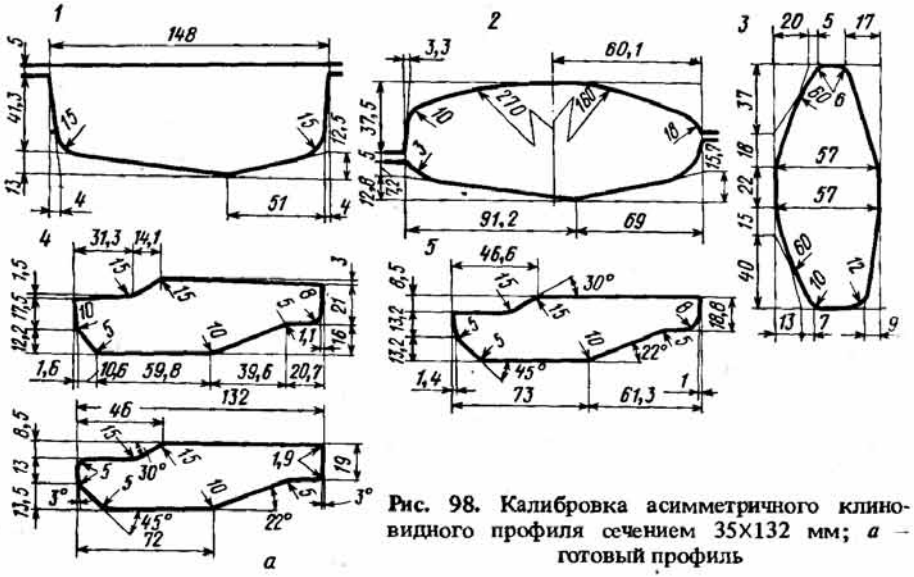


Рис. 98. Калибровка асимметричного клиновидного профиля сечением 35×132 мм; *а* – готовый профиль

Принятая первоначально схема прокатки с чередующимися разъемами калибров оказалась неудачной. В чистовом калибре разъемы были выполнены сверху, а предчистовой калибр принят полузакрытым с левой стороны. При такой форме предчистового калибра необходим специальный шаблон для контроля степени заполнения калибра в процессе прокатки. В схеме предусмотрены два контрольных ребровых калибра, применение которых требует кантовок полосы и снижает производительность стана.

Более совершенной схемой прокатки является схема с одним контрольным калибром (рис. 98). В предчистовом и чистовом калибрах разъем выполнен в одну и ту же сторону. Такая конструкция двух последних калибров встречается и при прокатке других профилей. Настройка стана по данной схеме достаточно проста, так как по существу имеются только два калибра сложной формы (калибры *4* и *5*).

Следует заметить, что обе рассмотренные схемы с точки зрения получения профиля не являются совершенными. Ребровой контрольный калибр более целесообразно располагать перед чистовым калибром. Однако стан 500 состоит из трех трехвалковых клетей, поэтому если контрольным сделать предчистовой калибр, то он будет располагаться в среднем и верхнем валках. Но тогда неудобна и затруднительна не только кантовка полосы, но и задача полосы в контрольный калибр. Вследствие этого для трехвалковых клетей линейных станов контрольные ребровые калибры для полосовых профилей обычно располагают в нижнем и среднем валках, что обеспечивает удобство в работе и рациональность технологии прокатки. На современных станах с двухвалковыми клетями последний по ходу прокатки контрольный калибр, размещается, как правило, перед чистовым калибром [2].

Профиль для сит отсадочных машин (рис. 99, *а*) несколько напоминает по форме клиновидный профиль сечением 35×132 мм. Особенностью профиля является несимметричность сечения, обусловленная большой разностью высот левой и правой частей. Профиль прокатывается [2] на линейном стане 250 в пяти фасонных калибрах из полосы сечением 16×40 мм.

Суммарный коэффициент высотного обжатия для клетей *II*, *III* и *V* в сечении *I–I* (рис. 99, *а*) составляет 5,5 и в сечениях *III–III* и *IV–IV* соответственно 2,3

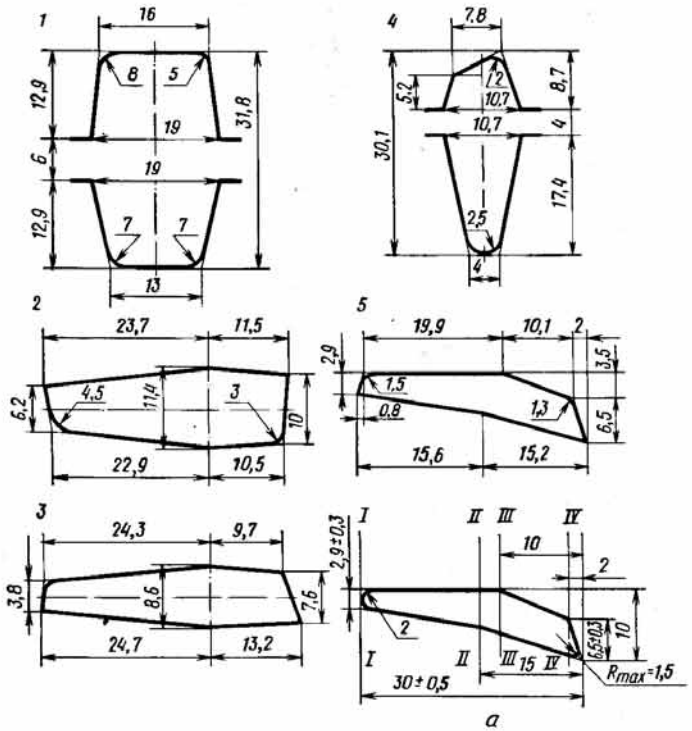


Рис. 99. Калибровка профиля для сит отсадочных машин; *а* – готовый профиль

и 2,7. Такая значительная неравномерность деформации может привести к серпению и скручиванию полосы при прокатке.

Чтобы уменьшить влияние разницы в относительных удлинениях левой и правой частей профиля на процесс прокатки, приняты увеличенные обжатия во всех пластовых калибрах, включая чистовой. Наибольшая разность коэффициентов обжатия предусмотрена в калибрах клетей *II* и *III*; в чистовом калибре деформация практически равномерна по всем элементам профиля.

Для обеспечения надежного контроля ширины профиля имеются два ребровых калибра, наличие которых в сочетании с чередованием разъемов в закрытых калибрах обеспечивает качественную поверхность кромок.

Лемешная сталь с местным магазином № 132Д (рис. 100) прокатывается на среднесортном стане, расположенном в две линии. Одна линия состоит из обжимной клети 640 мм с электромотором мощностью 1100 кВт. Валки вращаются со скоростью 90 об/мин. Вторая линия состоит из трех клетей диаметром 500 мм, приводимых в действие электромотором мощностью 590 кВт. Скорость вращения валков 120–130 об/мин.

Металл нагревается в двух двухрядных методических печах, с боковой выдачей металла, отапливаемых газом. Для изготовления лемехов применяется сталь марок Л-53 и Л-65 следующего химического состава (%):

Марка стали	Л-53	Л-65
C	0,47–0,59	0,60–0,70
Mn	0,50–0,8	0,30–0,60

Si	0,15–0,40	0,15–0,40
S	≤ 0,050	≤ 0,050
P	≤ 0,050	≤ 0,045

На обжимном стане 640 мм из блюма 180×180 мм за девять проходов прокатывается заготовка сечением 90×90 мм. На чистовой линии лемешная сталь прокатывается за семь проходов, распределяющихся в трех клетях: два – четыре – один. Принятая калибровка валков представлена на рис. 101.

Заготовка сечением 90×90 мм обжимается в первых двух прямоугольных закрытых калибрах до сечения 98×60 мм, прокатка в 3, 4, 5, 6, 7 проходах проводится в фасонных калибрах. Прокатка в первых шести проходах ведется, как и прокатка обычной лемешной стали (без местного магазина); получение местных магазинов лемеха осуществляется в одном последнем чистовом проходе. Чистовая клеть имеет два валка, из которых нижний – гладкий, а на четырех калибрах верхнего валка высечены магазины лемеха.

Затруднения в калибровке заключались в подборе сечения предчистового калибра, которое обеспечивало бы получение в чистовом калибре заполнение магазинов. Имея постоянное сечение в предчистовом калибре, нужно было за один проход в чистовом калибре получить профиль периодического сечения с резко меняющимися величинами обжатий.

Прокатка по уточненной калибровке позволила получить хорошее заполнение магазина, но ширина лемеха против вершины магазина была меньше на 3–4 мм по сравнению с шириной остальной части полосы и выходила за пределы минимальных допусков. Это явилось следствием того, что в данном сечении было минимальное обжатие по высоте. Увеличение обжатия на этом участке профиля дало возможность получить требуемый размер ширины против вершины магазина, но в остальной части ширина профиля выходила за пределы максимального допуска.

Для устранения указанного дефекта изменено направление прокатки, как это показано. При измененном направлении прокатки сужение полосы, соответствующее максимальному выступу магазина, уменьшилось до должных пределов и переместилось в носовую часть магазина.

Для обеспечения ровной кромки лемеха применено незначительное местное обжатие, дающее местное уширение, в результате чего удалось сравнить сужение ширины лемеха.

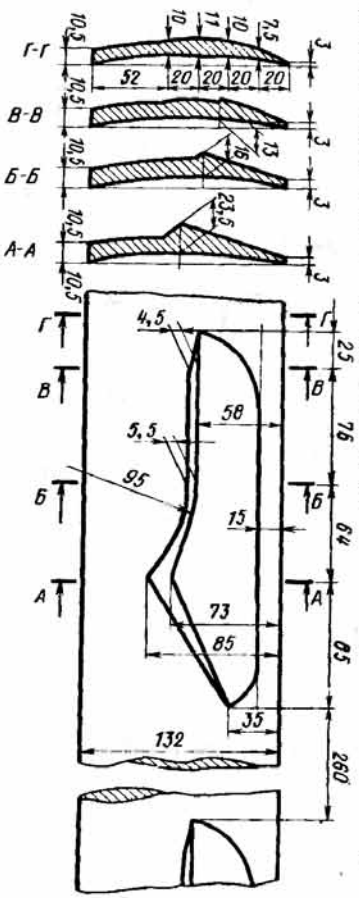


Рис. 100. Профиль лемешной стали с местным магазином

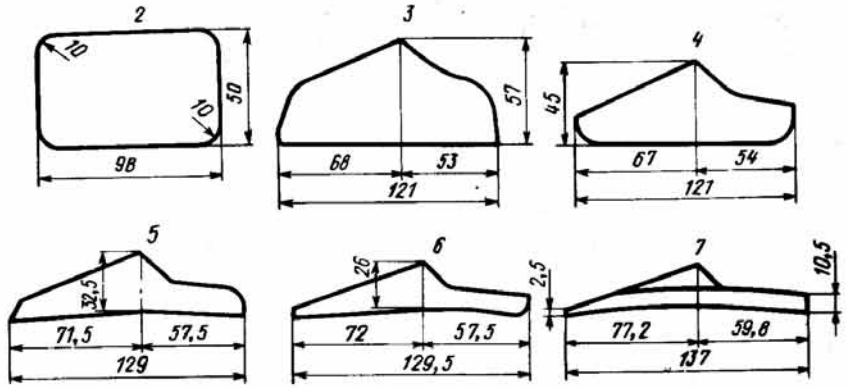


Рис. 101. Калибровка лемешной стали с местным магазином

Первоначально прокатка велась магазином вниз, что вызывало смятие выступов магазина лемеха при движении полосы по рольгангам. Для устранения этого дефекта прокатку начали вести магазином вверх.

Процесс прокатки осваивали на стане с валками диаметром 500 мм, по окружности которых размещалось 2,25 магазина. Это приводило к тому, что излишек полосы между двумя магазинами поступал в обрезь, увеличивая расход металла. Увеличение диаметра валков чистовой клети с 500 до 596 мм позволило разместить по окружности валка три магазина. Для прокатки в валках увеличенного диаметра длина бочки валков уменьшена с 1500 до 940 мм с соответствующим удлинением шпинделей. Это мероприятие позволило ликвидировать отходы в обрезь.

На четырехклетевом стане 450 КМК освоен профиль лемешной полосы 125 Д. Лемешную полосу прокатывают за девять проходов (из них фасонных – четыре) из заготовки сечением 100×100 мм. Распределение проходов по клетям: четыре – два – два – один, пятый проход – ребровой. Схема прокатки приведена на рис. 102.

Очертание предчистового калибра определено по общему наибольшему контуру профиля готовой полосы. Из анализа калибровки (табл. 3) видно, что коэффициенты вытяжки и смещаемые площади по проходам распределены более или менее равномерно, но наиболее нагруженным является чистовой калибр, причем нагрузка и деформация в этом калибре неравномерны. В местах образования магазина на полосе деформация и нагрузка минимальные, коэффициент

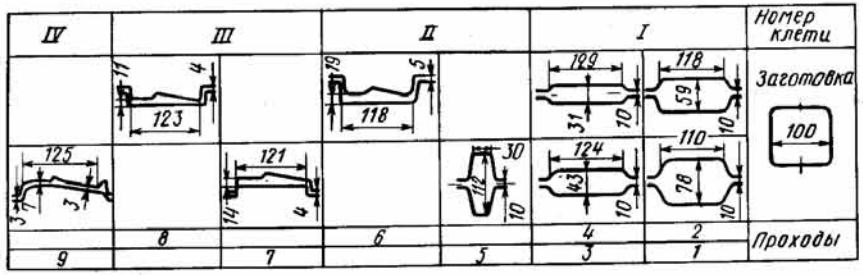


Рис. 102. Схема прокатки лемешной полосы 125Д

Таблица 3. Анализ калибровки лемешной полосы 125 Д

№ калибра	Площадь калибра, мм²	Коэффициент вытяжки	Смещенная площадь, мм²
Заготовка	9810	–	–
1	8500	1,15	1310
2	6900	1,23	1600
3	5300	1,30	1600
4	4000	1,32	1300
5	3440	1,16	560
6	2380	1,45	1060
7	1640	1,51	740
8	1150	1,43	490
9	770	1,49	380

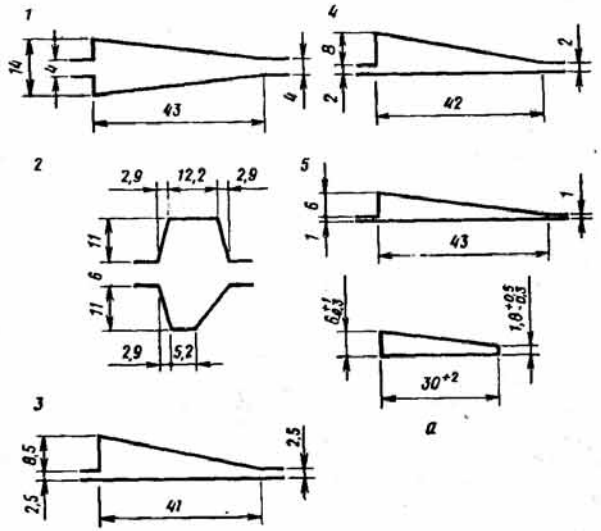


Рис. 103. Калибровка профиля лезвия лемеха из стали марки 20 на линейном стане 280–1; *а* – готовый профиль

вытяжки в этом месте равен 1,14, а на промежуточном участке между магазинами деформация максимальная (коэффициент вытяжки 1,49). Изменение обжатия полосы происходит почти мгновенно, что и определяет неравномерный характер нагрузки на детали рабочей линии стана. Все это создает весьма тяжелые условия для работы оборудования. Однако разгрузить чистовой калибр не представляется возможным, так как при изменении предчистового калибра в сторону его утонения может плохо заполняться магазин. Наименее нагружен ребровой калибр 5, поскольку он служит только для контроля ширины.

Для получения прямой полосы без "утяжки" по спинке лемеха линейки на выходе из чистового калибра должны быть достаточной длины; их следует устанавливать по ширине выходящей полосы. В противном случае "утяжка" по спинке полосы будет больше допустимой.

На рис. 103–112 приведены калибровки клиновидных профилей.

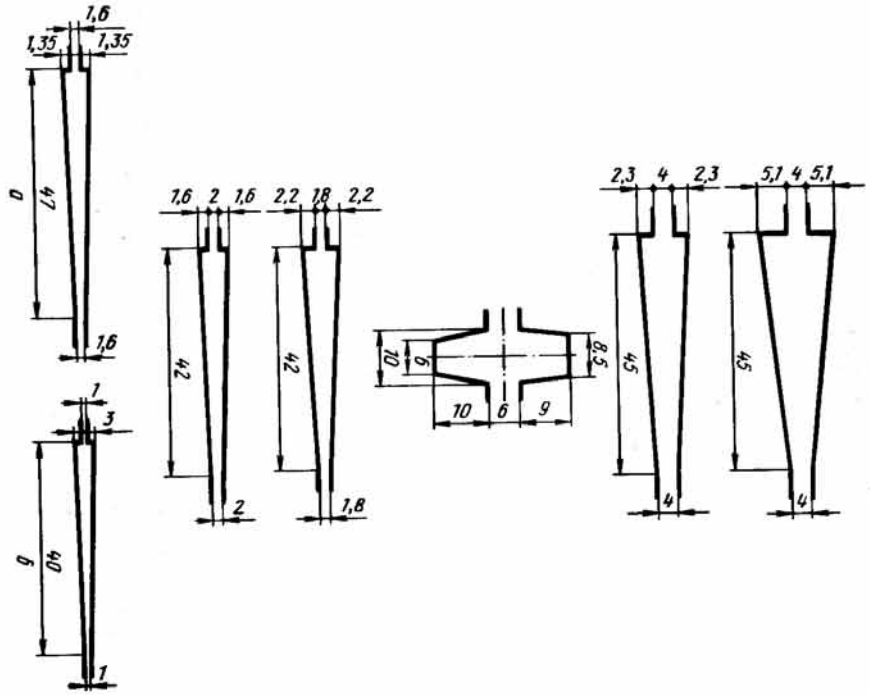


Рис. 104. Калибровка конусного подката сечением 35×3,6×1,8 мм (*а*) и профилей сечением 32×3×1–20×3×1 мм (*б*) для серпов на линейном стане 280–1

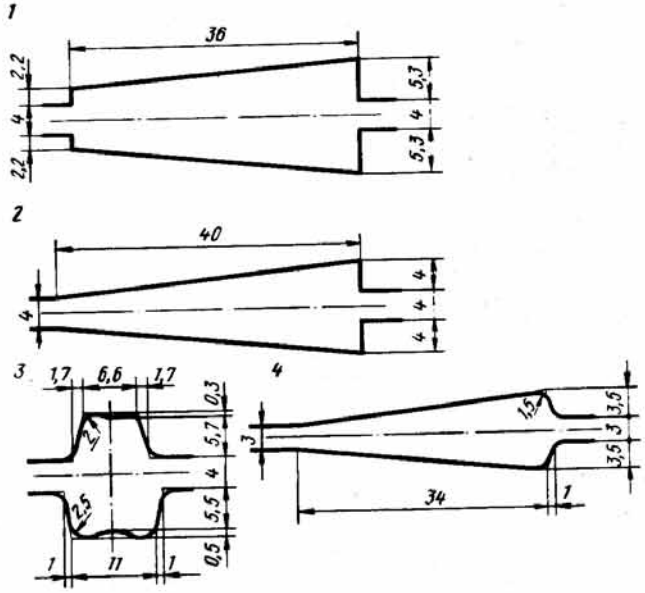


Рис. 105. Калибровка трапециевидного профиля для грохотов на линейном стане 280–1

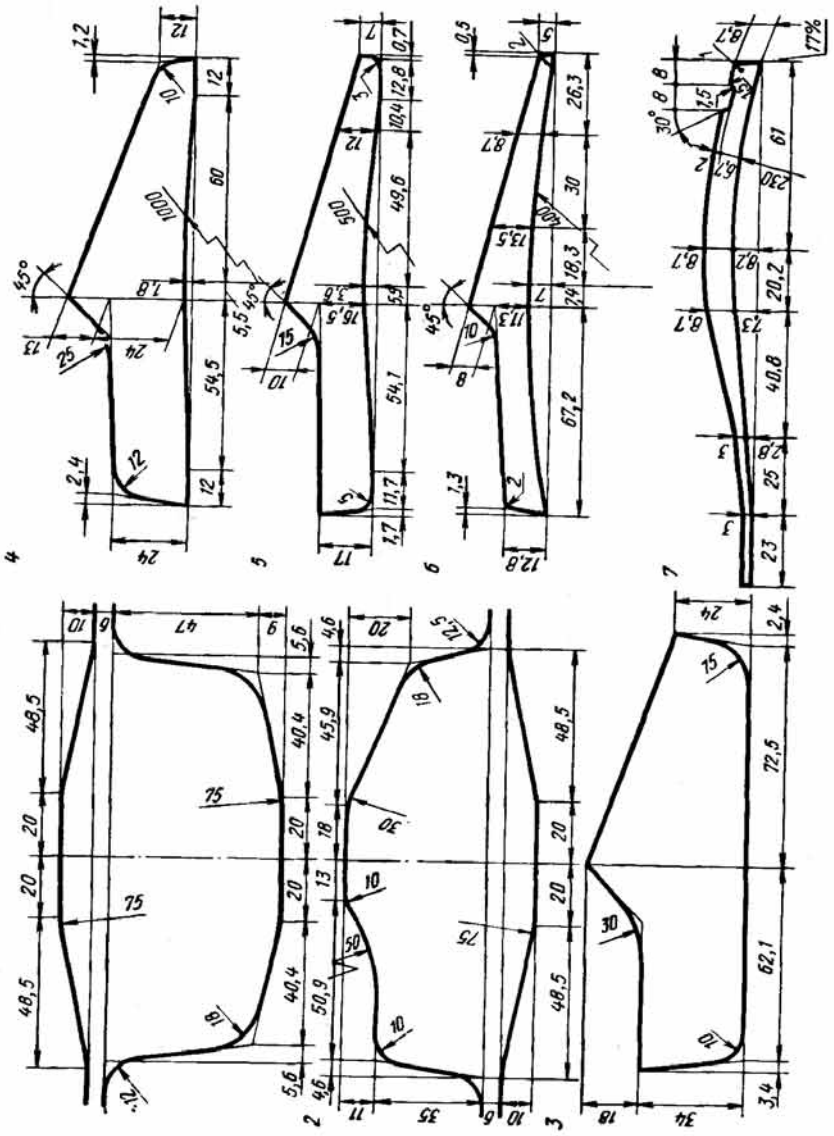


Рис. 106. Калибровка профиля 142-570Д для долотообразных лемехов на линейном стане 500

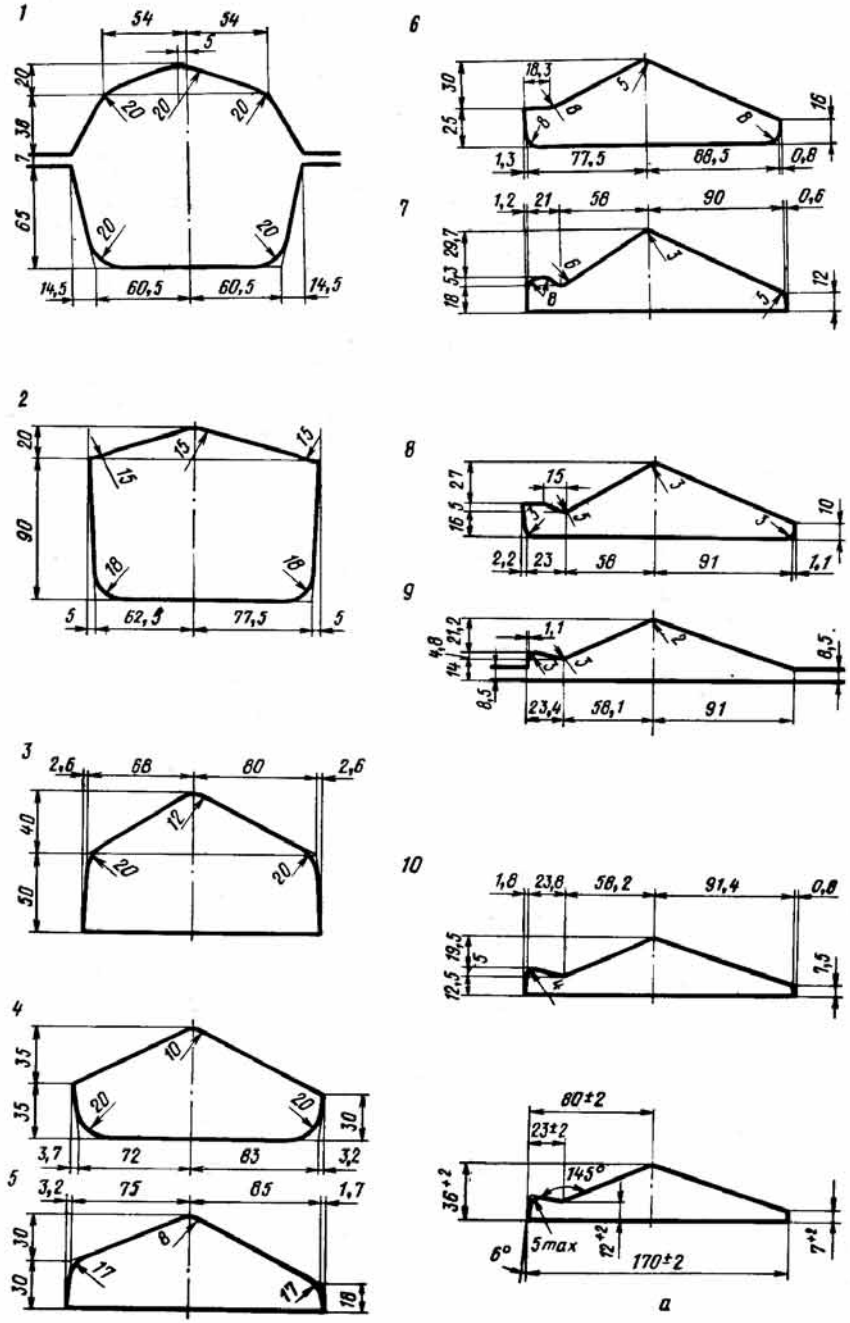


Рис. 107. Калибровка профиля зуба детали ПБЖ на линейном стане 620 (исходное сечение 142×142 мм; *а* – готовый профиль)

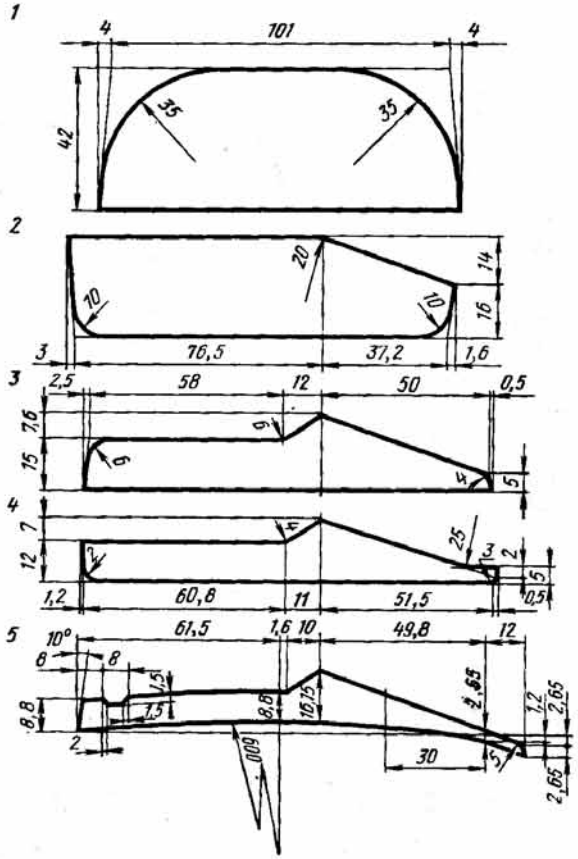


Рис. 108. Калибровка профиля 122С для лемехов с сплошным утолщением на линейном стане 450 (исходное сечение 104×68 мм)

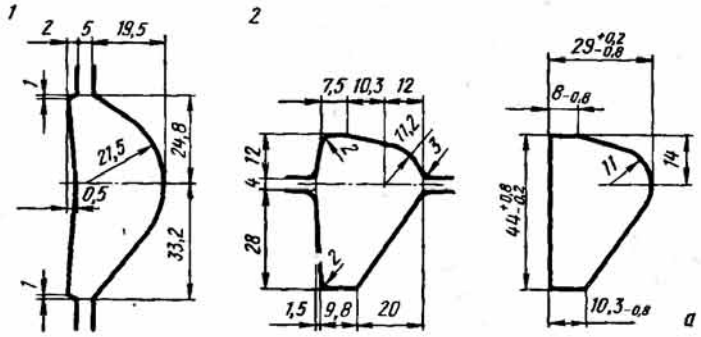


Рис. 109. Калибровка асимметричного профиля сечением 44×29 мм на стане 300 (исходное сечение – круг 43 мм; *а* – готовый профиль)

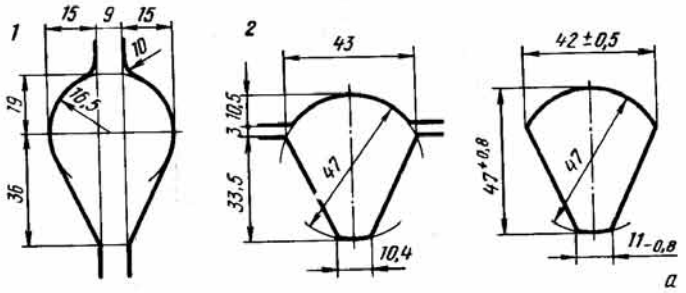


Рис. 110. Калибровка профиля сектора сечением 42×47 мм для прокатки на непрерывной группе клетей 300 (исходное сечение – круг 44 мм; *а* – готовый профиль)

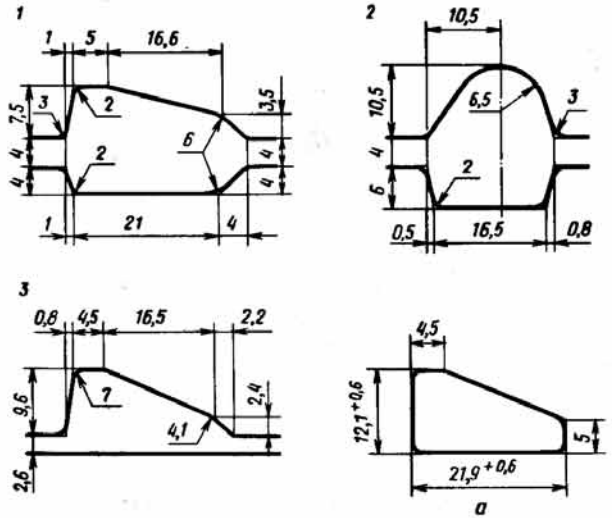


Рис. 111. Калибровка клиновидного профиля сечением 21,9×12,1×5 мм на линейном стане 180 (исходное сечение 21,6×19 мм; *а* – готовый профиль)

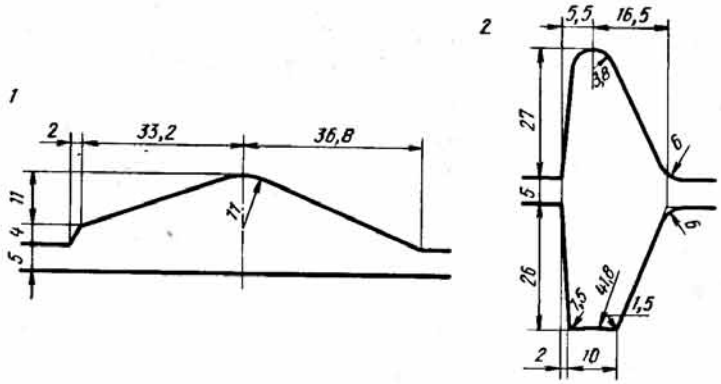
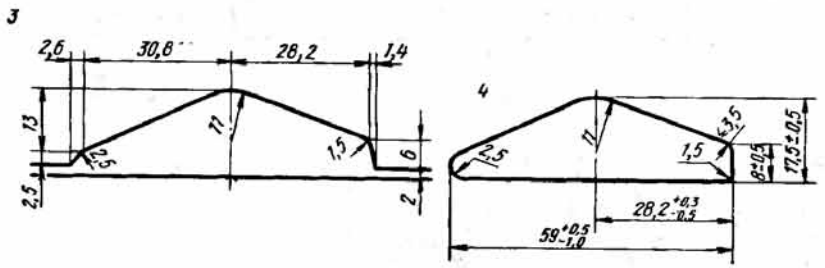


Рис. 112. Калибровка профиля № 255 на стане 300 (исходное сечение – овал 65×32 мм, заполнение овала 60 мм; *а* – готовый профиль)



Продолжение рис. 112

Глава 6.

АСИММЕТРИЧНЫЕ ПРОФИЛИ С ОТОГНУТЫМИ КРАЯМИ

1. Технические требования и сортамент

Профили ободов для колес автомобилей представляют собой полосовые асимметричные профили с отогнутыми краями и относятся к двум основным типам [5]:

уширенные с конической полкой и явно выраженной замочной частью;

уширенные с конической полкой, у которых отсутствует явно выраженная замочная часть.

При прокатке профилей ободов в прямом виде значительная разница окружных скоростей по ширине профиля может привести к серпению и скручиванию полосы. Ухудшаются условия проникновения металла в торцевые части профиля, что отрицательно сказывается на качестве готового проката. Формирование вертикальной стойки бортовой части обусловливает возникновение больших осевых усилий. Для предотвращения осевого смещения валков необходимо предусматривать опорные конусы, чтобы избежать искажения геометрической формы профиля и повышенного выхода брака. Кроме того, незначительный уклон стойки бортовой части приводит к большому износу валков в процессе прокатки и снижению их стойкости. Восстанавливаемость калибров ухудшается и увеличивается расход валков.

С учетом изложенного прокатка профилей ободов проводится в изогнутом виде (рис. 113).

Основное различие основных двух типов профилей ободов состоит в том, что для первого типа характерно наличие канавки (выемки) в замочной части профиля. Канавка предназначена для установки профиля затворного или замочного кольца при сборке колеса и имеет форму равнобокой или неравнобокой трапеции. У профилей ободов второго типа канавка в замочной части отсутствует и бортовая часть, как правило, выше, чем у ободов первого типа.

Профили для ободов обычно прокатывают канавкой вверх. Прокатка профиля канавкой вниз распространения не получила.

Профиль обода состоит из следующих основных элементов: бортовой части, полотна и замочной части. Вертикальный элемент бортовой части иногда называют стойкой, а горизонтальный элемент – хвостовиком. Основная задача при прокатке профилей для автомобилестроения – точное формирование элементов, работающих в сопряжении. Это необходимо учитывать при разработке калибровки, привалковой арматуры и при настройке стана.

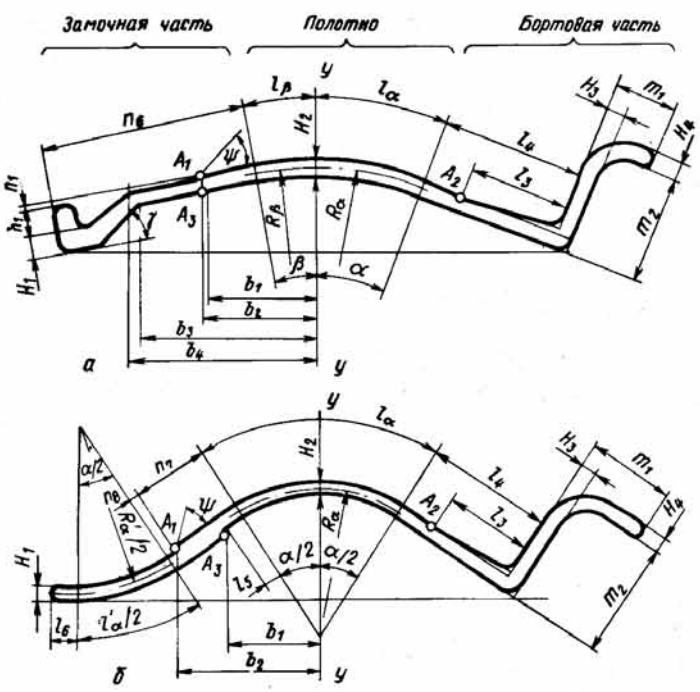


Рис. 113. Профили ободов первого типа (*а*) и второго типа (*б*) в изогнутом виде

До начала разработки технической документации следует запросить у разработчика профиля сборочный чертеж изделия и получить консультацию о характере работы узла.

Совместная разработка конструкции профиля с учетом условий прокатного производства и автомобилестроения представляется наиболее рациональной и находит все более широкое применение в практике.

В ободьях колес наиболее ответственным узлом является замок, в котором находятся в сопряжении два, три или даже четыре профиля. Точное выполнение элементов этого узла обеспечит нормальные условия сборки колеса и надежность его эксплуатации.

Для выполнения этой задачи необходимо соблюдение двух обязательных условий:

1. Самоцентрирование полосы в калибре, что достигается возможно более точным совпадением верхнего и нижнего контуров предыдущего и последующего калибров и равномерным распределением деформации по элементам сечения. Попытки компенсировать невыполнение этих условий регулировкой привалковой арматуры не могут привести к устойчивым положительным результатам.

2. Достаточный уклон внутренней грани выступа замка.

Обычно уклоны замочной части оснований ободьев в состоянии поставки небольшие: 7–12°. Они обеспечиваются заранее предусмотренным изгибом средней части сечения.

При спрямлении сечения на операции завивки стенка замка занимает вертикальное положение. При недостаточном уклоне выступа замочной части иногда бывает целесообразно располагать калибр в валке наклонно, это обеспечивает более надежную проработку внутренней грани выступа.

Вместе с тем надо учитывать, что одновременно с увеличением уклона выступа замка уменьшится уклон вертикального элемента бортовой части, который имеет больший по сравнению с выступом замка участок части, который имеет больший по сравнению с выступом замка участок очага деформации. Увеличение доли бокового давления в этом элементе в связи с уменьшением уклона может привести к осевому смещению валков. При выборе оптимального уклона нельзя не обращать внимания на проработку наружной грани замка. Можно считать допустимым уклон выступа замка до 15° (не более) для удовлетворительного формирования наружной грани в условиях применения одного- двух полузакрытых калибров.

Проще решается задача прокатки замочного основания обода без бортовой части, где увеличение наклона калибра ограничивается только условиями обработки наружной грани выступа. При этом также целесообразно компенсировать уклон замочной части изгибанием полотна.

2. Схемы прокатки профилей с отогнутыми краями

Для профилей ободов с замочной и бортовой частями схемы прокатки обязательно предусматривают изгиб полотна, который является основной характеристикой. Кантовки профиля отсутствуют, да они вообще-то и не нужны, за исключением, может быть, кантовки в первых проходах для контроля ширины исходной полосы, задаваемой в первый фасонный калибр.

При прокатке и поставке потребителю профилей ободов в изогнутом виде изгиб профиля следует предусматривать в средней (центральной) части полотна, причем левая и правая части могут отгибаться под разными углами. Ширина изогнутого профиля, определенная по средней линии, не должна отличаться от ширины прямого профиля. При определении изогнутой формы готового профиля обода и углов изгиба α и β для профилей ободов первого типа (рис. 113, *а*) и угла изгиба α для второго типа (рис. 113, *б*) рекомендуется выполнить следующие условия:

для устойчивого положения на рольганге, хорошего центрирования в калибре и благоприятных условий в процессе прокатки нижние точки замочной части профиля обода должны быть расположены на одной горизонтали;

средние значения катающих радиусов для бортовой части и полотна профиля должны быть примерно одинаковыми. Следовательно, верхние точки бортовой части и полотна после его изгиба должны располагаться примерно на одной горизонтали;

углы изгиба α и β должны быть выбраны таким образом, чтобы обеспечить благоприятные условия деформации стойки бортовой части и нормальные условия входа замочной части профиля в чистовой калибр;

осевое усилие при прокатке должно быть минимальным. Поэтому коэффициенты обжатия бортовой части, замочной части и полотна следует выбирать таким образом, чтобы средние значения длины контактной поверхности в элементах профиля (бортовая часть, замочная часть, полотно) были одинаковыми;

неравномерность высотной деформации полосы во избежание серпения и скручивания полосы при выходе из валков должна быть симметричной относительно вертикальной оси, проходящей через наивысшую точку изогнутого полотна профиля.

При определении углов изгиба α и β в первом приближении принимается локальный изгиб полотна профиля и не учитываются радиусы закруглений по периметру профиля.

Значения углов изгиба α и β для прокатки профилей ободов первого типа на металлургическом заводе им. Петровского изменяются в следующих пределах [4]:

$$\alpha = 20 \div 30^{\circ}; \quad \beta = 7{,}5 \div 12{,}5^{\circ}. \qquad (60)$$

При определении формы и параметров изгиба профиля обода второго типа нежелательно, чтобы дугообразная часть изогнутого профиля (рис. 113, *б*) перекрывала участок конусности бортовой части (точка A_2) и переходной участок замочной части (точки A_1 и A_2). Изгиб полотна целесообразнее осуществлять одним радиусом, при этом нижние точки бортовой и замочной частей рекомендуется располагать на одной горизонтали, что способствует устойчивому положению полосы в калибрах при прокатке профиля. Отгиб бортовой и замочной частей выполнен под достаточно большим углом $\alpha/2$.

Чем больше по величине угол отгиба, тем меньше осевые усилия, возникающие при обжатии стойки, и тем меньше возможность смещения валков относительно друг друга. В то же время максимальное значение угла изгиба $\alpha/2$ ограничивается величиной угла переходного участка замочной части: если этот угол меньше $\alpha/2$, то на переходном участке (ступеньке) замочной части будет иметь место поднутрение, что, естественно, недопустимо. Практически величина угла изгиба α находится в пределах 60–70°.

Методика изгиба профиля обода первого и второго типа изложена в [5]. При этом параметры левой части определяются из условия расположения нижних точек замочной и бортовой частей профиля на одной горизонтали.

При прокатке профилей ободов в изогнутом виде в зависимости от формы профиля, требований, предъявляемых заказчиком, и условий формирования профиля в калибрах возможны и исключения из рекомендаций (60), определяющих углы изгиба профиля α и β для профилей ободов первого типа. Причиной этого является то, что изложенная методика изгиба профиля обода и определения углов изгиба α и β исходит из условий устойчивой прокатки профиля обода. В то же время профили ободов с целью их выпрямления подвергаются правке на автозаводах и к профилю изогнутой формы предъявляются требования, обеспечивающие нормальный процесс правки. Поэтому возможны и отклонения от условия (60), так как в отдельных случаях допустимый изгиб профиля может быть задан конструкторским бюро автомобильных заводов.

От величины углов изгиба α и β и от их соотношения зависит расположение калибров (и в первую очередь чистового калибра) на валках. Если изогнутая форма профили задана, то в этом случае не всегда удается расположить калибры на валках так, чтобы нижние точки бортовой и замочной частей находились на одной горизонтали. Если смещение нижних точек бортовой и замочной частей относительно друг друга по вертикали не слишком велико, то оно не ухудшает существенно условий прокатки и устраняется в процессе расчета калибровки за счет уменьшения угла β.

Для профилей оснований ободов колес, имеющих замочную часть (рис. 113, *а*), внутренний уклон выступа замочной части в состоянии поставки обычно составляет от 7 до 12°. Этот уклон обеспечивается заранее предусмотренным изгибом по радиусу полотна профили. Впоследствии при спрямлении сечения на операции завивки колеса у заказчика внутренняя грань выступа замочной части занимает вертикальное положение.

Если уклон внутренней грани выступа замочной части оказывается недостаточным для нормального и устойчивого процесса прокатки, то иногда целесообразно принять наклонное расположение чистового калибра в валках. При этом обеспечивается более надежная деформация внутренней грани выступа. Вместе с тем следует учитывать, что с увеличением в калибре уклона внутренней грани выступа уменьшится уклон вертикального участка бортовой части, который имеет больший по сравнению с выступом участок очага деформации. Увеличение бокового давления в вертикальном участке бортовой части в связи с уменьшением уклона может привести к осевому смещению валков.

При выборе оптимального уклона нельзя не учитывать деформацию наружной грани выступа. На основании практического опыта можно считать допустимым уклон выступа замочной части не более 15°, что обеспечивает надежное формирование наружной грани выступа в условиях применения одного или двух калибров полузакрытого типа.

Во избежание бокового искривления полос необходимо соблюдать пропорцио-

нальность вертикальных обжатий по ширине. В первых трех проходах, где первоначально формируется профиль, эти обжатия не могут быть пропорциональными, поэтому при расчете калибровки делят калибр пополам и соблюдают равенство площадей левой и правой частей.

При проектировании калибровок профилей ободов положение нейтральной линии каждого калибра определяют планиметрированием площадей. По этому способу нейтральную линию проводят так, чтобы площади калибра над ней и под ней были равны.

3. Расчет калибровки при прокатке профилей ободов

Используемая на металлургическом заводе им. Петровского методика расчета калибровки профилей ободов первого и второго типов основана на приведенных выше соотношениях для определения углов изгиба α и β и условий самоцентрирования полосы в калибрах, которые заключаются в следующем [5]:

1. При входе в калибр нижнее основание полосы в районе очага деформации должно одновременно контактировать с максимально возможным числом точек на поверхности нижнего валка.

2. Верхний валок, накатываясь на основание полосы в районе очага деформации, должен одновременно приходить в контакт с полосой в заранее запроектированных местах. Оптимальными являются точки контакта, равномерно удаленные от условной вертикальной оси калибра.

Выполнение принципов центрирования, особенно в чистовых калибрах, для которых центрирование является основным способом получения торцевых элементов сложной геометрии, достигается постоянством во всех калибрах некоторых размерных величин и базисных расстояний. Базисные расстояния – это расстояния от намеченных основных точек в чистовом калибре до условной вертикальной оси калибра (ось $y-y$ на рис. 113).

Постоянные параметры:

а) для профилей ободов первого типа (рис. 113, *а*) углы α, β, γ, ψ, величины R_α и R_β (или $R_{\alpha+\beta}$), $l_4+0{,}5\ H_3$, m_2 и базисные расстояния b_1, b_2, b_3, b_4;

б) для профилей ободов второго типа (рис. 113, *б*) углы α, ψ, величины R_α, $R'_{\alpha/2}$, m_2, $l_4 + 0{,}5\ H_3$, $l'_{\alpha/2}$ и базисные расстояния b_1 и b_2.

Размеры чистового калибра определяют с учетом коэффициента термического расширения при выполнении следующих основных положений:

а) толщина полотна и все остальные размеры по толщине проектируются с полным использованием допуска на минус;

б) ширина полотна принимается по минимальному размеру;

в) высота замочной и бортовой частей предусматривается с использованием половины плюсового допуска.

На основании опыта работы при прокатке на стане 550 профилей ободов в семи фасонных калибрах для полотна рекомендуются следующие коэффициенты обжатия $1/\eta_i$, где i -тый номер калибра по ходу прокатки

$$\left.\begin{array}{lll} 1/\eta_1 = 1{,}30\div1{,}50; & 1/\eta_2 = 1{,}60\div1{,}70; & 1/\eta_3 = 1{,}60\div1{,}70; \\ 1/\eta_4 = 1{,}50\div1{,}80; & 1/\eta_5 = 1{,}40\div1{,}60; & 1/\eta_6 = 1{,}25\div1{,}40; \\ 1/\eta_7 = 1{,}15\div1{,}25. & & \end{array}\right\} \qquad (61)$$

При распределении коэффициентов обжатия особенно важным является обжатие вертикального элемента бортовой части, которое определяется из условия равенства средних значений длин контактной поверхности в элементах профиля. Соотношение обжатий толщины полотна ΔH_2 и вертикального элемента бортовой части ΔH_3 равно

$$\Delta H_3 = \Delta H_2 \sin\alpha.$$

Прокатка профилей ободов ведется, как правило, с ограничением уширения в калибрах, что гарантирует надежное заполнение торцевых участков калибра. Расчет уширения производится по средней линии.

На рис. 114 приведены размеры калибров для прокатки обода 9.ОРГ-20 [5]. Первая опытная прокатка дала положительные результаты. Потребовалась лишь незначительная корректировка двух радиусов в торцевых частях двух калибров.

На Чусовском металлургическом заводе на основании анализа калибровок при прокатке профилей для ободов колес автомобилей разработана методика расчета калибровки, основанная на полном совпадении средних линий замочной и бортовой частей всех фасонных калибров, за исключением лишь первых двух по ходу прокатки калибров, в которых происходит первоначальное формирование профиля.

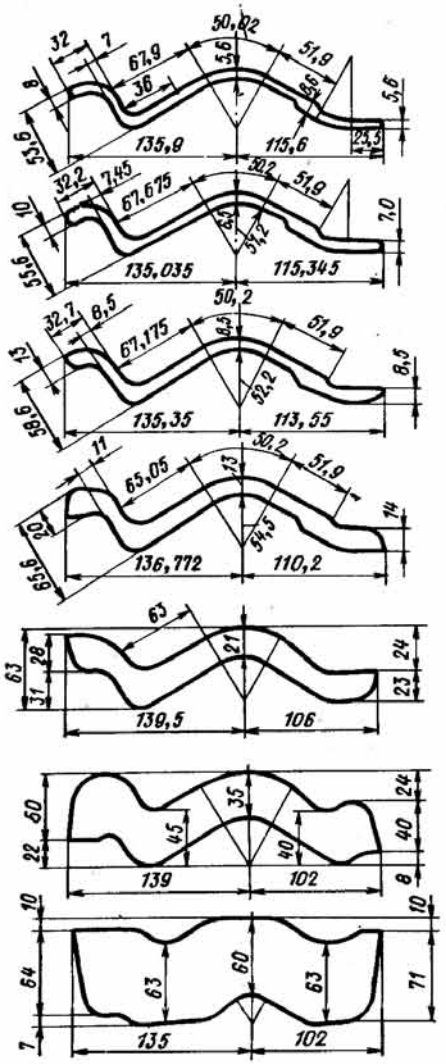


Рис. 114. Размеры калибров для прокатки профиля обода 9.ОРГ-20

Методика предназначена для расчета калибровки профилей ободов первого и второго типов в изогнутом виде как в случае расположения нижних точек бортовой и замочной частей на одной горизонтали, так и при смещении этих точек по вертикали относительно друг друга.

Углы изгиба α и β для ободов первого типа или угол изгиба α для ободов второго типа определяются, как это рассмотрено ранее, из условия расположения нижних точек бортовой и замочной частей профиля на одной горизонтали или же заданы заказчиком из условий технологичности процесса при правке профиля. Кроме этих случаев, возможно вертикальное смещение нижних точек бортовой и замочной частей относительно друг друга, если это необходимо для обеспечения благоприятных условий формирования элементов замочной части.

При прокатке профилей ободов можно применять семь или девять фасонных калибров. Все фасонные калибры при прокатке профилей первого типа, за исключением предчистового, закрытого типа с чередованием направления разъемов. В предчистовом калибре для контроля высоты выступа и его формирования замочная часть выполняется полузакрытой. Для ободов второго типа нет необходимости в полузакрытых калибрах и все фасонные калибры являются закрытыми. Иногда для профилей ободов первого типа используют два полузакрытых калибра.

При девяти фасонных калибрах на основании анализа заводских калибровок могут быть рекомендованы следующие пределы изменения коэффициентов обжатия по калибрам:

$$\left.\begin{array}{lll} 1/\eta_1 = 1{,}15\div1{,}40; & 1/\eta_2 = 1{,}15\div1{,}40; & 1/\eta_3 = 1{,}20\div1{,}50; \\ 1/\eta_4 = 1{,}30\div1{,}50; & 1/\eta_5 = 1{,}30\div1{,}60; & 1/\eta_6 = 1{,}30\div1{,}55; \\ 1/\eta_7 = 1{,}30\div1{,}50; & 1/\eta_8 = 1{,}20\div1{,}35; & 1/\eta_9 = 1{,}10\div1{,}25. \end{array}\right\} \quad (62)$$

Особенностью режимов обжатий при прокатке профилей ободов являются одинаковые коэффициенты обжатия элементов в чистовом и предчистовом калибрах. В остальных калибрах коэффициенты обжатия тонких элементов в той или иной степени больше коэффициентов обжатия более толстых элементов. Если возможно, то целесообразно также предусматривать одинаковые коэффициенты обжатия отдельных элементов и в первых по ходу расчета подготовительных калибрах.

По форме и назначению фасонные калибры для прокатки профилей ободов можно условно отнести к трем основным типам: чистовой калибр, предчистовой и черновые калибры. Чистовые и предчистовые калибры отличаются от черновых своей формой, которая подобна форме поперечного сечения готового профиля. В черновых калибрах происходит первоначальное формирование полосы, и их форма, естественно, отличается от формы готового профиля. Обычно при прокатке профилей ободов предусматриваются два черновых калибра, что вполне достаточно для придания полосе прямоугольного сечения необходимой конфигурации.

Методику расчета калибровки рассмотрим на примере калибровки

профиля первого типа (рис. 113, *а*). При этом полагаем, что нижние точки бортовой и замочной частей не расположены на одной горизонтали и угол изгиба замочной части β равен 15°. Такой угол изгиба обеспечивает интенсивную деформацию внутренней грани выступа замочной части, но создает некоторые неудобства для деформации внешней грани выступа. Поэтому необходимо кратчайшим путем выпрямить левую часть профиля, последовательно уменьшая против хода прокатки угол изгиба β. Можно рекомендовать следующие значения углов изгиба β при девяти фасонных калибрах:

$$\left.\begin{array}{l} \beta_5 = 0^{\circ};\ \ \beta_6 = 4\div6^{\circ};\ \ \beta_7 = 7\div9^{\circ}; \\ \beta_8 = 11\div13^{\circ};\ \ \beta_9 = 15^{\circ}. \end{array}\right\} \quad (63)$$

Те же значения углов β, только начиная с калибра *3*, принимаются и при семи фасонных калибрах.

Рекомендуемый для чистового калибра угол изгиба β, равный 15°, можно считать оптимальным. Дальнейшее увеличение угла β затрудняет спрямление (правку) изогнутого полотна профиля у потребителя. Кроме того, при увеличении угла β создаются дополнительные трудности при формировании замочной части в процессе прокатки, так как большой уклон внешней грани замочной части по отношению к средней линии валков предопределяет практическую невозможность деформации внешней грани, что в свою очередь приведет к неустойчивому положению выступа в калибрах.

Выступ замочной части является наиболее важным элементом профиля и, чтобы обеспечить его надежное формирование, необходимо добиться прежде всего точного совпадения внутренней грани выступа полосы с соответствующей гранью калибра.

Принимаемое согласно (63) значительное уменьшение угла β против хода прокатки дает возможность полностью обеспечить формирование выступа в одном полузакрытом предчистовом калибре. При увеличении числа полузакрытых калибров до двух, что иногда встречается на практике, затруднительно по внешнему виду готового профиля определить, в каком калибре произошло переполнение. Поэтому приходится производить отбор темплетов из отдельных калибров, что приводит к простоям стана и увеличению расхода металла.

Для расчета калибровки сечение готового профиля (рис. 113, *а*) разделяется на три базовых элемента: замочную часть, полотно (изогнутый средний участок) и бортовую часть, связанных между собой единством режима деформации.

Расчет размеров фасонных калибров производится в следующей последовательности:

1. На основании номинальных размеров готового профиля в изогнутом виде определяются с учетом допускаемых отклонений контуры (без радиусов закруглений) всех базовых элементов профиля с постановкой размеров между базовыми точками пересечения внешних линий этих контуров. При этом толщина полотна и толщины других элементов проектируются обычно на минус.

2. Проводится пересчет всех размеров профиля с учетом коэффициента термического расширения.

3. С учетом конструкции основного оборудования прокатного стана и практических данных по прокатке профилей ободов принимается число фасонных калибров (семь или девять) и толщина H_0 исходного раската прямоугольного сечения, задаваемого в первый фасонный калибр.

Толщина H_0 определяется в зависимости от высоты замочной и бортовой частей готового профиля и характеристики стана (диаметра и материала валков, количества клетей и мощности электродвигателей главных приводов). На основании практических данных отношение H_0 к высоте замочной части в условиях различных заводов колеблется в пределах от 5 до 7.

4. Определяются суммарные коэффициенты обжатия $1/\eta_{I}$, $1/\eta_{II}$, $1/\eta_{III}$, $1/\eta_{IV}$ соответственно по толщинам H_1, H_2, H_3, H_4 (рис. 113, *а*) базовых элементов в фасонных калибрах из условия

$$H_0 = H_1 \frac{1}{\eta_{I}} = H_2 \frac{1}{\eta_{II}} = H_3 \frac{1}{\eta_{III}} = H_4 \frac{1}{\eta_{IV}} .$$

5. На основании уравнения (61) при семи фасонных калибрах или (62) при девяти фасонных калибрах распределяются суммарные коэффициенты обжатия базовых элементов профиля по калибрам и рассчитываются толщины базовых элементов

$$H_1^{i-1} = H_1^{i} \frac{1}{\eta_{I}^{i}}, \ldots, H_4^{i-1} = H_4^{i} \frac{1}{\eta_{IV}^{i}}, \qquad (64)$$

где i — номер калибра по ходу прокатки.

6. Для подготовительных калибров рассчитывают замочные части без учета их выступа (рис. 115).

Для замочной части чистового калибра заданными являются меры H_1, H_2, l_1, n_2, l_2, n_5, h_2, n_6. Эти же размеры для подготовительных калибров, кроме размера n_6, который является постоянным размером, являются искомыми и по ним проводится построение замочной части всех подготовительных калибров. Расчет замочной части профиля проводится в следующей последовательности:

а) находим необходимые для дальнейших расчетов следующие дополнительные размеры в чистовом калибре

$$\beta_2 = \operatorname{arctg} \frac{h_2}{n_5}, \quad \beta_1 = \operatorname{arctg} \frac{H_2 + h_2 - H_1}{n_2},$$

$$\beta_3 = \beta_1 + 0{,}5(\beta_2 - \beta_1), \quad a = l_2 + n_5 - (l_1 + n_2),$$

$$h_3 = h_2 + 0{,}5 H_2 - 0{,}5 H_1;$$

б) определяем для чистового калибра длины средних линий l_8, l_9, l_{10} и горизонтальную проекцию n_{10} длины средней линии l_9

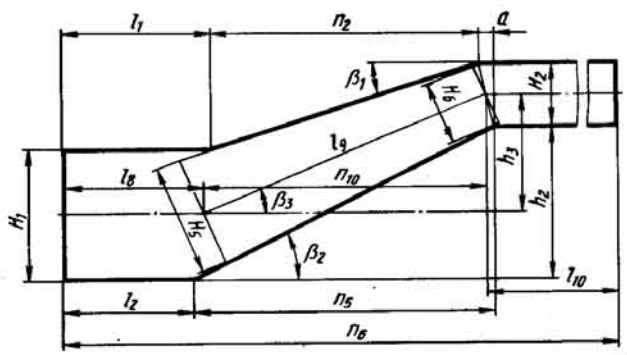


Рис. 115. Основание замочной части профиля обода первого типа

$$l_9 = h_3/\operatorname{tg}\beta_3, \quad n_{10} = h_3/\sin\beta_3,$$

$$l_8 = l_2 + n_5 - n_{10} - 0{,}5\,a, \quad l_{10} = n_6 - (l_8 + n_{10} + 0{,}5\,a);$$

в) находим толщины H_5 и H_6 наклонного элемента замочной части чистового калибра

$$H_6 = \frac{\sqrt{H_2^2 + a^2}\,\sin\left(90^\circ + \operatorname{arctg}\frac{a}{H_2} - \beta_1\right)}{\sin\left[90^\circ + 0{,}5(\beta_2 - \beta_1)\right]},$$

$$H_5 = H_6 + 2\,l_9 \operatorname{tg}(\beta_3 - \beta_1);$$

г) намечаем коэффициенты обжатия по калибрам для толщины H_5 и H_6 наклонного элемента в соответствии с (61) или (62) и с учетом толщины исходного раската H_0. При этом опять же в последних по ходу прокатки калибрах придерживаемся принципа одинаковых коэффициентов обжатия по ширине профиля. Далее аналогично (64) вычисляем толщины H_5 и H_6 в подготовительных калибрах;

д) в чистовом и подготовительных калибрах, как это уже подчеркивалось ранее, полностью должны совпадать средние линии замочных частей, то есть калибровка профиля обода проектируется при постоянных размерах l_8, l_{10}, n_{10} и h_3 (рис. 115). При постоянных размерах n_{10} и h_3 сохраняется постоянной и длина средней линии l_9 наклонного элемента.

Так как режимы обжатий отдельных элементов замочной части и соответственно их толщины H_1, H_2, H_5, H_6 заданы ранее, то необходимо определить для каждого подготовительного калибра размеры h_2, n_2, n_5, l_1, l_2.

Пользуясь полученными соотношениями, из рис. 115 имеем для каждого подготовительного калибра

$$\left.\begin{aligned} &h_2 = h_3 + 0{,}5(H_1 - H_2); \quad n_2 = (h_2 + H_2 - H_1)\operatorname{ctg}\beta_1; \\ &n_5 = h_2 \operatorname{ctg}\beta_2; \quad l_1 = l_8 + n_{10} - n_2 - 0{,}5\,a; \\ &l_2 = l_8 + n_{10} - n_5 + 0{,}5\,a, \end{aligned}\right\} \qquad (65)$$

где

$$\beta_1 = \beta_3 - \operatorname{arctg}\,[0{,}5(H_5 - H_6)/l_9],$$

$$\beta_2 = \beta_3 + \operatorname{arctg}\,[0{,}5(H_5 - H_6)/l_9],$$

$$a = \frac{H_6 \sin\left\{90^\circ - \arcsin\,[0{,}5(H_5 - H_6)/l_9]\right\}}{\operatorname{tg}\beta_1 \sin(90^\circ - \beta_1)} - \frac{H_2}{\operatorname{tg}\beta_1}.$$

При этом размер n_6 задан для чистового калибра и сохраняется постоянным для всех подготовительных калибров.

Так как в соответствии с выбранным режимом обжатий толщины H_1, H_2, H_5, H_6 известны для каждого подготовительного калибра, то по соотношениям (65) можно определить размеры замочной части любого подготовительного калибра. Это обстоятельство является преимуществом данной методики и позволяет после определения размеров чистового калибра сразу же рассчитать первый по ходу прокатки предчистовой калибр (или любой другой) и в случае необходимости внести изменения в заданный режим обжатий.

7. Проводится расчет полотна (изогнутой средней части). Толщина полотна H_2 для всех калибров определена ранее. Углы изгиба β для подготовительных калибров выбираются в соответствии с (63). Так как угол изгиба β не сохраняется постоянным во всех подготовительных калибрах, а уменьшается по ходу расчета калибровки, в то время как длина средней линии l_β изогнутой левой части полотна (рис. 113, *а*) во всех подготовительных калибрах принимается постоянной и равной l_β чистового калибра, то изменяется и радиус R_β средней линии (рис. 116), который должен определяться из соотношения

$$R_\beta = 180\, l_\beta / \pi\beta,$$

где $l_\beta = \text{const}$, а β — угол изгиба в рассматриваемом подготовительном калибре.

Радиусы R'_β, R''_β, R'_α, R''_α в каждом подготовительном калибре находятся из очевидных соотношений

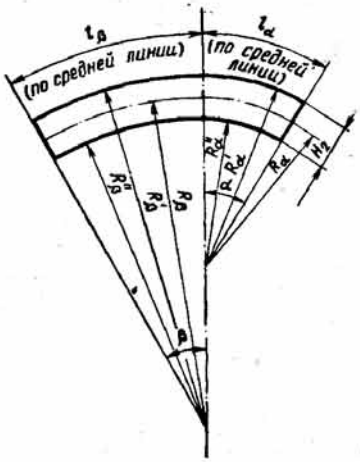


Рис. 116. Полотно профиля обода в изогнутом виде

$$R'_\beta = R_\beta + 0{,}5\,H_2,\ R''_\beta = R_\beta - 0{,}5\,H_2,$$

$$R'_\alpha = R_\alpha + 0{,}5\,H_2,\ R''_\alpha = R_\alpha - 0{,}5\,H_2.$$

8. В соответствии с рис. 117 определяются длины средних линий $l_{11}, l_{12}, l_{13}, l_R$ отдельных элементов бортовой части профиля обода в чистовом калибре. Заданы следующие размеры: H_2, H_3, H_4, l_3, l_4, m_1, m_2, m_3, R. Конусный элемент длиной l_3 при определении длин средних линий не учитывается. Тогда

$$\left.\begin{aligned} &l_{11} = l_4 + 0{,}5\,H_3,\quad l_{12} = m_2 + 0{,}5\,H_4 - 0{,}5\,H_2 - R,\\ &l_R = 0{,}5\,\pi R,\quad l_{13} = m_1 - R. \end{aligned}\right\} \qquad (66)$$

Радиусы R' и R'' бортовой части равны

$$R' = R + 0{,}25(H_3 + H_4),\quad R'' = R - 0{,}25(H_3 + H_4). \qquad (67)$$

9. Определяется (рис. 118) длина l_{14} средней линии кромки бортовой части, расположение кромки бортовой части (размер x) и общая ширина b_6 бортовой части в условном чистовом калибре.

Так как в чистовом калибре кромка бортовой части расположена под углом α к горизонтали, а во всех подготовительных калибрах кромка занимает горизонтальное положение, то, прежде чем перейти к расчету бортовой части подготовительных калибров, необходимо рассмотреть условный чистовой калибр.

Длина l_{14} кромки бортовой части в условном чистовом калибре равна (рис. 117 и 118)

$$l_{14} = l_R + l_{13} - \pi R(90^\circ - \alpha)/180,$$

или, подставляя l_R и l_{13} из (66),

$$l_{14} = 0{,}5\,\pi R + m_1 - R - \pi R(90^\circ - \alpha)/180.$$

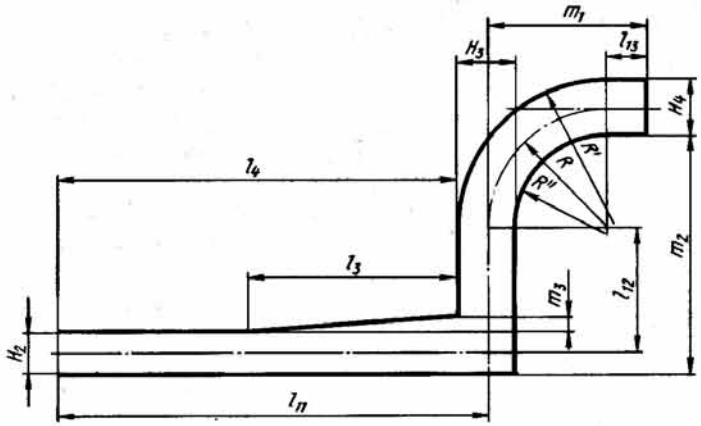


Рис. 117. Бортовая часть профиля обода

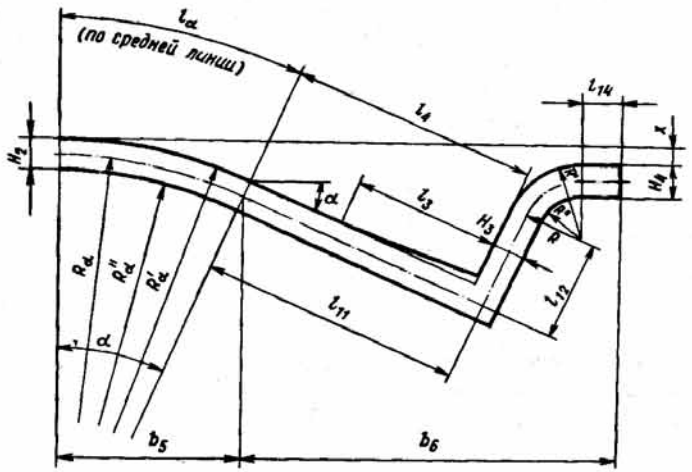


Рис. 118. Бортовая часть профиля обода условного чистового калибра

Расположение кромки бортовой части в условном чистовом калибре находим из рис. 118

$$x = 0{,}5\,H_2 + R_\alpha(1 - \sin\alpha) + l_н \sin\alpha - l_{12}\cos\alpha - R(1 - \sin\alpha) - 0{,}5\,H_4, \qquad (68)$$

где l_{11} и l_{12} определены в (66), а H_2, α, R и H_4 заданы. Общая ширина b_6 бортовой части

$$b_6 = l_{11}\cos\alpha + l_{12}\sin\alpha + R\cos\alpha + l_{14}.$$

10. Расчет бортовой части подготовительных калибров. Средние линии бортовой части всех подготовительных калибров полностью совпадают со средней линией условного чистового калибра. Поэтому для расчета бортовых частей подготовительных калибров и их построения можно использовать рис. 118. Для бортовой части подготовительных калибров постоянными являются размеры l_{11}, l_{12}, радиус R, угол α и расстояние $x + 0{,}5\,H_4 - 0{,}5\,H_2$ между средними линиями полотна и кромки бортовой части. Толщины H_2, H_3 и H_4 заданы принятым режимом обжатий.

Размер x для каждого подготовительного калибра определяется из условия постоянства расстояния между средними линиями полотна и кромки бортовой части, то есть из (68)

$$x = C + 0{,}5\,H_2 - 0{,}5\,H_4,$$

где H_2, H_4 – толщины рассчитываемого подготовительного калибра; C – постоянная величина для всех калибров (чистового и подготовительных). При этом

$$C = R_\alpha(1 - \sin\alpha) + l_{11}\sin\alpha - l_{12}\cos\alpha - R(1 - \sin\alpha).$$

Радиусы закруглений R' и R'' (рис. 118) бортовой части определяются из (67).

При заданном режиме обжатий и принятых параметрах калибровки бортовая часть и полотно так же, как и замочная часть профиля, могут рассчитываться для любого подготовительного калибра и независимо от других калибров.

11. Расчет уширения в чистовом и подготовительных калибрах проводится только для бортовой части по формуле (2). При этом уширение принимается равным 0,7 от свободного.

12. Черновые калибры, в которых происходит первоначальное формирование профиля, проектируются на основании выбранного режима обжатий. При этом целесообразно для станов линейного типа предусматривать эти калибры сопряженными и с утолщениями на краях. Приближенное уширение рассчитывают по формуле (2) для толщины H_2 полотна профиля.

13. При формировании выступа замочной части профиля обода обжатия по ширине и высоте выступа чередуются через калибр. Калибровка выступа замочной части рассчитывается с учетом примерного равенства коэффициентов вытяжки выступа и остальной части этого элемента. При этом коэффициенты вытяжки определяются на основании расчета площадей для выступа совместно с основной толщиной полотна (рис. 115). Высота выступа в калибрах *5* и *7* при калибровке с девятью фасонными калибрами проектируется с некоторым запасом, чтобы в любом случае при изменении условий прокатки исключить возможность переполнения. Поэтому в этих калибрах не предусматривается обжатие выступа по высоте. Контроль высоты выступа целесообразно осуществлять в закрытых калибрах *4* и *6* и полузакрытом предчистовом калибре *8*.

14. При разработке монтажных чертежей валков нейтральные линии калибров определяются по их центрам тяжести. Центры тяжести калибров находят путем уравновешивания рабочих шаблонов калибров на кромке тонкой металлической линейки.

4. Освоение профиля замочного основания обода колеса 6.00F-16

Размеры и допуски готового профиля замочного основания обода колеса 6.00F-16 автоприцепа автомобиля КамАЗ приведены на рис. 119. Профиль прокатывается из стали Ст3кп. Расчет калибровки (рис. 120) выполнен для линейного трехклетевого стана 550 по методике Чусовского металлургического завода. Число фасонных калибров принимаем равным девяти, общее число проходов равно одиннадцати. На основании опыта прокатки фасонных профилей на стане 550 распределяем общее число проходов по клетям следующим образом: 6 – 4 – 1. При этом первые два прохода осуществляются в ящичных калибрах. Фасонные калибры по ходу прокатки обозначаем номерами *1* – *9*. В качестве исходной принята заготовка с прямоугольным поперечным сечением 114×148 мм.

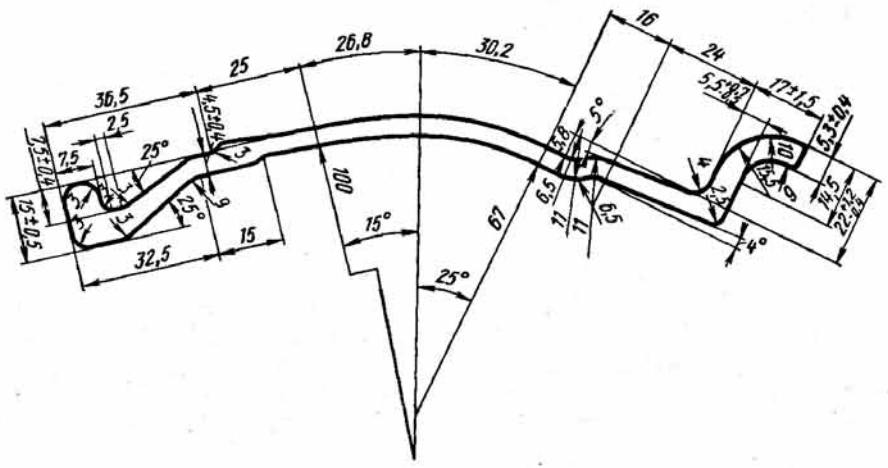


Рис. 119. Размеры и допуски готового профиля замочного основания обода колеса 6.00 *F*-16

Режим обжатий замочной части, полотна и бортовой части профиля (рис. 115 и 118) выбираем (табл. 4) на основании (62). Толщина полосы, задаваемой в калибр *1*, равна 74 мм. Углы изгиба полотна профиля со стороны замочной части заданы в соответствии с (63):

$$\beta_5 = 0^{\circ};\ \beta_6 = 5^{\circ};\ \beta_7 = 8^{\circ};\ \beta_8 = 12^{\circ};\ \beta_9 = 15^{\circ}.$$

Определение средней линии изогнутой части на стыке полотна и бортовой части (рис. 119) трудностей не представляет и осуществляется на основании геометрических построений. Ширина замочной части фасонных калибров 3– 9 остается постоянной и равной 62,3 мм. Уширение полностью отсутствует. Поскольку увеличение изгиба полотна профиля по ходу прокатки происходит в средней части полосы, то

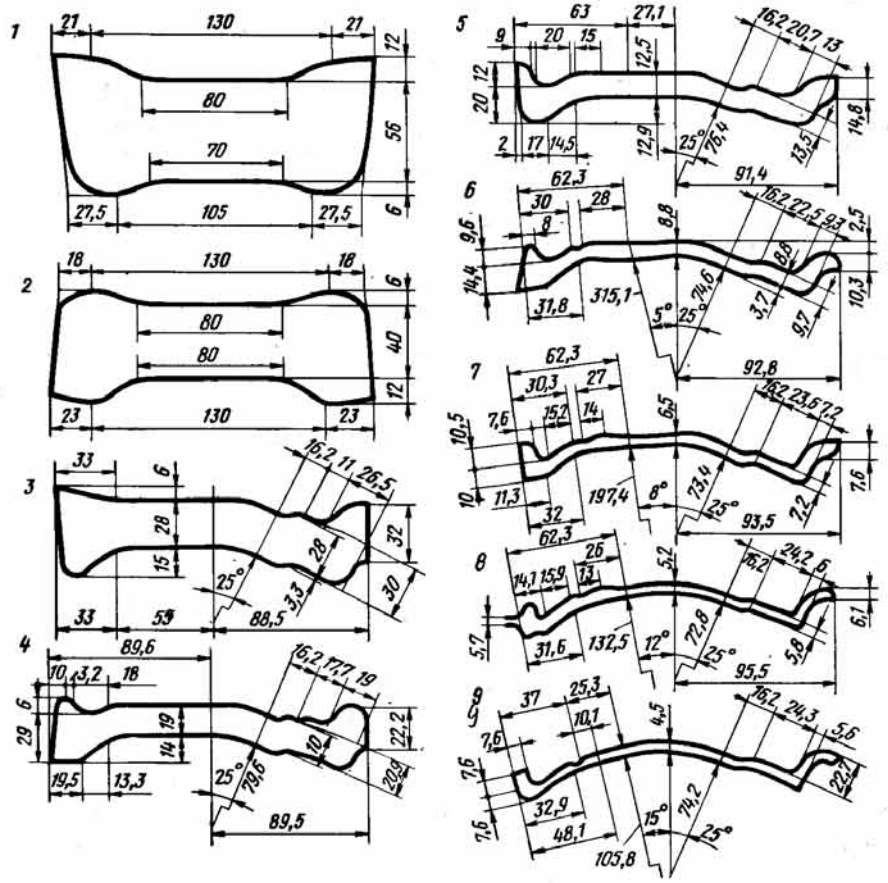


Рис. 120. Размеры калибров для прокатки профиля замочного основания обода колеса 6.00*F*-16

Таблица 4. Режим обжатий при прокатке профиля обода колеса 6.00F-16

Номер калибра	H_1			H_2			H_3		H_4			H_4			H_5			H_6		
	1/η	H	ΔH	1/η	H	ΔH	1/η	H	ΔH	1/η	H	ΔH	1/η	H	ΔH	1/η	H	ΔH	1/η	H	ΔH
1	1,19	62,0	12,0	1,32	56,0	18,0	1,34	55,0	19,0	1,23	60,0	14,0	–	–	–	–	–	–	–	–	–
2	1,19	52,0	10,0	1,40	40,0	16,0	1,40	39,0	16,0	1,33	45,2	14,8	–	–	–	–	–	–	–	–	–
3	1,24	42,0	10,0	1,43	28,0	12,0	1,43	28,0	11,0	1,37	33,0	12,2	–	28,5	–	–	32,0	–			
4	1,45	29,0	13,0	1,47	19,0	9,0	1,47	19,0	9,0	1,44	22,9	10,1	1,45	19,0	9,5	1,44	22,2	10,0			
5	1,44	20,0	9,0	1,50	12,5	6,5	1,50	12,7	6,3	1,47	15,6	7,3	1,46	13,0	6,0	1,45	14,8	7,4			
6	1,38	14,4	5,5	1,43	8,8	3,7	1,43	8,9	3,8	1,43	10,9	4,7	1,40	9,3	3,7	1,44	10,3	4,5			
7	1,32	10,9	3,5	1,35	6,5	2,3	1,35	6,6	2,3	1,35	8,1	2,8	1,29	7,2	2,1	1,36	7,6	2,7			
8	1,25	8,7	2,2	1,25	5,2	1,3	1,25	5,3	1,3	1,25	6,5	1,6	1,21	6,0	1,2	1,24	6,1	1,5			
9	1,15	7,6	1,1	1,15	4,5	0,7	1,15	4,6	0,7	1,15	5,7	0,8	1,07	5,6	0,4	1,15	5,3	0,8			

выступ замочной части поступает в очаг деформации предварительно подготовленным к точному совпадению с калибром за счет внеконтактной деформации. Для надежного выполнения наружного нижнего угла замочной части в калибрах *7* и *8* предусмотрены дополнительные ложные фланцы.

В калибрах *6* и *8* разъем со стороны бортовой части выполнен снизу. Так как материал валков – полутвердый чугун, то при деформации наклонного участка бортовой части не исключено скалывание валков в ослабленных местах. Поэтому со стороны бортовой части в калибрах *6* и *8* сделан с целью увеличения прочности этого участка валков специальный уклон с закруглением по радиусу, что позволяет полностью устранить скалывание валков в ослабленном сечении.

По разъему кромки выступа замочной части готового профиля в соответствии с рис. 119 предусмотрен не только радиус до 4 мм, но также и скос 4×4 мм. Это учтено формой выступа в калибре *8*. Скос на кромке выступа не ухудшает товарного вида и качества готового профиля, но значительно облегчает задачу наилучшего заполнения выступа в чистовом калибре.

При опытной прокатке профиль обода колеса 6.00F-16 получен в соответствии с техническими условиями.

5. Освоение профиля основания обода колеса 5.00Р-20

Размеры и допуски готового профиля основания обода колеса 5.00Р-20 приведены на рис. 121. Профиль прокатывается из стали марки Ст3кп. Расчет калибровки выполнен для линейного трехклетевого стана 550, состоящего из двух трехвалковых клетей и одной двухвалковой, по изложенной выше методике Чусовского металлургического завода. Число проходов на стане 550 обычно составляет 9 или 11 с распределением проходов по клетям соответственно 4–4–1 и 6–4–1. Из сортамента исходных заготовок могут быть использованы только

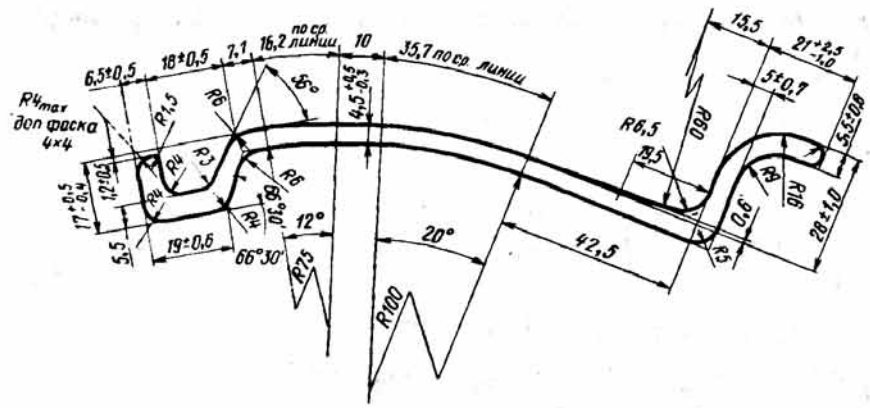


Рис. 121. Размеры и допуски готового профиля основания обода колеса 5.00Р-20

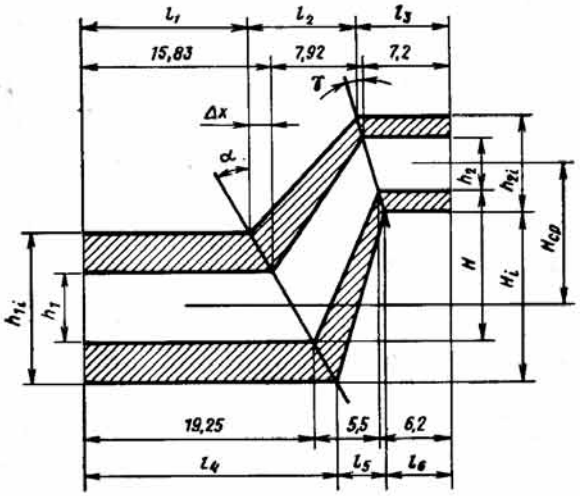


Рис. 122. Замочная часть профиля обода колеса 5.00Р-20

сечения 120×120 мм и 114×148 мм. Однако предварительная прикидка расчета показывает, что сечение 120×120 мм несколько маловато, поэтому приходится использовать заготовку сечением 114×148 мм с прокаткой ее по схеме: два ящичных сопряженных калибра, в которых заготовка прокатывается плашмя, затем два сопряженных ребровых калибра и, наконец, семь фасонных калибров. Распределение по клетям: 6–4–1.

Угол наклона полотна со стороны бортовой части во всех фасонных калибрах одинаков и равен 20°. Углы изгиба полотна профиля со стороны замочной части заданы с учетом формы готового профиля и в соответствии с (63)

$$\beta_7 = 0;\ \beta_8 = 4^\circ;\ \beta_9 = 7^\circ;\ \beta_{10} = 10^\circ;\ \beta_{11} = 12^\circ.$$

Для дополнительных расчетов, кроме приведенных выше, использованы следующие формулы и соотношения:

1. Замочная часть (рис. 122)

$$\Delta x = \frac{\Sigma \Delta h_2}{2}\ \mathrm{tg}\,\gamma,\ \ \mathrm{tg}\,\gamma = \frac{7{,}2 - 6{,}2}{4{,}6} = 0{,}2174 = \mathrm{const},$$

$H_i = 12{,}2 + 0{,}5\,(h_1 - h_2)$, $l_2 = 8$ мм,

$l_3 = 7{,}2 + \Delta x$, $\quad l_5 = \mathrm{const} = 5{,}5$ мм,

$l_6 = 6{,}2 - \Delta x$,

$\alpha_{11} = 12^\circ;\ \alpha_{10} = 10^\circ;\ \alpha_9 = 7^\circ;\ \alpha_8 = 4^\circ;$

$R_{ср} = 79$ мм; $R_{ср} = 93{,}95$ мм; $R_{ср} = 134{,}2$ мм; $R_{ср} = 313{,}2$ мм.

2. Бортовая часть (рис. 123)

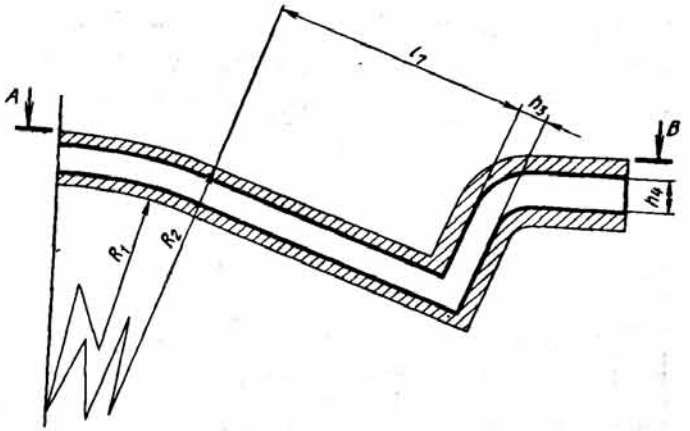


Рис. 123. Бортовая часть профиля обода колеса 5.00Р-20

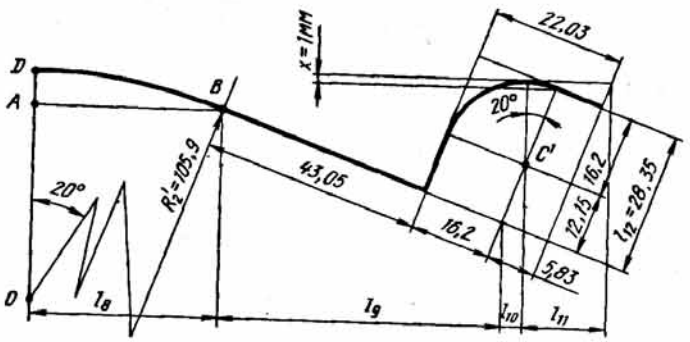


Рис. 124. Верхняя кромка бортовой части профиля обода колеса 5.00Р-20

$l_7 = 45{,}55 - 0{,}5\,h_3$,

$l_{12} = 28{,}7 - 0{,}5\,h_2 + 0{,}5\,h_4 = 28{,}7 + 0{,}5\,(h_4 - h_2)$ (рис. 124),

$R_1 = R_{ср} - 0{,}5\,h_2$, $R_1' = R_{ср} + 0{,}5\,h_2$,

$R_2 = 103{,}6 - 0{,}5\,h_2$, $R_2' = 103{,}6 + 0{,}5\,h_2$.

3. Ширина бортовой части без учета уширения (рис. 123)

$l_8 = R_2' \sin 20^\circ = 105{,}9 \cdot 0{,}342 = 36{,}22$ мм,

$l_9 = (43{,}05 + 16{,}2) \cos 20^\circ = 59{,}25 \cdot 0{,}9397 = 55{,}68$ мм,

$l_{10} = 12{,}15 \sin 20^\circ = 12{,}15 \cdot 0{,}342 = 4{,}16$ мм,

$$l_{11} = \frac{2\pi \cdot 16{,}2 \cdot 20}{360} + 5{,}8327 = 11{,}48 \text{ мм},$$

$l_8 + l_9 + l_{10} + l_{11} = 107{,}5$ мм.

Таблица 5. Распределение коэффициентов обжатия по элементам и калибрам при прокатке профиля обода колеса 5.00Р-20

Номер калибра	h_1	h_2																						
	h_1	k	$1/\eta$	Δh_1	h_2	k	$1/\eta$	Δh_2	h_3	k	$1/\eta$	Δh_3	h_4	k	$1/\eta$	Δh_4
11	5,5	1	1,2	1,1	4,6	1,0	1,2	0,9	5,0	0,95	1,14	0,7	5,9	1	1,2	1,2
10	6,6	1	1,35	2,3	5,5	1,0	1,35	1,9	5,7	0,95	1,28	1,6	7,1	1	1,35	2,5
9	8,9	1	1,45	4	7,4	1,0	1,45	3,3	7,3	0,95	1,385	2,8	9,6	0,97	1,4	3,8
8	12,9	0,98	1,52	6,8	10,7	1,0	1,55	5,9	10,1	0,94	1,457	4,6	13,4	0,96	1,49	6,6
7	19,6	0,97	1,55	10,8	16,6	1,0	1,6	9,9	14,7	0,94	1,5	7,3	20	0,95	1,52	9,6
6	30,4	0,96	1,54	16,4	26,5	1,0	1,6	15,9	22	0,92	1,47	10	30,4	0,94	1,5	15,2
5	46,8	0,906	1,41	19,2	42,4	1,0	1,556	23,6	32	–	–	–	45,6	0,92	1,447	20,4
4	66	–	–	–	66	–	–	–	45,0	–	–	–	66	–	–	–

Таблица 6. Расчет параметров замочной части при прокатке профиля обода колеса 5.00Р-50

Номер калибра	h_1	h_2	$\Sigma\Delta h$	$h_1 - h_2$	$\frac{h_1 - h_2}{2}\Delta x$	l_1	l_2	l_3	l_3^* расч.	l_4	l_5	l_6^* расч.	l_6^{**} расч.	H_i
11	5,5	4,6	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
10	6,6	5,5	0,9	1,1	0,55	0,0978	15,65	8	7,2978	7,3	19,35	5,5	6,1022	6,1	12,75
9	8,9	7,4	2,8	1,5	0,75	0,3044	15,45	8	7,5044	7,5	19,55	5,5	5,8956	5,9	12,95
8	12,9	10,7	6,1	2,2	1,1	0,6631	15,1	8	7,8631	7,85	19,9	5,5	5,5369	5,55	13,3
7	19,6	16,6	12,0	3,0	1,5	1,3044	14,45	8	8,5044	8,5	20,55	5,5	4,8956	4,9	13,7
6	30,4	26,5	21,9	3,9	1,95	2,3805	13,35	8	9,5805	9,6	21,65	5,5	3,8195	3,8	14,15
5	46,8	42,4	37,8	4,4	2,2	4,1089	11,65	8	11,3089	11,3	23,35	5,5	2,0911	2,1	14,4
4	66	66	61,4	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–

* Расчетные значения.

** Фактические значения.

Таблица 7. Рабочая программа калибровки при прокатке профиля обода колеса 5.00Р-20

Номер калибра	h_1	h_2	h_3	h_4	l_1	l_3	l_4	l_6	H_i	R_1	R_1'	R_2	R_2'	l_7	x_i	m	$z_з^*$	$z_б^{**}$	$\Sigma\Delta h_4$	$\Sigma\Delta h_2$
11	5,5	4,6	5,0	5,9	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0,7	–	–	–	–
10	6,6	5,5	5,7	7,1	15,65	7,3	19,35	6,1	12,75	91,2	96,7	100,85	106,35	42,7	1,15	0,85	16,79	36,37	1,2	0,9
9	8,9	7,4	7,3	9,6	15,45	7,5	19,55	5,9	12,95	130,5	137,9	99,9	107,3	41,9	1,45	1,13	16,81	36,7	3,7	2,8
8	12,9	10,7	10,1	13,4	15,1	7,85	19,9	5,55	13,3	307,85	318,55	98,25	108,95	40,5	1,7	1,65	16,66	37,26	7,5	6,1
7	19,6	16,6	14,7	20,0	14,45	8,5	20,55	4,9	13,7	–	–	95,3	111,9	38,2	2,05	2,55	–	38,26	14,1	12
6	30,4	26,5	20	30,4	13,35	9,6	21,65	3,8	14,15	–	–	90,35	116,85	34,55	2,3	4,0	–	39,96	24,5	21,9
5	45	42,4	28	45,6	11,65	11,3	23,35	2,1	14,4	–	–	82,4	124,8	29,55	1,95	4	–	42,68	39,7	37,8
4	66	66	–	66	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–

* Замочная часть.
** Бортовая часть.

4. Расположение верхней кромки бортовой части (рис. 124)

$DA = R_2' - AO = 105{,}9 - 105{,}9 \cos 20^\circ = 6{,}39$ мм,

$C' = 12{,}15 \cos 20^\circ = 11{,}42$ мм,

$x = 11{,}42 + 16{,}2 - 6{,}39 - 59{,}25 \sin 20^\circ \approx 1{,}0$ мм,

$x_i = x + 0{,}5(\Sigma\Delta h_4 - \Sigma\Delta h_2) = 1{,}0 + 0{,}5\ (\Sigma\Delta h_4 - \Sigma\Delta h_2)$,

где $\Sigma\Delta h_4$ и $\Sigma\Delta h_2$ – нарастающие суммарные абсолютные обжатия.

Из условия деформации выбираем коэффициенты обжатия (а соответственно и толщины) для основного элемента – толщины h_2 полотна:

$1/\eta_{11} = 1{,}2$; $1/\eta_{10} = 1{,}35$; $1/\eta_9 = 1{,}45$; $1/\eta_8 = 1{,}55$;

$1/\eta_7 = 1{,}6$; $1/\eta_6 = 1{,}6$; $1/\eta_5 = 1{,}556$.

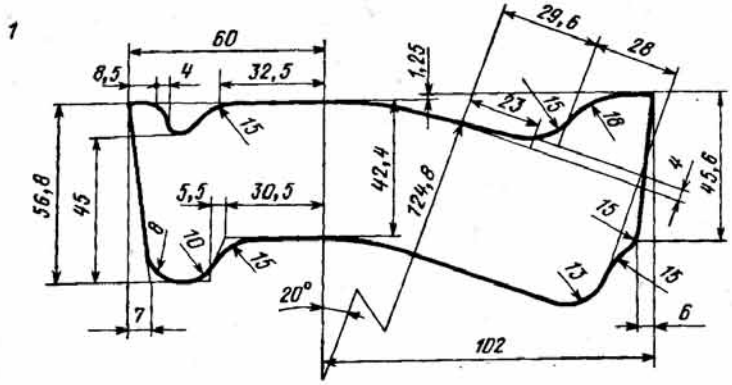
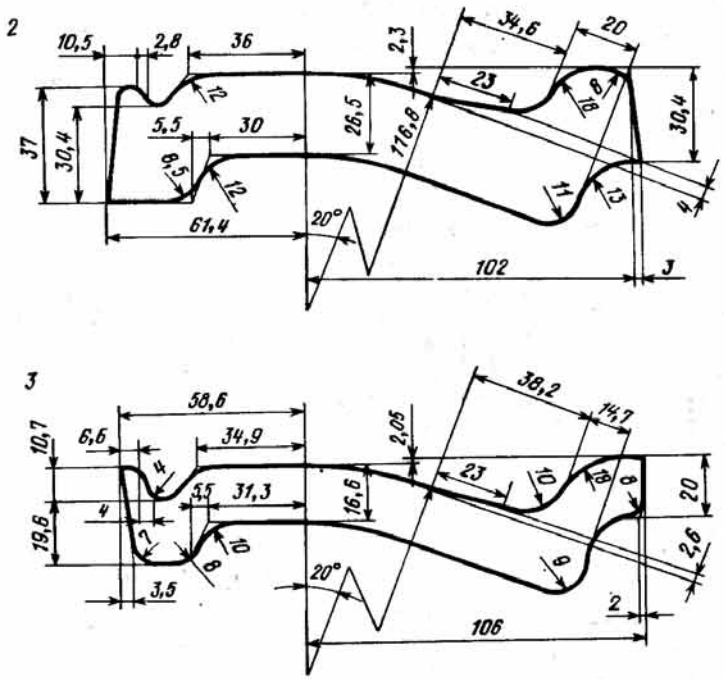


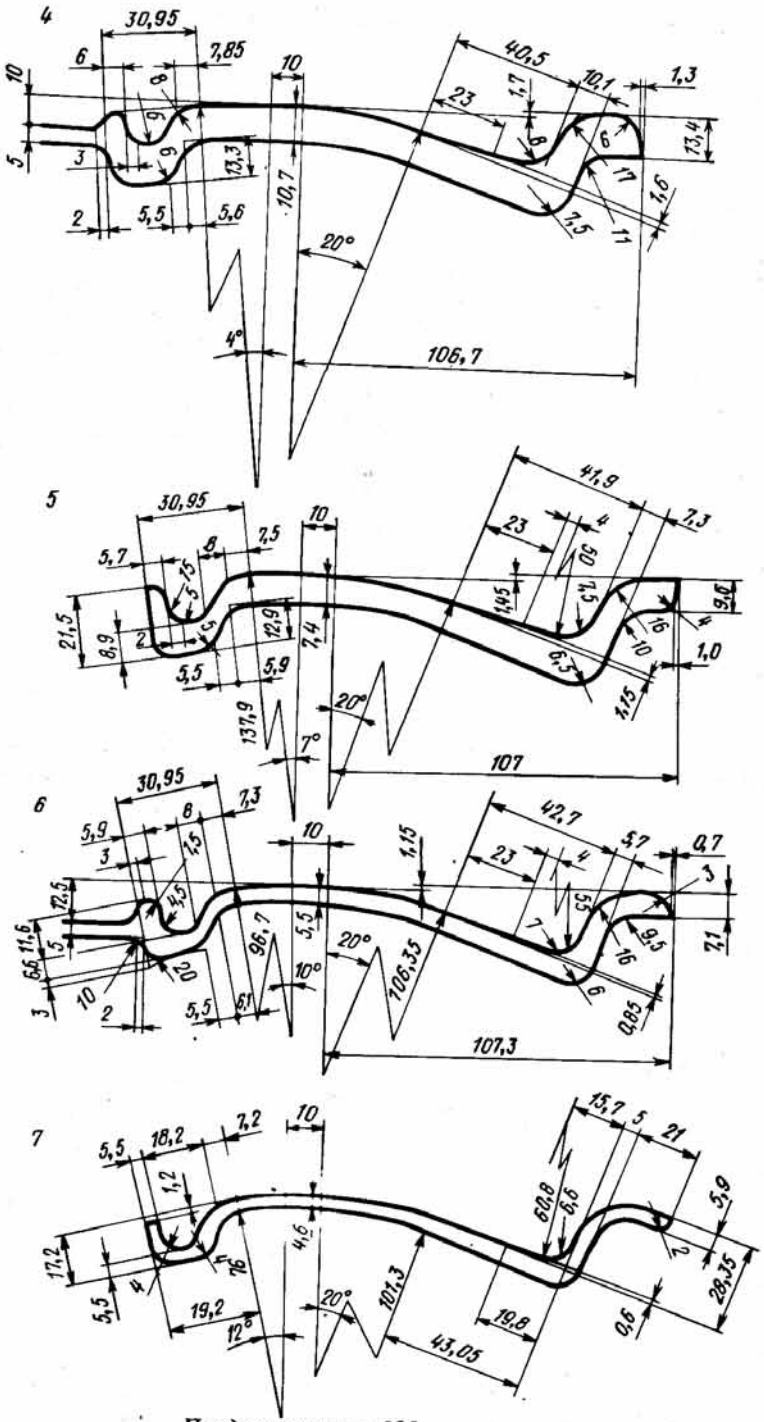
Рис. 125. Размеры калибров для прокатки профиля обода колеса 5.00Р-20

Результаты расчета сведены в табл. 5, 6 и 7. Калибровка профиля приведена на рис. 125.

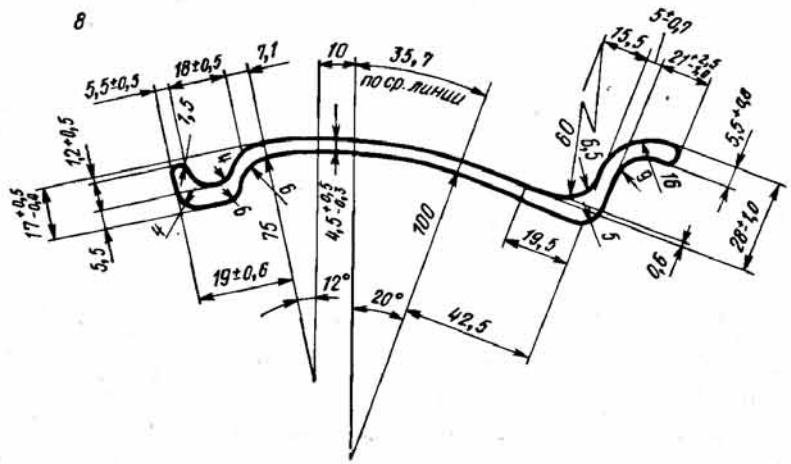
При опытной прокатке профиль получен в соответствии с техническими условиями.



Продолжение рис. 125



Продолжение рис. 125



Продолжение рис. 125

6. Освоение профиля основания обода колеса 310-533

Размеры и допуски готового профиля основания обода колеса 310-533 приведены на рис. 126. Для расчета калибровки на стане 550 Чусовского металлургического завода использована изложенная выше методика расчета по средней линии с разбивкой профиля на отдельные элементы с толщинами h_1, $h_2 - h_7$ (рис. 127). Для расчета основных размеров всех калибров использованы следующие формулы:

$$H_1 = H_{01} - 0{,}5\ (\Sigma\Delta h_3 - \Sigma\Delta h_1),$$

$$H_2 = H_{02} - 0{,}5\ (\Sigma\Delta h_3 - \Sigma\Delta h_5),$$

$$H_3 = H_{03} - 0{,}5\ (\Sigma\Delta h_7 - \Sigma\Delta h_5),$$

где H_{01}, H_{02}, H_{03} – соответствующие размеры чистового калибра.

$$\Delta_1 = H_1 \operatorname{tg} 30^{\circ},$$

$$\Delta_2 = H_2 \operatorname{tg} 30^{\circ},$$

$$\Delta_3 = H_3 \operatorname{tg} 30^{\circ}.$$

Далее определяем размеры l_1, l_2, l_3, l_4

$$l_1 = l_{01} + 0{,}5\ \left(\frac{1}{\cos 30^{\circ}}\ \Sigma\Delta h_2 - \operatorname{tg} 30^{\circ}\Sigma\Delta h_1\right),$$

$$l_2 = l_{02} + 0{,}5\ \left(\operatorname{tg} 30^{\circ}\ \Sigma\Delta h_1 - \frac{1}{\cos 30^{\circ}}\ \Sigma\Delta h_2\right) +$$

$$+ 0{,}5\ \left(\operatorname{tg} 30^{\circ}\Sigma\Delta h_5 - \frac{1}{\cos 30^{\circ}}\ \Sigma\Delta h_4\right),$$

$$l_3 = l_{03} + 0{,}5\ \left(\frac{1}{\cos 30^{\circ}}\ \Sigma\Delta h_4 - \operatorname{tg} 30^{\circ}\Sigma\Delta h_5\right) +$$

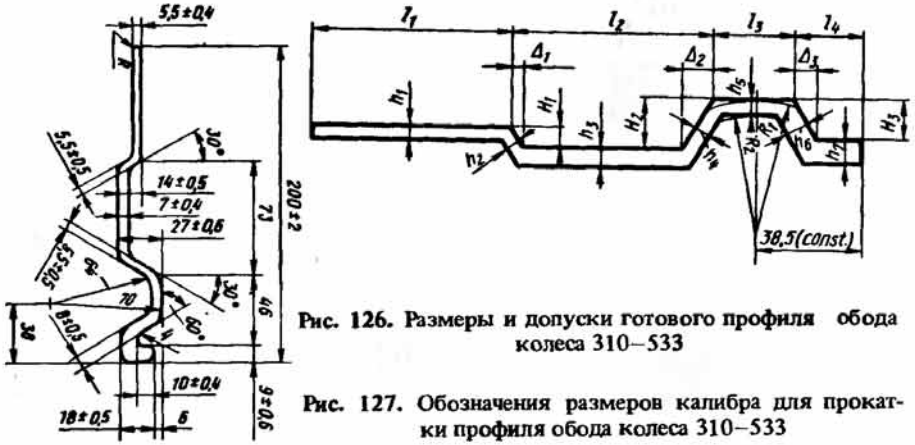


Рис. 126. Размеры и допуски готового профиля обода колеса 310–533

Рис. 127. Обозначения размеров калибра для прокатки профиля обода колеса 310–533

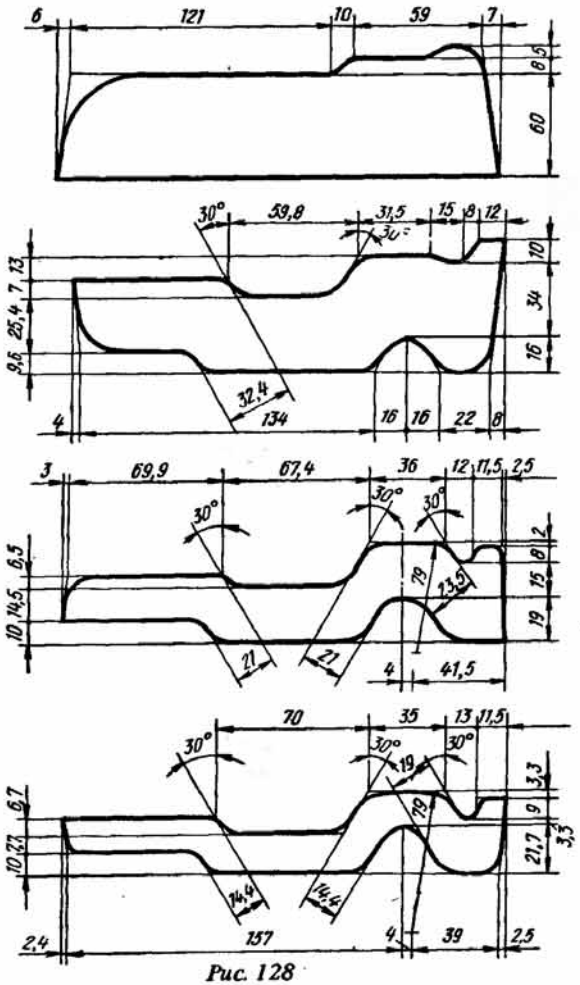


Рис. 128

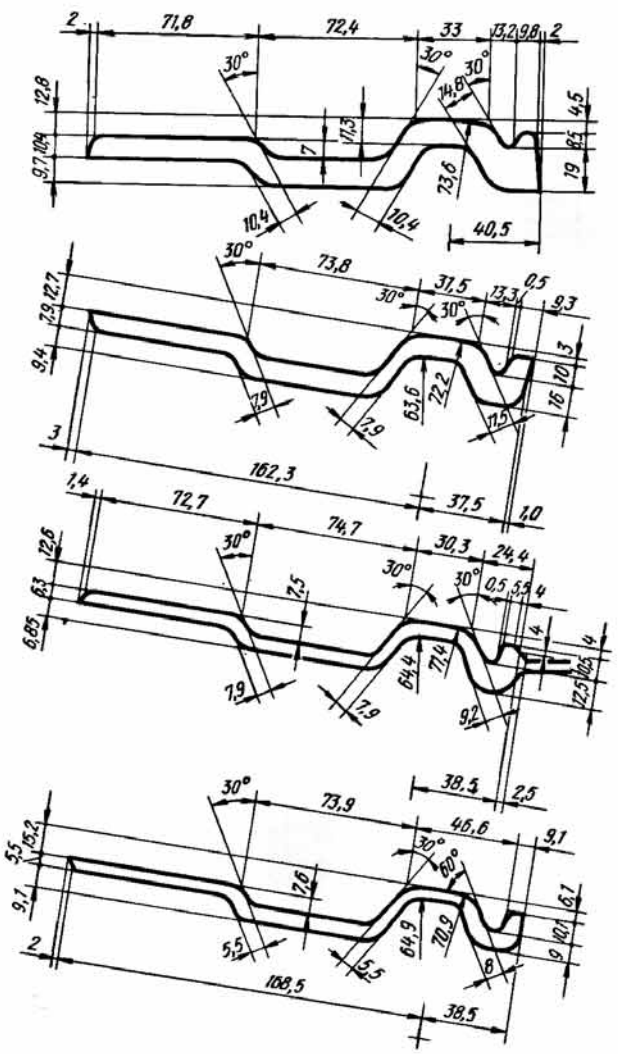


Рис. 128. Размеры калибров для прокатки профиля обода колеса 310–533

$$+ 0,5\left(\frac{1}{\cos 30^{\circ}}\Sigma\Delta h_6 - \operatorname{tg} 30^{\circ}\,\Sigma\Delta h_5\right),$$

$$l_4 = l_{04} + 0,5\left(\operatorname{tg} 30^{\circ}\,\Sigma\Delta h_5 - \frac{1}{\cos 30^{\circ}}\Sigma\Delta h_6\right),$$

где l_{01}, l_{02}, l_{03}, l_{04} – соответствующие размеры чистового калибра.

Результаты расчетов представлены в табл. 8–11. Число фасонных калибров 9 с распределением по проходам: 4 – 4 – 1. Исходное пря-

Таблица 8. Распределение коэффициентов обжатия по проходам при прокатке профиля замочного основания обода 310-533

Номер калибра	Обжатие элементов по толщине										Коэффициент деформации по толщине					Коэффициент неравномерности деформации				
	h_{1-2-4}		h_3		h_5		h_6		h_7		$1/\eta_{1-2-4}$	$1/\eta_3$	$1/\eta_5$	$1/\eta_6$	$1/\eta_7$	k_{1-2-4}	k_3	k_5	k_6	k_7
	h	Δh	h	Δh	h	Δh	h	Δh	h	Δh										
11	5,5	0,8	7	1,05	6	0,9	8	1,2	9	1,35	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
10	6,3	1,6	8,05	1,95	6,9	1,7	9,2	2,3	10,35	2,55	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
9	7,9	2,5	10	3,1	8,6	2,7	11,5	3,3	12,9	3,7	1,313	1,3	1,313	1,287	1,287	1,01	1,0	1,01	0,99	0,99
8	10,4	4	13,1	6,6	11,3	4,3	14,8	5	16,6	5,2	1,39	1,35	1,377	1,366	1,31	1,03	1,0	1,02	0,99	0,97
7	14,4	6,6	17,7	6,8	15,6	6,7	19,8	7,1	21,8	7	1,46	1,39	1,43	1,36	1,32	1,05	1,0	1,03	0,98	0,95
6	21	11,4	24,5	10,8	22,3	11,1	26,9	10,1	28,8	9,8	1,54	1,44	1,5	1,38	1,34	1,07	1,0	1,04	0,96	0,93
5	32,4	17,1	35,3	14,2	33,4	16,1	37	12,5	38,6	10,9	1,53	1,4	1,48	1,33	1,29	1,09	1,0	1,06	0,95	0,92
4	49,5	19,5	49,5	19,5	49,5	–	49,5	–	49,5	–	1,4	1,4	1,4	–	–	–	–	–	–	–
3	69	–	69	21	–	–	–	–	–	–	1,3	1,3	1,3	–	–	–	–	–	–	–
2	–	–	90	22	–	–	–	–	–	–	1,25	1,25	1,25	–	–	–	–	–	–	–
1	–	–	112	23	–	–	–	–	–	–	1,2	1,2	1,2	–	–	–	–	–	–	–
			135																	

Таблица 9. Расчетная таблица калибровки профиля замочного основания обода 310-533

Номер калибра	h_{1-2-4}	h_3	h_5	h_6	h_7	Δh_{1-2-4}	Δh_3	Δh_5	Δh_6	Δh_7	$\Sigma\Delta h_{1-2-4}$	$\Sigma\Delta h_3$	$\Sigma\Delta h_5$	$\Sigma\Delta h_6$	$\Sigma\Delta h_7$	$0,5\Sigma\Delta h_{1-2-4}$	$0,5\Sigma\Delta h_3$	$0,5\Sigma\Delta h_5$	$0,5\Sigma\Delta h_6$	$0,5\Sigma\Delta h_7$
11	5,5	7	6	8	9	0,8	1,05	0,9	1,2	1,35	0,8	1,05	0,9	1,2	1,35	0,4	0,525	0,45	0,6	0,675
10	6,3	8,03	6,9	9,2	10,35	1,6	1,95	1,7	2,3	2,55	2,4	3,0	2,6	3,5	3,9	1,2	1,5	1,3	1,75	1,95
9	7,9	10	8,6	11,5	12,9	2,5	3,1	2,7	3,3	3,7	4,9	6,1	5,3	6,8	7,6	2,45	3,05	2,65	3,4	3,8
8	10,4	13,1	11,3	14,8	16,6	4	4,6	4,3	5	5,2	8,9	10,7	9,6	11,8	12,8	4,45	5,35	4,8	5,9	6,4
7	14,4	17,7	15,6	19,8	21,8	6,6	6,8	6,7	7,1	7	15,5	17,5	16,3	18,9	19,8	7,75	8,85	8,15	9,45	9,9
6	21	24,5	22,3	26,9	28,8	11,4	10,8	11,1	10,1	9,8	26,9	28,3	27,4	29	29,6	13,35	14,15	13,7	14,5	14,8
5	32,4	35,3	33,4	37	38,6	17,1	14,2	16,1	12,5	10,9	44	42,5	43,5	41,5	40,5	22		22,25	20,75	–
4	49,5	49,5	49,5	49,5	49,5															

Таблица 10. Расчетная таблица калибровки профиля замочного основания обода 310-533

Номер калибра	$\frac{\Sigma\Delta h_{2-4}}{2\cos 30^\circ}$	$\frac{\Sigma\Delta h_6}{2\cos 30^\circ}$	$\frac{\Sigma\Delta h_1}{2}\mathrm{tg}30^\circ$	$\frac{\Sigma\Delta h_5}{2}\mathrm{tg}\,30^\circ$	l_1	l_2	l_3	l_4	H_1	H_2	H_3
11	0,4619	0,69	0,231	0,26	12,9	75,15	29,65	24,85	7,6	20,2	16,2
10	1,3856	2,02	0,693	0,75	13,1	74,7	30,3	24,4	7,5	20,1	16
9	2,829	3,93	1,4145	1,53	13,6	73,8	31,56	23,5	7,3	20	15,55
8	5,1384	6,8	2,5692	2,77	74,3	72,4	33,35	22,45	7	19,8	15,05
7	8,95	10,9	4,4745	4,7	75,5	70,2	36,05	20,8	6,7	19,65	14,6
6	15,53	16,74	7,7654	7,91	77,4	67,4	40,1	18,65	6,5	19,5	14,45
5	25,4	23,96	12,7	12,846	8,07	59,8	46,1	17,2	6,9	19,75	15,1
4	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–

Таблица 11. Рабочая таблица калибровки профиля замочного основания обода 310-533

Номер калибра	h_1	h_2	h_3	h_4	h_5	h_6	h_7	l_1	l_2	l_3	l_4	H_1	H_2
11	5,5	5,5	7	5,5	6	8	9	72,9	75,15	29,65	24,85	7,6	20,2
10	6,3	6,3	8,05	6,3	6,9	9,2	10,35	73,1	74,7	30,3	24,4	7,5	20,1
9	7,9	7,9	10	7,9	8,6	11,5	12,9	73,6	73,8	31,55	23,5	7,3	20
8	10,4	10,4	13,1	10,4	11,3	14,8	16,6	74,3	72,4	33,35	22,45	7,0	19,8
7	14,4	14,4	17,7	14,4	15,6	19,8	21,8	75,5	70,2	36,05	20,8	6,7	19,65
6	21	21	24,5	21	22,3	26,9	28,8	77,4	67,4	40,1	18,65	6,5	19,5
5	32,4	32,4	35,3	32,4	33,4	37	38,6	80,7	59,8	46,1	17,2	6,9	19,75

Номер калибра	H_3	H_2-H_1	$H_2-H_1-H_3$	$L_{расч}$	Δ_1	Δ_2	Δ_3	R_1	R_2
11	16,2	12,6	−3,6	202,65	4,4	11,65	9,35	70,9	64,9
10	16	12,6	−3,4	202,5	4,33	11,6	9,25	71,35	64,45
9	15,55	12,7	−2,85	202,45	4,2	11,55	9,0	72,2	63,6
8	15,05	12,8	−2,25	202,5	4,05	11,45	10,2	73,55	62,25
7	14,6	12,95	−1,65	202,55	3,85	11,35	8,4	75,7	60,1
6	14,45	13	−1,45	202,55	3,75	11,25	8,35	79,05	56,75
5	15,1	12,85	−2,25	203,8	4	11,4	8,7	84,6	51,2

моугольное сечение 190×80 мм. Калибровка профиля приведена на рис. 128. При освоении профиль получен в соответствии с техническими условиями.

7. Прокатка профиля обода колеса автомобиля ЗИЛ-157

Прокатка профилей ободов второго типа вследствие отсутствия замочной части может проводиться без изгиба полотна в чистовом калибре [2].

При разработке калибровки профиля обода колеса автомобиля ЗИЛ-157 на линейном трехклетевом стане 550 принята развернутая конструкция калибров, обеспечивающая в процессе прокатки простую настройку стана, хорошую восстанавливаемость калибров при переточках и низкий расход прокатных валков.

Для того, чтобы во время прокатки не происходило смещения валков относительно друг друга, проекции правой и левой частей развернутых калибров на вертикальную ось должны быть приблизительно равными.

При расчете калибровки ширину калибров определяли по средней линии профиля с учетом уширения, после чего проводили наложение чертежей шаблонов и соответственно корректировали ширину. Такой двойной контроль обусловлен сложным характером формоизменения в развернутых калибрах, где, кроме деформации, происходит смещение задаваемой полосы относительно калибра и штамповка в месте соединения бортовой части с полотном.

Чистовой калибр (рис. 129), в котором предусмотрено выпрямление профиля, расположен на валках с учетом равенства вертикальных проекций обеих частей профиля, что исключает смещение валков при прохождении полосы. Угол наклона относительно горизонтальной оси равен 15°. Такое расположение чистового (седьмого) калибра, обеспечивая прокатку в соответствии с техническими условиями и в пределах допусков, все же имеет недостатки. При рабочем положении валков (т.е. при прохождении полосы) зазор между нижним и верхним валками со стороны торцевой части полотна вследствие недостаточной жесткости клети достигает 1,5 мм и в месте разъема затрудняется получение острого угла. Поэтому в этом месте на готовом профиле допускается закругление радиусом до 3 мм. В черновых калибрах угол наклона полотна изменяется в пределах 20–35°, постепенно возрастая против хода прокатки.

Валковая арматура для развернутых калибров имеет несложную конструкцию и состоит из выводных проводок и направляющих вводных линеек или коробок, закрепленных на проводковых брусьях. Вводные пропуски устанавливаются только в чистовом калибре, причем с их помощью возможна некоторая регулировка размеров готового профиля. В обжимной клети, где осуществляются четыре прохода, на задней и передней стороне стана вместо линеек устанавливаются вводные столы, отлитые из чугуна. Зазор между вводными столами и прокатными валками желательно предусматривать возможно меньше (8–12 мм), иначе при прокатке в калибрах *3* и *4* при выходе полосы из валков происходит срез боковой поверхности бортовой части, что затрудняет задачу раската в последующий калибр.

После опытной прокатки, в процессе которой имели место некоторые отклонения от расчетной схемы, были увеличены коэффициенты обжатия элементов бортовой части в калибре *7*. Это изменение калибровки было необходимо вследствие повышенного удлинения полотна в этом калибре. В результате полотно профиля получалось волнистым, чему способствовала также несимметричная форма полосы. Из-за волнистости полотна и при некотором незаполнении предчистового калибра на готовом профиле наблюдалось колебание ширины полотна. Однако разница в ширине полотна по длине полосы не превышала допускаемых отклонений.

При опытной прокатке профиля обода для автомашины ЗИЛ-157 размеры профиля получены в соответствии с техническими условиями.

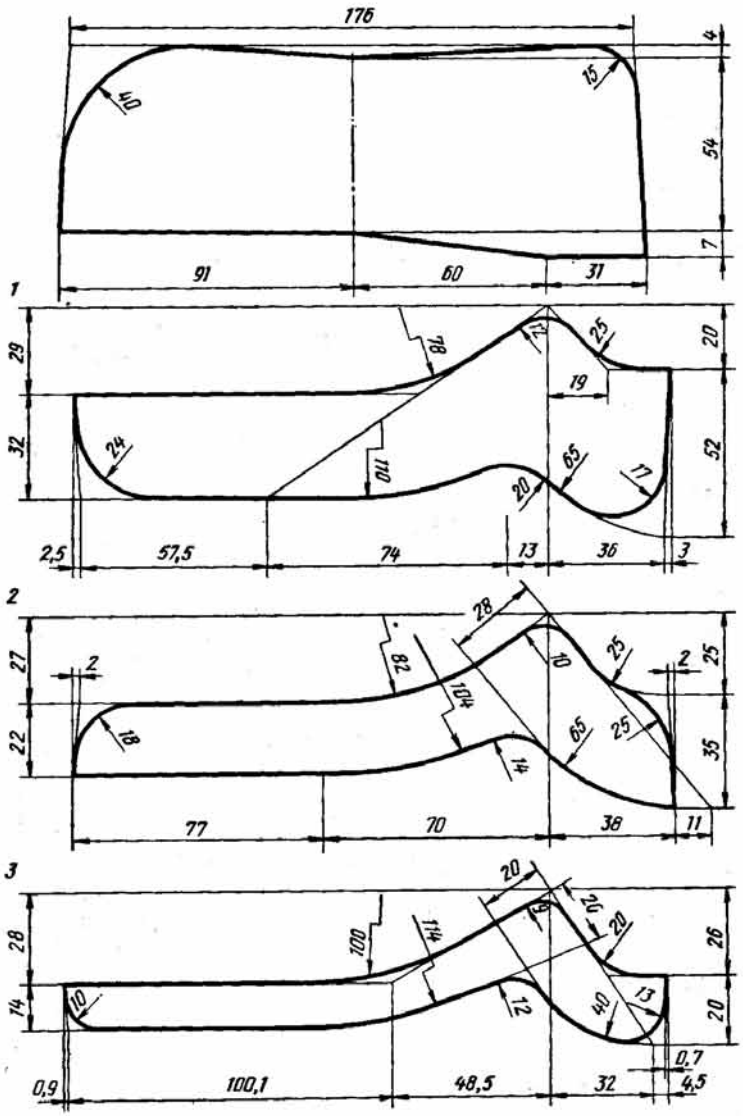
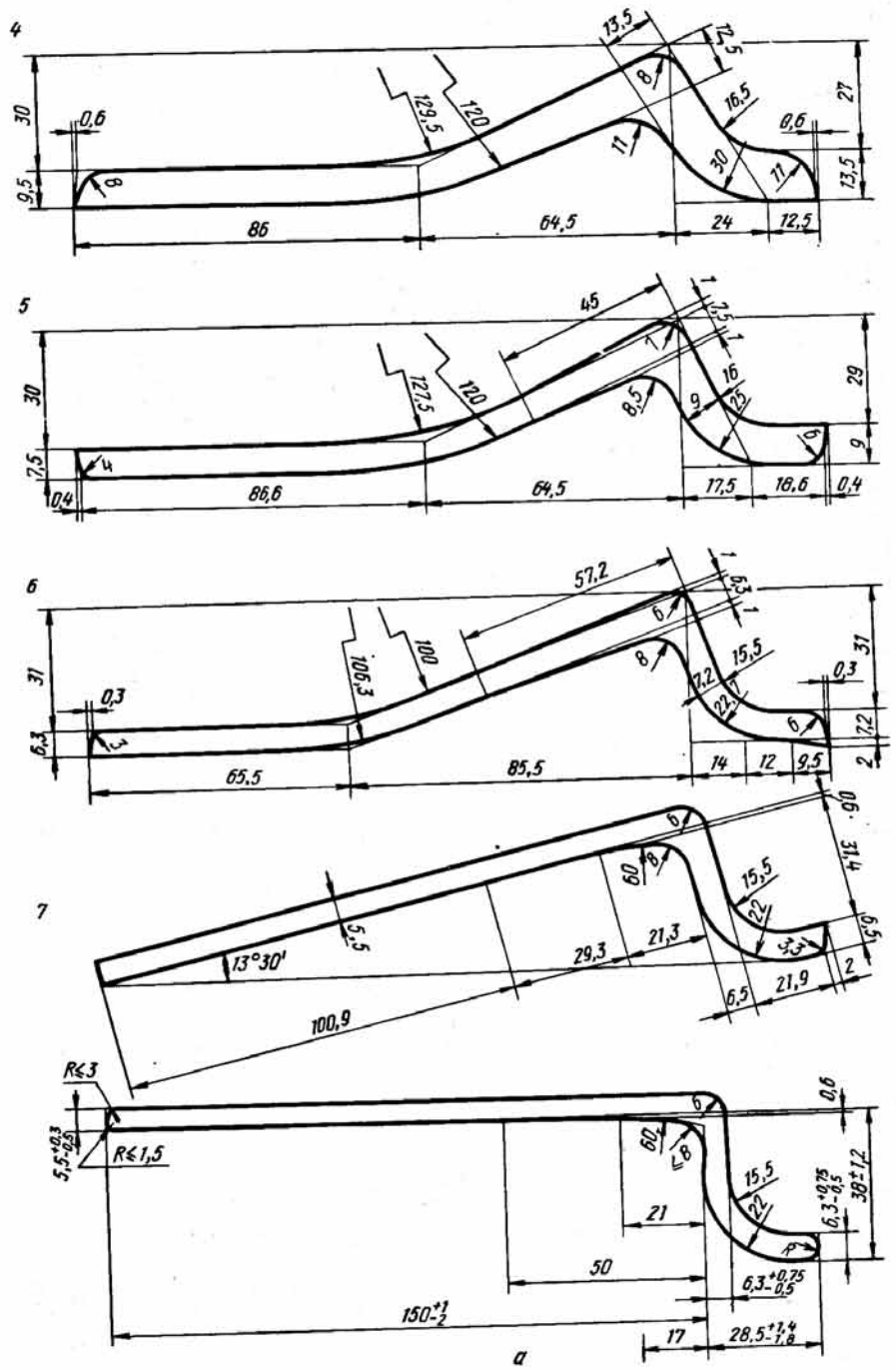


Рис. 129. Калибровка профиля обода колеса грузового автомобиля ЗИЛ-157 на линейном стане 550; *а* – готовый профиль

8. Калибровка и прокатка ободов на непрерывных станах

Профили ободов для колес автомобилей вследствие их сложной формы обычно прокатываются на станах линейного типа с диаметром валков 550–600 мм. Кроме того, годовая потребность в этих профилях, особенно для машин повышенной грузоподъемности, сравнительно невелика, и поэтому их прокатка на непрерывных станах во многих случаях оказывается нецелесообразной.



Продолжение рис. 129

В то же время в связи с быстрым развитием автомобильной промышленности и унификацией профилей проката для автомобилестроения потребность в профилях для ободов автомобилей постоянно увеличивается. Также постоянно повышаются требования к качеству этих профилей и особенно к их точности.

Существенное повышение качества и точности размеров профилей ободов может быть достигнуто только при их прокатке на современных непрерывных станах, обеспечивающих высокую температуру конца прокатки и заданную точность размеров. Учитывая, что в настоящее время накоплен достаточный опыт прокатки профилей для ободов разнообразной формы, разработаны методы калибровки этих профилей и основы технологии их производства, представляется вполне реальной и экономически выгодной прокатка профилей для ободов колес автомобилей на непрерывных станах.

В практике отечественного прокатного производства имеется опыт прокатки профиля обода 24Ч на непрерывном стане 300.

Калибровка рассчитана с учетом сохранения коэффициента обжатия во всех элементах профиля каждого фасонного калибра. С целью увеличения прочности диаметры валков чистовой клети приняты максимально возможными. Частота вращения валков чистовой клети выбрана ближе к минимальной с тем, чтобы не выйти из диапазона регулировки частоты вращения валков в черновых клетях, имеющих номинальные диаметры валков.

Все фасонные калибры, за исключением чистового, расположены в валках таким образом, что полотно профиля параллельно оси валков. Вследствие этого для прокатки профиля обода не требуется специальной валковой арматуры. На входе полосы в валки, как при прокатке лент и штрипсов, устанавливаются разъемные по вертикали вводные коробки, на выходе же полосы из валков — обычные линейки, а также верхние и нижние выводные проводки. Чистовой калибр расположен наклонно к оси валков, чтобы обеспечить уклон правой боковой грани канавки профиля.

Стойкость калибров при непрерывной прокатке имеет особенно важное значение. Вследствие переточек валков при перевалке даже одной клети приходится заново настраивать стан. При этом снижается производительность и увеличивается брак.

В США освоены на непрерывных станах 350 и 400 четыре профиля тракторных ободов шириной 125, 140 и 190 мм и массой от 4,0 до 25 кг на 1 м длины для пневматических шин колес тракторов, тягачей и грузовых автомашин.

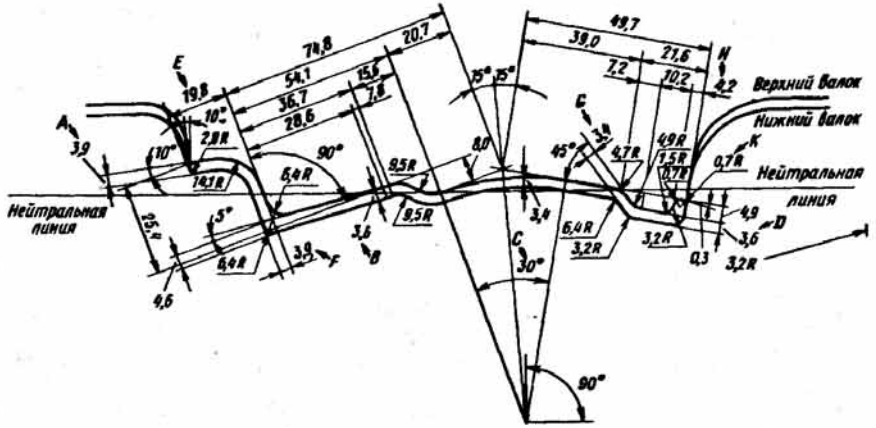


Рис. 130. Чистовой калибр и его расположение в валках при прокатке профиля обода 125 мм

Точность размеров прокатываемых профилей от +0,125 мм до −0,25 мм, за исключением тех размеров (в частности, общей ширины обода и длины бортовой части), высокая точность которых практически не требуется. Число фасонных калибров в зависимости от формы и размеров профиля обода равно семи или девяти.

На рис. 130 приведены размеры чистового калибра и расположение его в валках при прокатке профиля обода 125 мм на непрерывном двенадцатиклетевом стане 350.

Профиль обода 125 мм настраивается за счет горизонтальной и вертикальной установки валков. Точность прокатки горизонтального участка (19,8 мм) бортовой части (рис. 130) составляет ±0,8 мм, а для радиуса изгиба полотна от 0,75 до −3 мм.

Для профиля 125 мм при его прокатке толщина по ширине почти не изменяется, но возникают затруднения из-за малой толщины стенки, которая составляет всего лишь 3,4 мм.

Разъем валков в чистовых калибрах находится в центре закругления радиуса конца наружной грани замочной части. Внутренняя поверхность выступа замочной части должна быть выполнена таким образом, чтобы исключить переполнение для замочной части.

Во избежание бокового искривления полос необходимо соблюдать пропорциональность вертикальных обжатий по ширине. В первых трех проходах, где первоначально формируется профиль обода, эти обжатия не могут быть пропорциональными. Поэтому при расчете калибровки делят калибр пополам и соблюдают равенство площадей левой и правой частей.

Для обеспечения надежного формирования замочной части, и в первую очередь ее канавки, обычно ободы прокатывают с изогнутым полотном. Полотно профиля выпрямляют в холодном состоянии при совмещении этой операции с процессом загибки профиля в колесо.

Профиль обода 140 мм по конфигурации значительно сложнее профиля обода 125 мм. Для возможности его прокатки замочная часть отогнута от вертикали под углом 12°, а бортовая часть — под углом 21°. Общий угол изогнутого участка составляет 33°. Кроме изгиба полотна, предусмотрен дополнительный отгиб бортовой части на 2°. Такой изгиб профиля позволил получить одинаковые минимальные диаметры нижнего валка для бортовой и замочной частей. Сечение профиля хорошо сбалансировано, так как нейтральная линия проходит через центр полотна. Так как размеры канавки должны быть получены с большей точностью, то принят для замочной части разъем снизу. Поэтому выступ замочной части формируется в закрытой части калибра, что и обеспечивает высокую точность размеров. Точность высоты выступа замочной части должна быть ±0,8 мм.

При прокатке профиля обода 190 мм на непрерывном стане 400 вследствие изгиба полотна под углом 30° угол между боковой поверхностью бортовой части и нейтральной линией составил 71°30′, а между внутренней стороной выступа замочной части и нейтральной линией — 78°30′. Такая форма калибра обеспечивает хорошее качество поверхности готового профиля в этих местах и повышает стойкость валков. Разъем калибра со стороны замочной части сделан снизу, то есть так же, как и для профиля обода 140 мм. При этом возможна регулировка очертания выступа (высоты и толщины), что весьма важно, так как боковое стопорное кольцо автопокрышки должно свободно скользить при ее сборке и разборке.

При проектировании калибровок профилей ободов положение нейтральной линии каждого калибра определяется планиметрированием площадей. По этому способу нейтральная линия проводится так, чтобы площади калибра над ней и под ней были равны.

Так как точность большинства размеров ободов 125, 140, 150 и 190 мм колеблется от +0,125 до −0,25 мм, то соответственно шаблоны и расточка ручьев должны быть выполнены с высокой точностью. Поэтому для всех ручьев, за исключением первых трех, необходимо изготавливать эталонные шаблоны, кото-

рые служат для контрольной проверки рабочих, посадочных и вспомогательных шаблонов.

Максимальная производительность стана 400 при прокатке профиля обода 150 мм в период его освоения составила 680 т в смену.

9. Прокатка и калибровка профилей для ободов колес автомобилей

На рис. 131 приведена калибровка профиля обода колеса 7,5В-20. Профиль освоен на металлургическом заводе им. Петровского. При разработке калибровки все размеры по толщине спроектированы на минус. При определении размеров остальных элементов учитывалась качественная разница выработки прокатных валков, формирующих эти элементы, и допуски на отдельные элементы.

Прокатка проводится на стане 550 за семь фасонных проходов из прямоугольной заготовки сечением 240×90 мм. Прокатку ведут со значительным ограничением уширения. Радиусы закруглений в торцах калибров определены конструктивно из соотношения $r_n = (1 - 2)\Delta h_{n-1}$, где Δh_{n-1} – абсолютное обжатие торцевого элемента в последующем калибре.

Режим высотной деформации в калибрах определен методом разбивки профиля на отдельные элементы, имеющие определенную степень такой деформации. Конфигурация профиля такова, что как бы ни определяли эти элементы, они будут по-разному ориентированы по отношению к оси прокатки, будут разниться формой и размерами. Добиться одинаковой степени высотной деформации во всех элементах и по всем калибрам невозможно. Однако в чистовых калибрах для элементов, составляющих основную массу металла, это необходимо выполнить. Иногда приходится отступать от этого правила для заполнения металлом сложных по конфигурации торцевых элементов полосы.

При прокатке профиля обода колеса 7,5В-20 за семь проходов для полотна коэффициенты высотной деформации взяты в соответствии с уравнением (61). Для остальных элементов желательно иметь такую же степень деформации. Особенно важно обжатие вертикального элемента бортовой части.

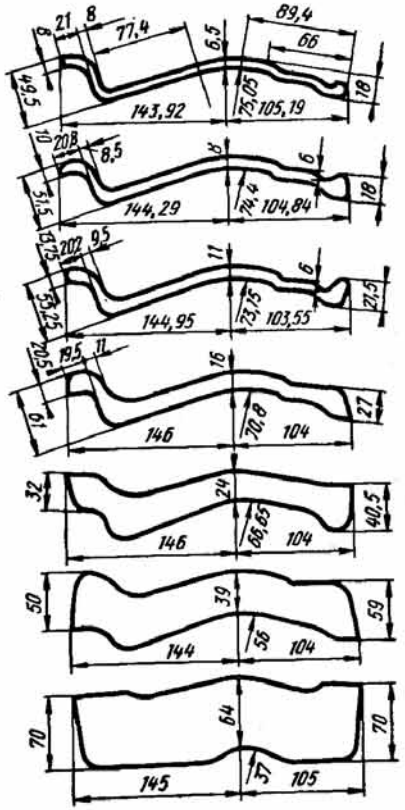


Рис. 131. Калибровка профиля обода 7.5В-20

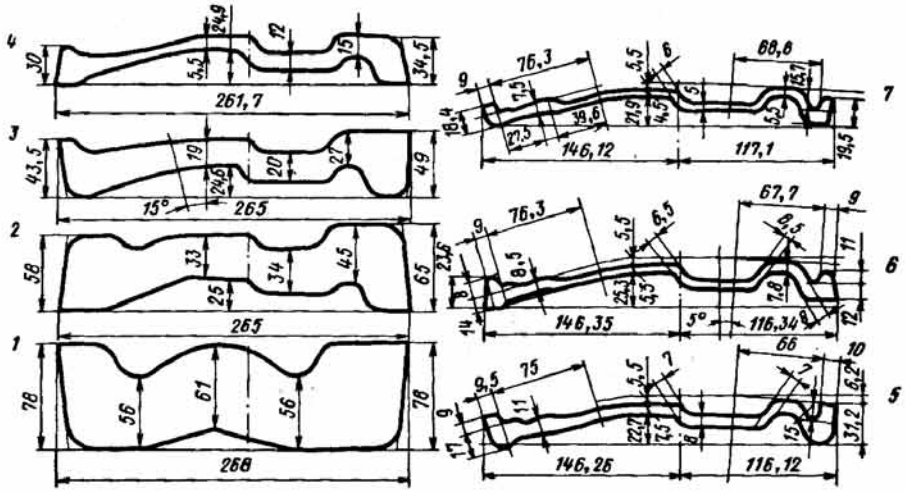


Рис. 132. Калибровка профиля обода 228Г-020

Форма сечений новых профилей автоободов 228Г-020 и 254Г-020 не позволяет (рис. 132) изгибать центральную часть полотна, так как при этом значительно усложняется процесс выравнивания профиля. В связи с этим при прокатке осуществляют отгиб бортовой части на 15° и замочной части на 5°.

Исходя из целесообразности расположения левой и правой частей профиля на одной горизонтальной оси, необходимости иметь на полотне прямые участки для удобства установки привалковой арматуры, средний радиус дугообразных частей профиля принят равным 100 мм, а прямые участки в замочной части для обоих профилей 30 мм.

При расчете чистового калибра исходят из следующих основных положений:

толщина полотна проектируется с полным использованием минусового допуска;

ширина полотна принимается по номинальному размеру с учетом температурного коэффициента усадки;

высоты замочной и бортовой частей предусматриваются с использованием половины допуска на плюс.

Расчет ширины калибров ведется по средней линии с учетом ограниченного уширения элементов бортовой и замочной частей. Для лучшего заполнения металлом торцевых частей уширение полосы в калибрах ограничивается.

Для обеспечения необходимого заполнения сложных торцевых частей чистового и предчистового калибров необходимо, чтобы степень деформации в торцевых элементах была большей, чем по полотну.

Калибровка профилей автоободов 228Г-020 и 254Г-020 выполнена в соответствии с известными принципами центровки полосы в калибрах, так как при прокатке профилей такой формы даже незначительные отклонения от заданной центровки приводят к искажению формы и размеров торцевых элементов и окончательному браку.

Несмотря на значительную глубину канавки в замочной части профиля, формировать ее целесообразно за три прохода (рис. 132, калибры *5–7*), чтобы свести к минимуму отрицательные последствия возможной незначительной расцентровки полосы и калибра.

Калибр *4* является переходным; металл в нем подготавливается для задачи в первый разрезной калибр *5*, где в основном происходит формирование про-

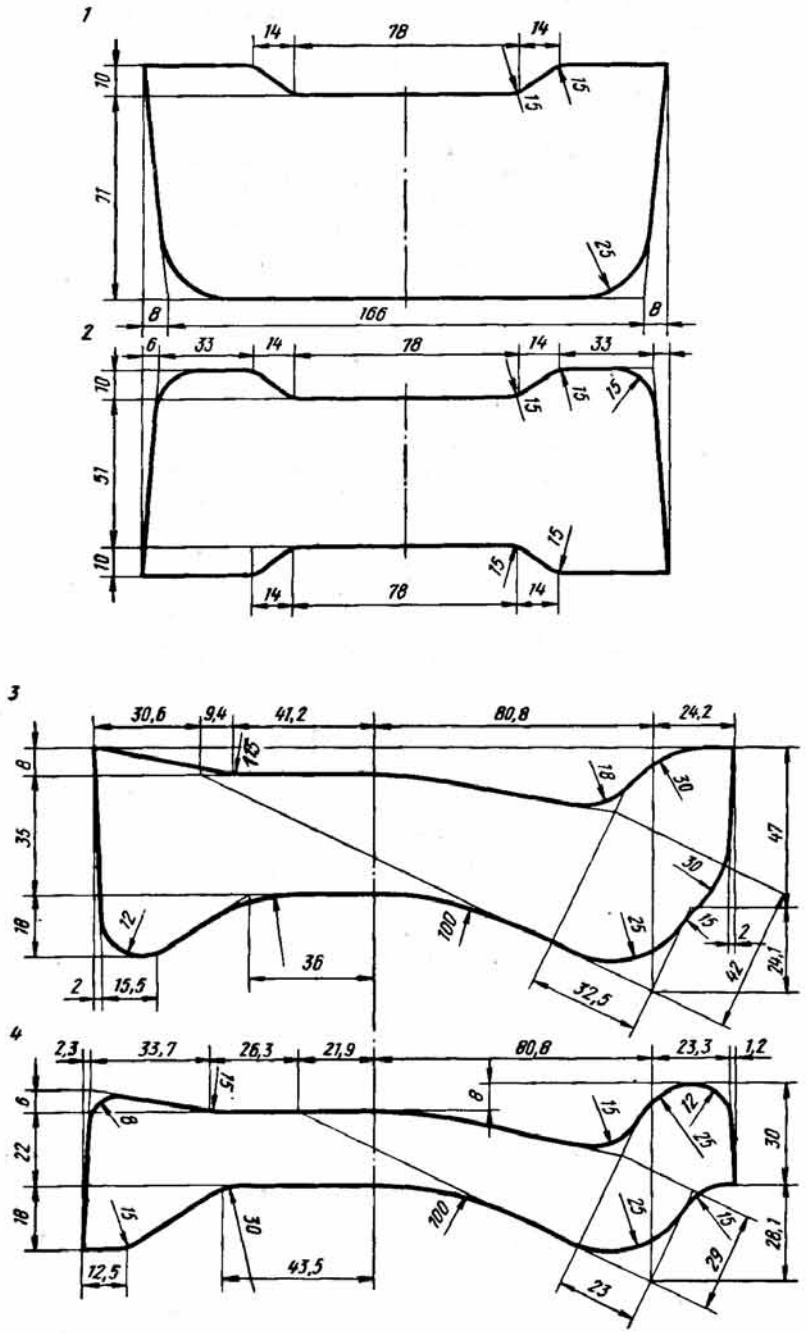
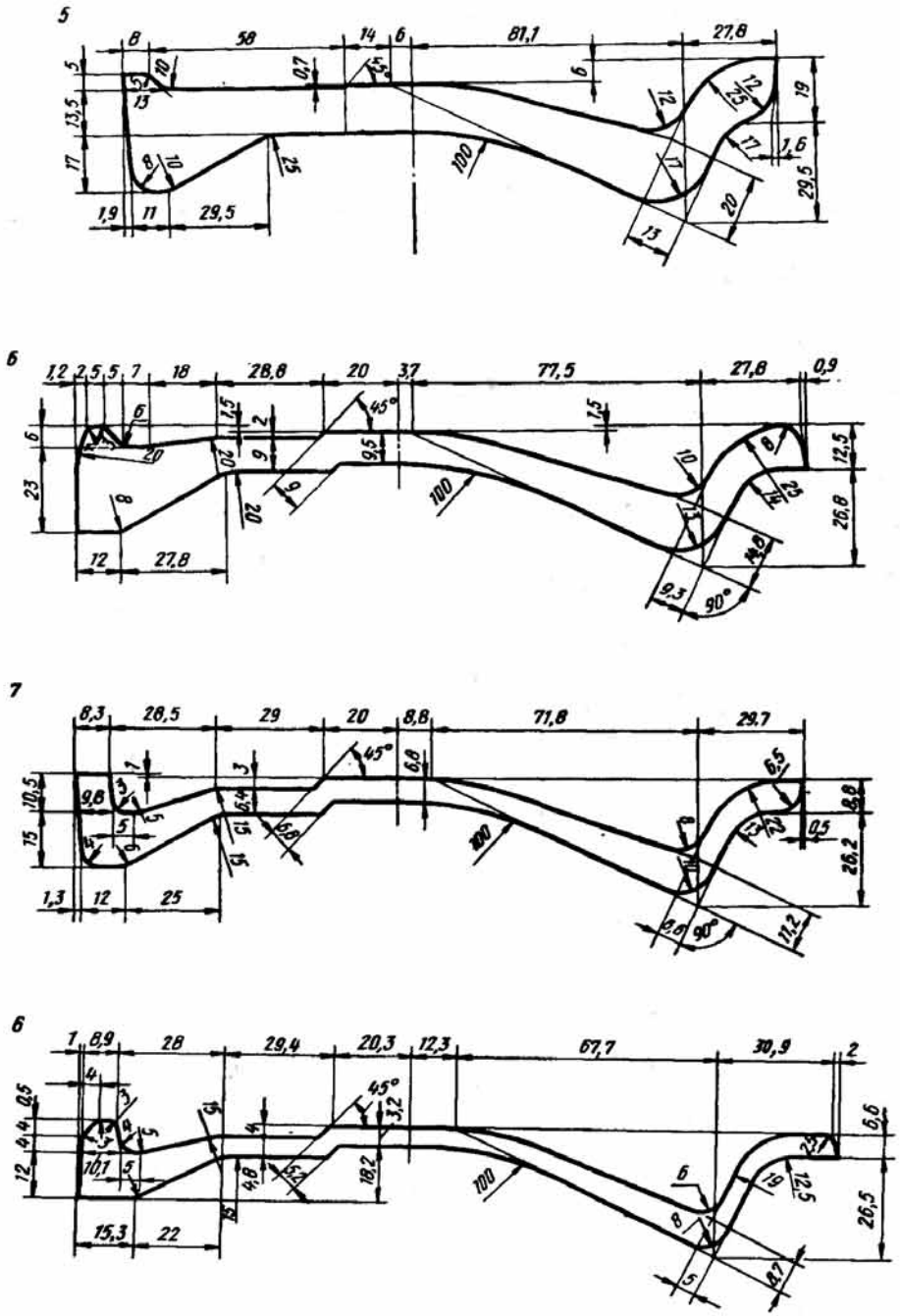
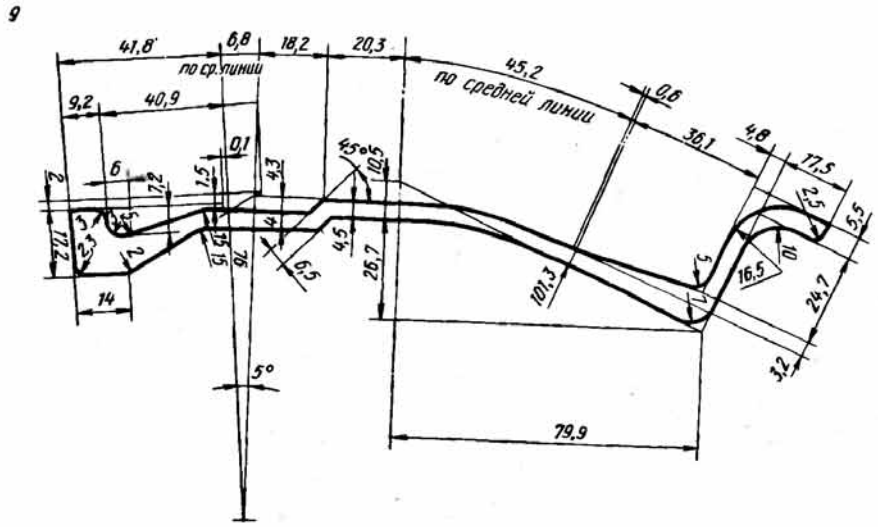


Рис. 133. Калибровка профиля для обода колеса автомобиля ГАЗ-53 на линейном стане 550 (исходное сечение 171×92 мм)



Продолжение рис. 133



Продолжение рис. 133

филя; черновые калибры *1–3* менее сложные, форма их постепенно изменяется, приближаясь к прямоугольной.

Высота заготовки для обоих профилей при прокатке за семь фасонных проходов принята равной 100 мм. Ширина заготовки рассчитывается в соответствии с принятым ограничением уширения в калибрах $B_{заг} = B - (0 \div 5)$ мм.

Сложная форма периметра профилей требует точной заточки режущего инструмента для расточки ручьев на валках чистовой клети с применением специально изготовленных контр-шаблонов.

Представляющие интерес калибровки профилей ободов и профилей с отогнутыми краями приведены на рис. 133–135.

Калибровка профиля замочного основания (рис. 134) для стана 550 выполнена за пять фасонных проходов. Для повышения точности размеров и качества поверхности кромок профиль прокатывали в калибрах, торцевые стенки которых выполнены с кольцевыми утолщениями в местах разъемов валков. Увеличение высотного обжатия всех элементов профиля достигалось в черновых проходах (коэффициент обжатия стенки $1/\eta = 2$), где предусмотрена прокатка в закрытых калибрах с чередованием их разъемов. Для более точного определения величины среднего обжатия, уширения и других параметров прокатки в чистовом, предчистовом и промежуточных калибрах их условно делили на ряд простейших элементов, в которых эти параметры поддавались расчету. При определении коэффициентов деформации по отдельным элементам сложного профиля учитывали возможную утяжку (приращение) металла по высоте гребня замка, а также взаимодействие соседних элементов профиля, формируемых в закрытых ручьях валков.

В разработанной калибровке использован принцип равномерной деформации элементов профиля в чистовом и предчистовом калибрах при значительной неравномерности деформации крайних элементов профиля в черновых проходах. При этом достигались наиболее благоприятные условия получения необходимой высоты гребня замка в закрытых ручьях и достаточная обработка кромок профиля боковыми стенками калибров.

Постепенное уменьшение коэффициентов обжатия основных элементов профиля от первого до чистового калибров обеспечивает достаточно равномерную

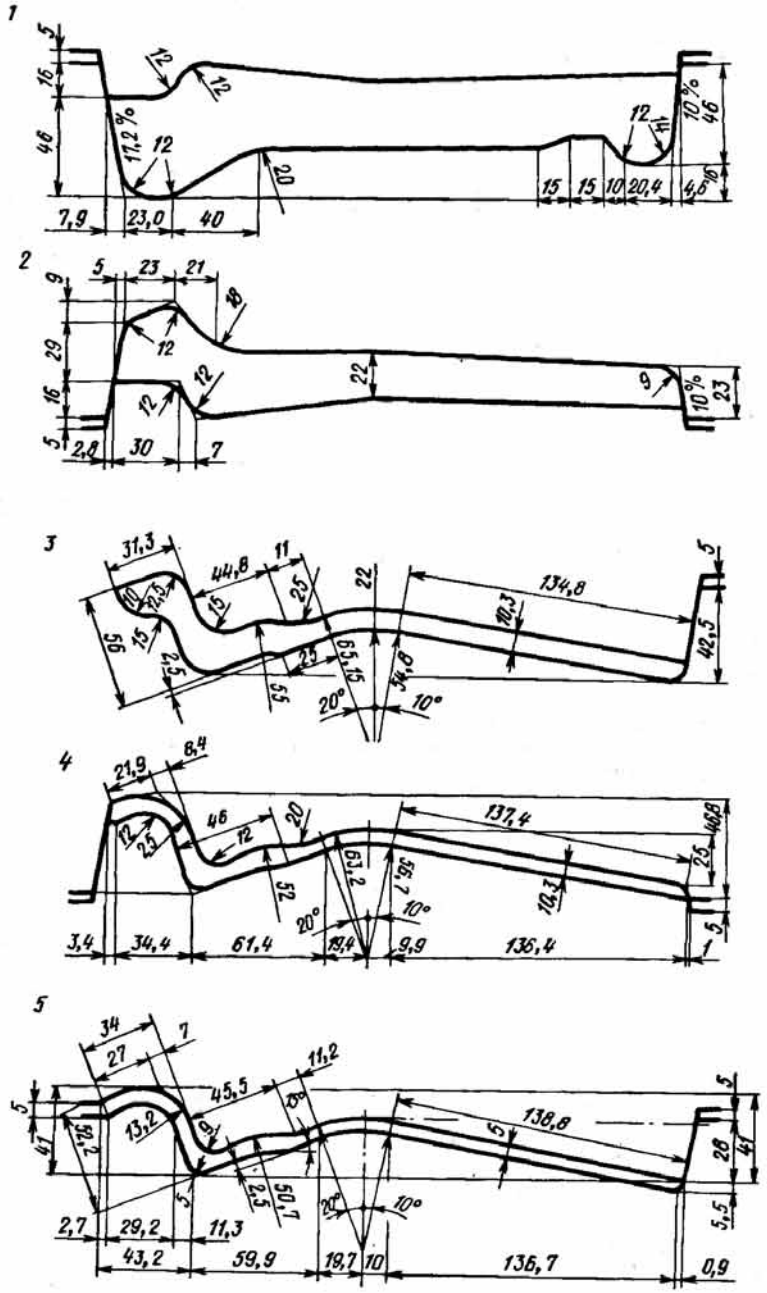


Рис. 134. Калибровка профиля бортового основания обода колеса на стане 550

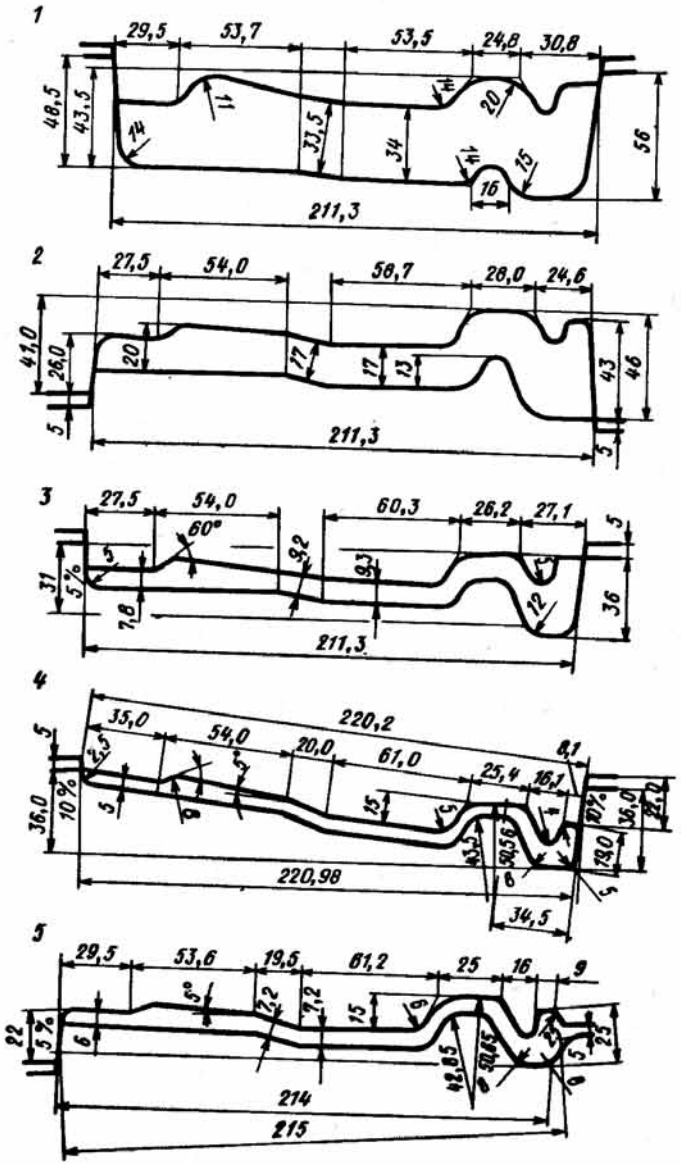


Рис. 135. Калибровка профиля замочного основания обода колеса на стане 550

загрузку оборудования прокатного стана по энергосиловым параметрам. В чистовом калибре величина абсолютного обжатия металла по гребню замка принималась больше (на 5,2 мм), чем по стенке профиля, что предотвращало появление серповидности и скручивания раската на выходе из валков.

Устойчивое положение и надежное центрирование раската в калибрах в процессе прокатки обеспечивалось путем симметричного выполнения замочной части

профиля и его стенки в черновых проходах. Из приведенной на рис. 134 калибровки видно, что замочная часть профиля в предчистовом и чистовом калибрах подвержена прямому обжатию значительно больше. Обычно положение раската в таких калибрах неустойчиво из-за разных вытяжек металла по сечению. В разработанной калибровке для обеспечения устойчивости профиля в калибре суммарное уширение со стороны замочной части принято несколько меньшим по сравнению с противоположной стороной профиля.

Для прокатки профиля замочного основания на стане 550 использовались прямоугольная заготовка сечением 205×60 мм из стали 15кп. Температура нагрева заготовок 1240–1250 °С; температура конца прокатки 940–950 °С. Профиль замочного основания получен в соответствии с требованиями технических условий с первой опытной прокатки.

Профиль бортового основания обода (рис. 135) имеет ровную стенку (полотно) и расположенную к ней под углом 90° вертикальную стойку (бортовая часть). По техническим условиям этот профиль может поставляться с изгибом стенки до 10°, которая выпрямляется у потребителя при изготовлении колес. Чистовой калибр для калибровки средней части полотна профиля был выполнен с таким расчетом, чтобы при его выпрямлении у потребителя бортовая часть не подвергалась изгибу. При разработке формы предчистового и черновых калибров учитывали возможность правильного входа раскатов в последующий калибр, самоцентрирования в калибрах и другие технологические факторы. Неравномерная деформация металла происходит в основном в первых трех калибрах (рис. 135).

Глава 7.

ПРОФИЛИ ЖЕЛОБЧАТОЙ ФОРМЫ И ШАРНИРНОГО ТИПА

1. Схемы прокатки и сортамент профилей желобчатой формы и шарнирного типа

Полосовые профили желобчатой формы с вертикальной осью симметрии относятся к группе 8 класса *IV* технологической классификации (рис. 1) и имеют в поперечном сечении продольные впадины и выступы прямоугольной, трапециевидной или полукруглой формы с плавными закруглениями. Некоторая асимметрия отдельных профилей не меняет используемых типовых схем прокатки.

На рис. 136 представлен без радиусов закруглений характерный профиль желобчатой формы, состоящий из семи участков. При этом толщины участков и углы наклона α_1, α_3, α_5, α_7 могут в общем случае быть неодинаковыми и отличаться друг от друга. Кроме того, возможна и переменная толщина отдельных участков по их длине.

Основными определяющими размерами профиля являются (рис. 136) общая высота H, общая ширина B, толщины участков 1÷7 и углы раскрытия участков α_1, α_3, α_5, α_7. Общее число фасонных калибров зависит в основном от общей высоты H и толщин отдельных участков и на практике составляет от 5 до 10, причем увеличивается по мере увеличения H и уменьшения толщин участков.

Схема прокатки профилей желобчатой формы определяется их конфигурацией и по существу представляет последовательность калибров, подобных по форме готовому профилю. Однако возможны различные варианты схемы прокатки. Во-первых, это относится к калибрам, в которых осуществляется контроль высоты крайних участков *1* и *7*. Если уклоны α_1 и α_7 сравнительно невелики (примерно 2÷5°), то контроль высоты может производиться как в полузакрытых, так и в закрытых калибрах. При уклонах больше 5° для контроля используются только полузакрытые калибры. Для отдельных профилей возможно одновремен-

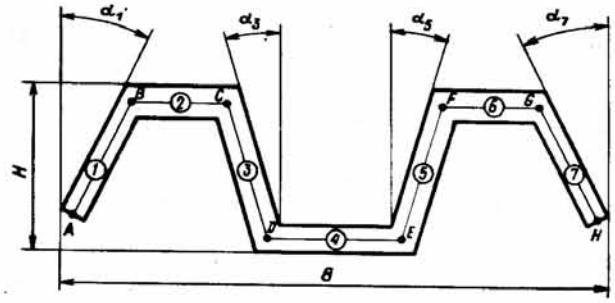


Рис. 136. Схема калибра для прокатки профиля желобчатой формы

но предусматривать закрытые и полузакрытые контрольные калибры. Число контрольных калибров зависит от общего числа фасонных калибров и обычно не меньше двух и не больше четырех.

Калибровка профилей желобчатой формы рассчитывается по средней линии калибров. В зависимости от основных размеров профиля и от исходного прямоугольного сечения раската, задаваемого в первый по ходу прокатки фасонный калибр и на которое мы стремимся выйти при расчете калибровки, возможны следующие варианты схемы прокатки.

Схема 1. Положение средней линии *ABCDEFGH* (рис. 136) постоянно во всех фасонных калибрах.

Схема 2. В первых по ходу прокатки фасонных калибрах средняя линия последовательно как бы сжимается "как гармошка", то есть уменьшаются от калибра к калибру углы раскрытия участков α_1, α_3, α_5 и α_7. В последних двух, реже трех калибрах положение средней линии постоянно и соответствует чистовому калибру. Такая схема целесообразна в том случае, когда желательно уменьшить износ черновых калибров и прокатывать профиль из прямоугольного сечения с меньшим отношением H/B.

Схема 3. Эта схема аналогична второй схеме с той только разницей, что в первых по ходу прокатки фасонных калибрах происходит последовательное увеличение углов раскрытия участков α_1, α_3, α_5 и α_7. В этом случае по сравнению со схемой 1 увеличивается для исходного сечения отношение H/B.

Полосовые профили шарнирного типа относятся к классам IV и V технологической классификации (рис. 1) и делятся на три группы. В группу 9 включены полосовые профили с остроугольными утолщениями по краям и вертикальной осью симметрии. Эти профили состоят из среднего прямоугольного участка, к которому с одной стороны относительно горизонтальной оси примыкают утолщения треугольной, прямоугольной, трапециевидной и полукруглой формы. К группе 10 относятся полосовые профили с круглыми утолщениями по краям и вертикальной осью симметрии. В отдельных случаях профили этой группы симметричны относительно обеих осей (вертикальной и горизонтальной).

Полосовые профили с утолщениями по краям широко используются [2] в автотракторной промышленности при изготовлении звеньев дверных и кузовных петель, распорных колец колес и других деталей.

Полосовые профили с утолщениями по краям прокатываются обычно в сдвоенном виде. Утолщения на профилях для деталей с шарнирами имеют преимущественно круглую форму или же близкую к ней.

При прокатке в сдвоенном виде обеспечивается симметрия профиля (а соответственно и калибров) относительно вертикальной оси и значительно упрощается технология прокатки, исключается изгиб полос при прокатке и особенно при

охлаждении на холодильнике, упрощается настройка стана. Прокатка в сдвоенном виде приобретает особенно важное значение при небольшой ширине одинакового профиля, так как при сдваивании отношение площадей неодинаково обжимаемых частей (головок и полотна) увеличивается. Прокатка таких профилей в одинарном виде приводила бы к значительному изгибу и скручиванию полос.

Если ранее для дверных петель применяли горячекатаные специальные профили, то за последние годы все большее число автозаводов переходит на профили высокой точности, хотя последние имеют значительно более высокую стоимость. Причина этого заключается в том, что для горячекатаных профилей допускаются по условиям технологии значительные отклонения по геометрическим размерам.

Холоднодеформированные профили для дверных петель автомобилей по сравнению с горячекатанымн отличаются высокой точностью изготовления. Технические условия на холоднодеформированные профили предусматривают уменьшение поля допусков по толщине полотна в 2 раза, по ширине профиля более чем в 3 раза и по высоте головок более чем на 60 %. Однако стоимость холоднодеформированных профилей значительно выше горячекатаных, и поэтому их применение должно иметь достаточное технологическое и экономическое обоснование.

2. Методика калибровки профилей желобчатой формы при постоянной конфигурации средней линии

Рассмотрим методику калибровки профилей желобчатой формы по схеме 1, то есть при постоянной конфигурации средней линии. Схему расчета размеров фасонных калибров (рис. 137) для определенности выберем для профиля стойки рефрижератора, калибровку которого рассмотрим впоследствии. При разработке калибровки использована методика расчета и построения калибров при постоянной конфигурации средней линии, определенной для чистового калибра. Калибровку рассчитывают против хода прокатки в следующей последовательности:

1. Определение линейных размеров готового профиля с учетом температурного коэффициента расширения металла и определения размеров чистового калибра с учетом допускаемых отклонений и износа валков. Схема фасонного j-того калибра представлена на рис. 137.

2. Выбор схемы прокатки и числа контрольных калибров.

3. Выбор исходной заготовки из сортамента, который прокатывается на заготовочном стане. При этом увеличение числа сечений исходных заготовок для сортового стана нежелательно, а для заготовочного стана просто недопустимо без достаточных на то оснований. Наилучшим вариантом для сортовых станов следует считать один типоразмер заготовки.

4. Разбивка поперечного сечения профиля на участки (рис. 137), отличающиеся друг от друга расположением и условиями деформации. Выбор базового элемента. Для рассматриваемого профиля базовым элементом является участок *5*.

5. Определение суммарного коэффициента обжатия базового элемента *5* толщиной h_5

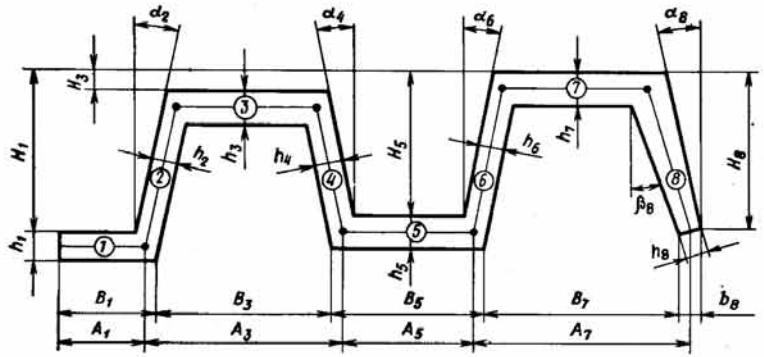


Рис. 137. Схема для расчетов калибров при прокатке профилей желобчатой формы

$$1/\eta_5 = H_0/h_5,$$

где H_0 – толщина исходной заготовки.

6. Определение суммарных коэффициентов K_i неравномерности обжатия толщины участков профиля относительно коэффициента обжатия базового элемента

$$k_i = \eta_5/\eta_i,$$

где i -тый номер участка ($i = 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8$).

7. Определение частных коэффициентов неравномерности обжатия толщины участков в каждом калибре. При этом произведение частных коэффициентов для каждого участка равно общему коэффициенту неравномерности обжатия для этого же участка.

8. Вычисление параметров средней линии чистового калибра на основании размеров чистового калибра и рис. 137. Длины средних линий обозначаем через l_i, где i – номер участка:

вертикальная проекция средней линии наклонного участка *8*

$$l_8^{\text{в}} = H_5 + h_5 + 0{,}5\, h_7 \operatorname{tg} \alpha_8;$$

горизонтальная проекция средней линии участка *8*

$$l_8^{\text{г}} = l_8^{\text{в}} \operatorname{tg} \left(\frac{\alpha_8 + \beta_8}{2}\right);$$

горизонтальная проекция кромки отогнутой полки

$$b_8 = h_8 \cos \alpha_8;$$

ширина впадины между участками *6* и *8* по средней линии

$$A_7 = B_7 - 0{,}5\, b_8 + \frac{0{,}5\, h_6}{\cos \alpha_6} - 0{,}5\, h_5 \operatorname{tg} \alpha_6;$$

ширина участка *5* по средней линии

$$A_5 = B_5 - 0{,}5\left(\frac{h_4}{\cos \alpha_4} + \frac{h_6}{\cos \alpha_6}\right) + 0{,}5\, h_6 (\operatorname{tg} \alpha_4 + \operatorname{tg} \alpha_6);$$

ширина участка *3* по средней линии

$$A_3 = B_3 + 0{,}5\left(\frac{h_2}{\cos \alpha_2} + \frac{h_4}{\cos \alpha_4}\right) - 0{,}5 (h_1 \operatorname{tg} \alpha_2 + h_5 \operatorname{tg} \alpha_4);$$

ширина участка *1* по средней линии

$$A_1 = B_1 - 0{,}5 \frac{h_2}{\cos \alpha_2} + 0{,}5\, h_1 \operatorname{tg} \alpha_2;$$

расстояние по вертикали между средними линиями участков *1* и *5*

$$\Delta_1 = 0{,}5 (h_5 - h_1);$$

расстояние по вертикали между средними линиями участков *5* и *7*

$$H = H_5 + 0{,}5\, h_5 - 0{,}5\, h_7 = \text{const};$$

расстояние по вертикали между средними линиями участков *3* и *7*

$$\Delta_3 = H_3 + 0{,}5\, h_3 - 0{,}5\, h_7.$$

9. Определение геометрических размеров, необходимых для построения всех фасонных калибров, производится по одним и тем же соотношениям

$$H_1 = H + 0{,}5\, h_7 - 0{,}5\, h_1 - \Delta_1;$$

$$H_3 = \Delta_3 + 0{,}5\, (h_7 - h_3);$$

$$H_5 = H + 0{,}5\, (h_7 - h_5);$$

$$H_8 = l_8^{\text{в}} + 0{,}5\, (h_7 + h_8 \operatorname{tg} \alpha_8) \pm \Delta H_8,$$

где ΔH_8 – изменение (приращение или обжатие) участка *8* по высоте.

$$B_8 = A_7 - 0{,}5 \frac{h_6}{\cos \alpha_6} + 0{,}5\, h_5 \operatorname{tg} \alpha_6 - 0{,}5\, h_8 \cos \frac{1}{2} (\alpha_8 + \beta_8),$$

$$B_5 = A_5 + 0{,}5\left(\frac{h_4}{\cos \alpha_4} + \frac{h_6}{\cos \alpha_6}\right) - 0{,}5\, h_5 (\operatorname{tg} \alpha_4 + \operatorname{tg} \alpha_6),$$

$$B_3 = A_3 - 0{,}5\left(\frac{h_2}{\cos \alpha_2} + \frac{h_4}{\cos \alpha_4}\right) + 0{,}5\, (h_1 \operatorname{tg} \alpha_2 + h_5 \operatorname{tg} \alpha_4),$$

$$B_1 = A_1 + 0{,}5 \frac{h_2}{\cos \alpha_2} - 0{,}5\, h_1 \operatorname{tg} \alpha_2 + \Delta B_1,$$

где ΔB_1 – уширение участка *1*.

$$b_8 = h_8 \cos \alpha_8,$$

$$H_7 = H_8 + h_8 \operatorname{tg} \alpha_8 - h_7.$$

10. Расчет уширения ΔB_1 участка 1.

11. Определение радиусов закруглений.

12. Внесение поправок в калибровку.

Полученные для всех фасонных калибров соотношения позволяют полностью рассчитать калибровку. Вначале, как это следует из методики, определяются коэффициенты обжатия и коэффициенты неравномерности обжатий для участков профиля. На основании этих коэффициентов вычисляются толщины участков для всех калибров. Далее определяются основные размеры калибров. Расчет ведется табличным способом, по которому определяется вначале один размер для всех калибров (например, H_1), затем следующий и т.д. При табличном способе расчета прослеживается динамика всех изменений размеров в комплексе, по всем участкам профиля и по всему процессу прокатки профиля.

3. Проектирование калибровки профиля стойки рефрижератора

Профиль стойки полуприцепа рефрижератора (рис. 138, *а*), хотя и имеет некоторую асимметрию, относится к группе полосовых профилей желобчатой формы с вертикальной осью симметрии. Этот профиль характерен наличием глубоких впадин и выступов с небольшим наклоном вертикальных элементов, равным 7°. Профиль стойки полуприцепа освоен на трехклетевом линейном стане 550 Чусовского металлургического завода.

Расчет калибровки выполнен [2] по изложенной выше методике. При выборе режима обжатий в последних по ходу прокатки калибрах формоизменение принято незначительным. Основная деформация осуществляется в первых по ходу прокатки калибрах. Такой режим обусловливается сложной формой профиля, его значительной шириной и, вследствие этого, повышенными для данного стана усилиями прокатки. Исходная заготовка сечением 135×167 мм из стали марки МСт3кп.

На основании размеров и допусков готового профиля (рис. 138, *а*) для чистового калибра получены следующие основные размеры: $B_1 = 35{,}8$ мм; $B_3 = 50{,}6$ мм; $B_5 = 54{,}7$ мм; $B_7 = 61{,}4$ мм; $h_1 = h_3 = 5$ мм; $h_2 = h_4 = h_5 = h_6 = h_7 = h_8 = 7$ мм; $H_1 = 41{,}6$ мм; $H_3 = 6$ мм; $H_5 = H_7 = 39{,}6$ мм; $H_8 = 40{,}6$ мм; $\alpha_2 = \alpha_4 = \alpha_6 = 7^{\circ}$; $\alpha_8 = 13^{\circ}$; $\beta_8 = 20^{\circ}$.

Расчет калибровки полностью приведен в работе [2].

После расчета калибровки внесены некоторые изменения. Так как уклон наклонных вертикальных участков *2, 4* и *6* сравнительно небольшой (всего 7°), то в процессе прокатки можно предположить образование закатов. В подготовительных формирующих калибрах участки *3, 4* и *6* выполнены с переменным по высоте уклоном. В результате такого изменения толщина этих участков на большей части их высоты увеличивается по сравнению с расчетной. Это создает опасность чрезмерных давлений в связи с увеличением фактического обжатия по толщине участков *2, 4* и *6* в калибрах *6–9*, расположенных в клети *II*. Поэтому толщину по прямым элементам участков *2, 4* и *6* пришлось уменьшить против расчетной, чтобы приблизить к расчетной

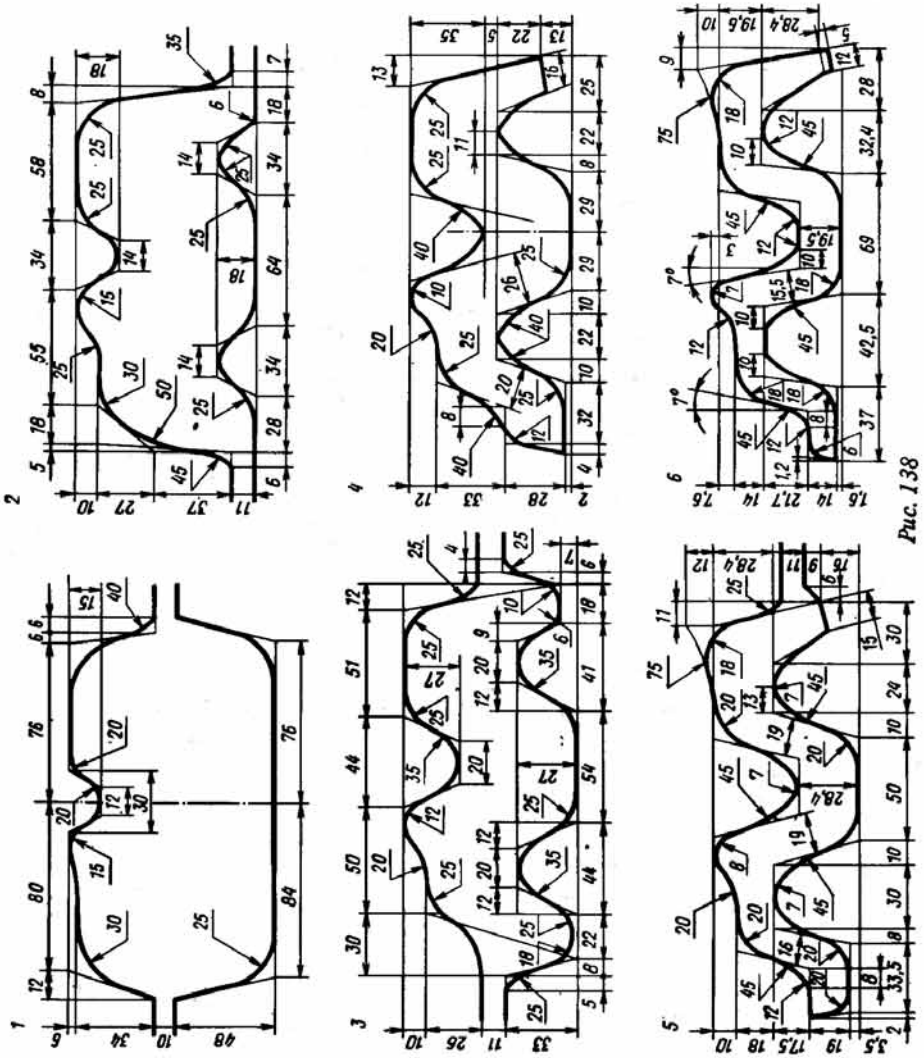


Рис. 138

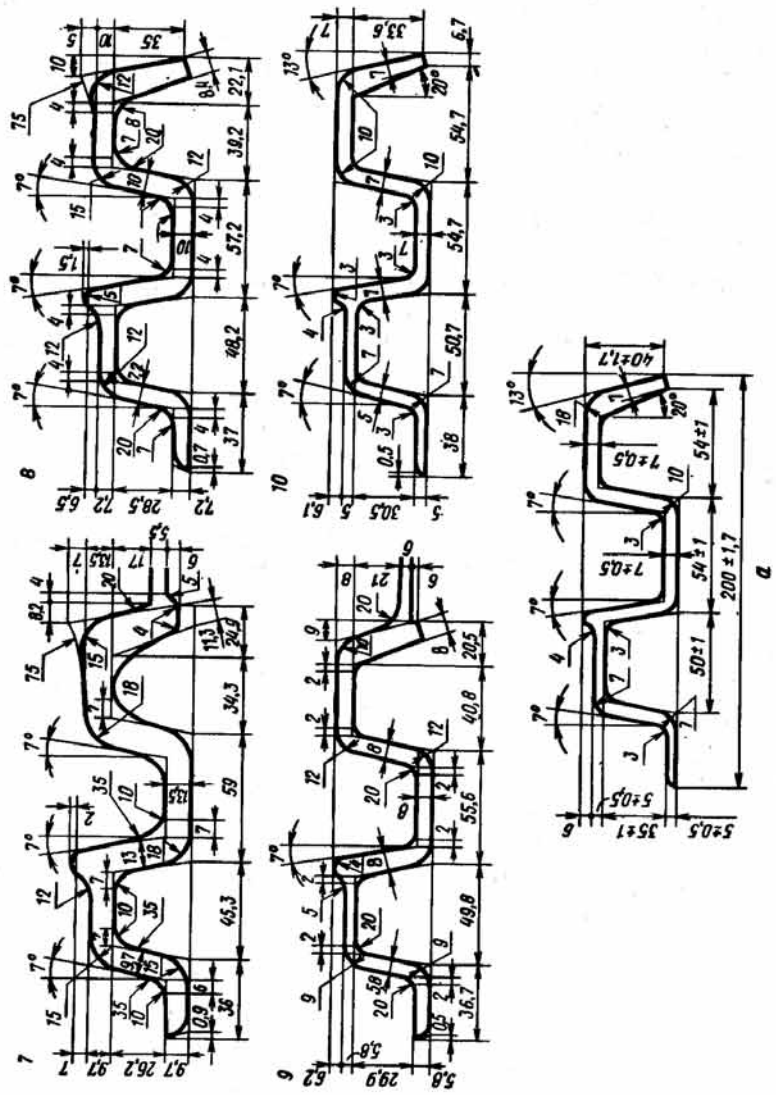


Рис. 138. Калибровка профиля стойки полуприцепа рефрижератора: *а* – готовый профиль

среднюю толщину наклонных участков. Были внесены некоторые изменения в первых по ходу прокатки разрезных калибрах.

При этом средняя линия отогнутого участка *8* сдвинута к середине, так как быстро возрастает по ходу расчета ширина сечения, что нежелательно. И, наконец, была увеличена ширина участка *1*. Калибровка профиля стойки полуприцепа рефрижератора со всеми изменениями приведена на рис. 138.

Освоение профиля прошло успешно. Жесткая форма сечения профиля предопределяет устойчивое положение полосы в калибре и вместе с тем практически полную невозможность перемещения металла за счет смещения валковой арматуры.

При незаполнении или переполнении по ширине участка *1* влиять на степень заполнения этого участка можно только в калибрах *1* и *2* за счет положения разрезающих гребней относительно ширины полосы. Это достигается настройкой валковой арматуры.

Следует заметить, что увеличение против расчетной ширины участка *1* оказалось ненужным, так как при опытной прокатке ширина профиля была близка к максимально допустимой.

4. Экспериментальные исследования формоизменения при прокатке профилей с утолщениями по краям

При прокатке профилей для дверных петель автомобилей важное значение также имеет выбор высоты прямоугольной полосы, задаваемой в первый фасонный калибр.

Для определения формоизменения в первом фасонном калибре проведен на полупромышленном стане 300 планируемый эксперимент по прокатке прямоугольной заготовки с обжатием только ее средней части (рис. 139). Так как при планировании эксперимента выбор относительных параметров, имеющих физический смысл (например, отношение площадей обжимаемых и необжимаемых участков), значительно сужает интервалы их изменения, то в качестве параметров процесса приняты отношения геометрических размеров очага деформации и заготовки к толщине обжимаемой средней части после прокатки

$$m_1 = h_0/h_1,\ m_2 = b_0/h_1,\ m_3 = b_{ф.0}/h_1,\ m_4 = R/h_1, \qquad (69)$$

Для исследования зависимости коэффициента вытяжки λ и коэф-

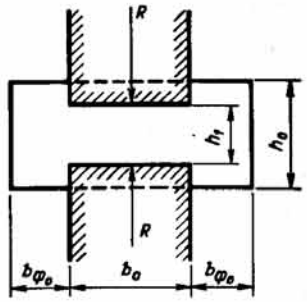


Рис. 139. Схема очага деформации при прокатке полосы с утолщениями их заготовки прямоугольного поперечного сечения

фициента уширения β от параметров m_1, m_2, m_3 и m_4 использовался метод полного факторного эксперимента [11].

Число опытов при ортогональном ЦКП в случае четырех факторов равно [11]:

$$N = 2^4 + 2 \cdot 4 + 1 = 25,$$

где $2^4 = 16$ – число опытов, образующих полный факторный эксперимент при определении линейного полинома: $2 \cdot 4 = 8$ – число "звездных" точек; 1 – точка в центре плана.

Материал образцов – сталь Ст3кп. Температура прокатки 1100–1150 °С. Диаметры нижнего и верхнего валков по шейке – 300 мм. Параметры m_1, m_2, m_3 и m_4 имели следующие интервалы изменения

$$\left.\begin{aligned} &m_1 = 1{,}3 \div 2{,}0; \quad m_2 = 1{,}0 \div 3{,}5; \quad m_3 = 0{,}5 \div 1{,}25; \\ &m_4 = 7{,}5 \div 9{,}4. \end{aligned}\right\} \qquad (70)$$

В результате обработки результатов планируемого эксперимента получены формулы для определения коэффициента вытяжки $\lambda = L_1/L_0$ и коэффициента уширения $\beta = \Delta B/B_0$:

$$\lambda = 0{,}691 + 0{,}257\, m_1 + 0{,}0699\, m_2 - 0{,}0220\, m_3 + 0{,}0229\, m_4 + 0{,}0599\, m_1 m_2 - 0{,}0481\, m_1 m_3 - 0{,}0257\, m_1 m_4 - 0{,}0586\, m_2 m_3 - 0{,}00388\, m_2 m_4 + 0{,}0161\, m_3 m_4; \qquad (71)$$

$$\beta = -0{,}091 + 0{,}211\, m_1 + 0{,}014\, m_2 - 0{,}144\, m_3 - 0{,}015\, m_2^2 + 0{,}032\, m_2 m_3, \qquad (72)$$

где $\Delta B = B_1 - B_0$, $B_1 = b_1 + 2\, b_{ф.1}$, $B_0 = b_0 + 2\, b_{ф.0}$.

Утяжка боковых утолщений по высоте определяется в соответствии с

$$h_0/h_{ф.1} = b_{ф.0}/b_{ф.1} = \sqrt{\lambda}. \qquad (73)$$

5. Методика калибровки полосовых профилей с круглыми утолщениями по краям

При горячей прокатке полосовых спецпрофилей с утолщениями по краям применяют от 4 до 9 фасонных калибров. В первый фасонный калибр обычно задается полоса прямоугольного сечения. Фасонные калибры по своей конструкции аналогичны балочным калибрам закрытого типа с чередованием положения разъемов (рис. 140, калибры *3*, *4*), за исключением чистового калибра, который является открытым с разъемом посередине. Конструкция чистового калибра (рис. 140, калибр *2*) обеспечивает получение головок профиля в данном поле допускаемых отклонений и без переполнения (лампаса) в месте разъема.

Анализируя построение калибров для действующих калибровок, можно все фасонные калибры разделить на три основных типа: чисто-

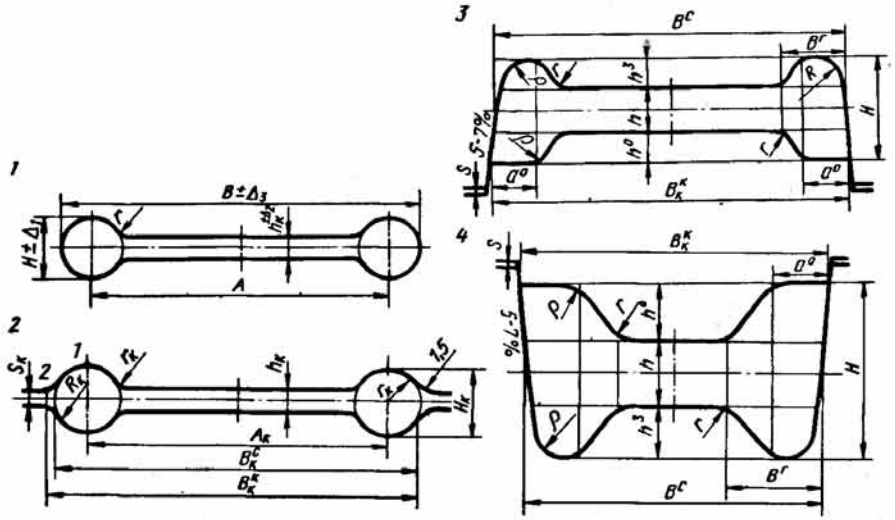


Рис. 140. Готовый профиль (*1*), чистовой (*2*), предчистовой (*3*) и черновой (*4*) калибры при прокатке профилей для дверных петель

вой калибр (рис. 140, калибр *2*), предчистовой (рис. 140, калибр *3*) и черновые калибры (рис. 140, калибр *4*). Предчистовой калибр аналогичен по форме черновым калибрам и отличается наличием радиуса R, которым проводится закругление закрытых частей головок с целью их более плавного формоизменения в чистовом проходе. Иногда используются два калибра типа предчистового. В тех случаях, когда головки профиля для дверных петель имеют сложную форму, например для автомобиля ГАЗ-51, применяются для контроля высоты головок полузакрытые черновые калибры.

Типовая схема прокатки профилей с круглыми утолщениями по краям (головкам) приведена на рис. 141, а типы чистового, предчистового и черновых калибров на рис. 140. Методика расчета калибровки по типовой схеме основана на обобщении режимов прокатки в производственных условиях.

Интервалы изменения по проходам коэффициентов обжатия полотна $1/\eta^п$ (рис. 51, *а*) и головок $1/\eta^г$ (рис. 51, *б*) получены на основании данных более сорока различных отечественных и зарубежных заводских калибровок. Диапазон применяемых коэффициентов указан на рис. 57 штриховкой. Усредненные значения коэффициентов выделены жирными линиями. Нумерация калибров принята по ходу прокатки.

К особенностям применяемых на практике калибровок профилей для дверных петель следует отнести повышенную по сравнению с полотном деформацию головок в чистовом и предчистовом калибрах. Такое соотношение обжатий вызвано необходимостью надежного формирования головок и устранения их возможной утяжки. Но так как толщина полотна готового профиля значительно меньше высоты

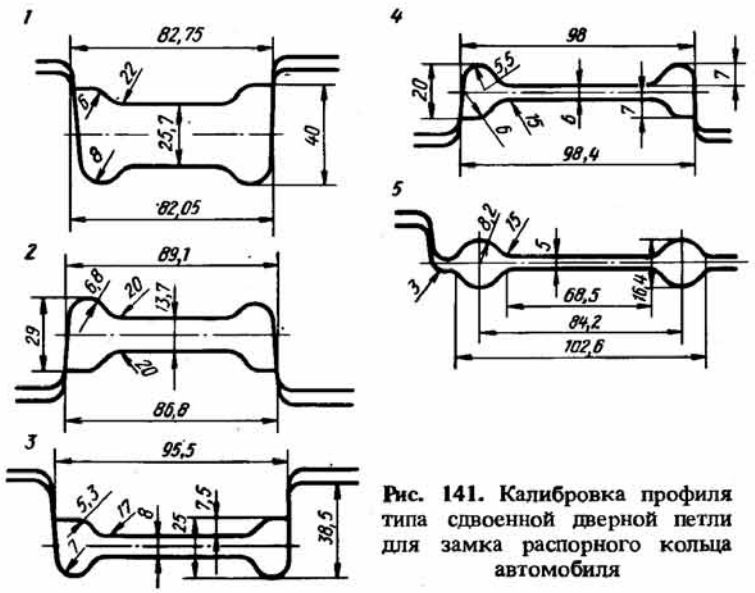


Рис. 141. Калибровка профиля типа сдвоенной дверной петли для замка распорного кольца автомобиля

головок, то в черновых калибрах, естественно, значительно более интенсивная деформация предусматривается для полотна.

В основу методики расчета калибровки положено определение ширины калибров и головок по средней линии полотна с учетом бокового обжатия головок. Расчет калибровки производится в следующей последовательности:

1. Определяются H_k, h_k, B_k^c (рис. 140, калибр *2*) готового профиля в горячем состоянии с учетом коэффициента термического расширения α ($\alpha = 1{,}010 \div 1{,}015$) и прокатки на минус (50 % минусового допуска Δ) на соответствующий размер

$$H_k = (H - 0{,}5\,\Delta_1)\alpha; \quad h_k = (h - 0{,}5\,\Delta_2)\alpha; \quad B_k^c = (B - 0{,}5\Delta_3)\alpha,$$

где H, h, B — высота головок, толщина полотна и ширина готового профиля в холодном состоянии; k — индекс чистового калибра.

2. В зависимости от высоты головок готового профиля и характеристики прокатного стана (диаметра валков, числа клетей и мощности главных приводов) определяются из практических данных толщина исходной полосы прямоугольного сечения, задаваемого в первый фасонный калибр, и число фасонных калибров k. На практике отношение толщины исходной полосы к высоте головок готового профиля в условиях различных заводов изменяется от 2,5 до 6,0, а число фасонных калибров k обычно колеблется от 4 до 9.

Суммарные коэффициенты обжатия по головкам $1/\eta_{об}^{г}$ и полотну $1/\eta_{об}^{п}$ в фасонных калибрах находят из условия

$$H_0 = H_k \frac{1}{\eta_{об}^{г}} = h_k \frac{1}{\eta_{об}^{п}},$$

где H_k, h_k — высота головок и толщина полотна в чистовом (k-том) калибре; H_0 — высота исходной полосы прямоугольного сечения, задаваемой в первый фасонный калибр.

После того, как определены общие коэффициенты обжатия $1/\eta_{об}^{г}$ и $1/\eta_{об}^{п}$, их распределяют по проходам в соответствии с рис. 51.

3. На основании принятых коэффициентов высотной деформации рассчитывают толщину полотна h_{i-1} и высоту головок H_{i-1} по проходам

$$h_{i-1} = h_i\,(1/\eta_i^{п}); \quad i = k, \quad k-1, \ldots, 2;$$

$$H_{i-1} = H_i\,(1/\eta_i^{г}); \quad i = k, \quad k-1, \ldots, 2,$$

где i — номер фасонного калибра по ходу прокатки.

4. Коэффициент $1/\eta_i$ бокового обжатия головок для i-того калибра равен

$$1/\eta_i = \frac{1}{\eta_i^{п}} \Big/ \frac{1}{\eta_i^{г}}.$$

5. По вычисленным коэффициентам $1/\eta_i$ бокового обжатия головок находят ширину головок $B_{i-1}^{г}$ по средней линии полотна

$$B_{i-1}^{г} = B_i^{г} \frac{1}{\eta_i}.$$

При этом для чистового калибра ширина головок равна их высоте, т.е.

$$B_k^{г} = H_k.$$

6. Определяют высоту открытых $h_{k-1}^{о}$ и закрытых $h_{k-1}^{з}$ фланцев в предчистовом калибре ($k-1$) по формуле

$$h_{k-1}^{о} = h_{k-1}^{з} = 0{,}5\,(H_{k-1} - h_{k-1})$$

и высоту открытых $h_i^{о}$ и закрытых $h_i^{з}$ в черновых калибрах

$$h_i^{о} = 0{,}5\,(H_i - h_i) + 1, \quad \text{где } i = k-2, k-3, \ldots, 1,$$

$$h_i^{з} = h_i^{о} - 2, \qquad \text{где } i = k-2, \; k-3, \ldots, 1.$$

7. Толщина $a_i^{о}$ открытых фланцев на конце вычисляется из эмпирического соотношения

$$a_i^{о} = (0{,}65 \div 0{,}75)\,B_i^{г}.$$

8. Далее определяется уширение в чистовом калибре

$$\Delta B_k = 0{,}01\,B_k^c + (1{,}5 \ldots 2{,}0)$$

и в остальных фасонных калибрах

$$\Delta B_i = 0{,}01\,B_k^c + 0{,}25\,(k - i), \quad \text{где } i = k-1, \ldots, 2,$$

где B_k^c – ширина профиля по средней линии в чистовом калибре (рис. 140, калибр *2*)

9. Ширина предчистового калибра по средней линии полотна с учетом уширения ΔB_k равна

$$B_{i-1}^c = B_k^c - \Delta B_k, \text{ где } i = k,$$

а ширина черновых калибров с учетом уширения ΔB_i

$$B_{i-1}^c = B_i^c - \Delta B_i, \text{ где } i = k-1, k-2, \ldots, 1.$$

10. Ширина предчистового и черновых калибров $B_i^к$ с учетом уклона боковых стенок

$$B_i^к = B_i^c + 2(0{,}5\,h_i + h_i^o)\varphi, \text{ где } i = k-1, k-2, \ldots, 1,$$

где φ – уклон боковых стенок калибра, который обычно принимается равным 5–7 %.

11. При расчете дополнительных размеров, необходимых для построения чистового калибра (рис. 140, калибр *2*), рекомендуются следующие формулы

$$A_k = A\alpha = (B - h)\alpha, \quad B_i^к = (B + \Delta_3)\alpha,$$

$$r = 0{,}5\,H_k, \quad s = (0{,}004 \div 0{,}008)\,D,$$

где s – величина зазора между буртами; D – диаметр валков по полотну профиля.

В чистовом калибре (рис. 140, калибр *2*) радиус R_k подбирается конструктивно для сопряжения точек 1 и 2.

12. Для предчистового калибра (рис. 140, калибр *3*) радиус R_i ($i = k-1$) вычисляется по формуле

$$R_i = 1{,}3\,H, \text{ где } i = k-1,$$

а для чернового

$$R_i = R_{i+1} + 10, \text{ где } i = k-2.$$

13. Радиусы (мм) закруглений r_{i-1} и ρ_{i-1} фланцев в предчистовом (рис. 140, калибр *3*) и черновых (рис. 140, калибр *4*) калибрах находятся из соотношений

$$r_{i-1} = r_i + (1-2), \text{ где } i = k-1, k-2, \ldots, 2,$$

$$\rho_{i-1} = \rho_i + (1-2), \text{ где } i = k-1, k-2, \ldots, 2.$$

При этом в чистовом калибре радиусы r_k и ρ_k равны

$$r_k = 0{,}5\,H, \quad \rho_k = 5-7 \text{ мм}.$$

14. Величина зазора s между буртами для предчистового и черновых калибров

Таблица 12. Расчетные данные калибровки профиля для подвижного звена дверной петли автомобиля "Жигули"

№ калибра	$1/\eta^п$	$1/\eta^г$	$1/\eta$	Размеры, мм										
				ΔB	B^c	h	H	$B^г$	a^o	h^o	$h^з$	$B_к$	s
1	1,29	1,13	1,14	3,41/2,5	121,3/122,5	70,0	80,0	37,2	26,0/19,0	6,0/10,0	4,0/0	126,9/127,0	9,5
2	1,35	1,11	1,21	3,16/2,9	124,5/125,4	52,0	72,0	30,8	21,5/20,0	11,0/10,0	9,0/10,0	129,7/129,0	9,5
3	1,405	1,14	1,23	2,91/2,2	127,4/127,6	37,0	63,0	25,0	17,5/14,0	14,0/14,0	12,0/12,0	132,1/130,8	9,5
4	1,48	1,17	1,26	2,66/2,4	130,1/130,0	25,0	54,0	19,8	13,9/12,5	15,5/15,0	13,5/14,0	134,4/132,7	9,5
5	1,52	1,24	1,23	2,41/1,0	132,5/131,0	16,5	43,5	16,1	11,3/10,3	14,5/15,0	12,5/12,0	136,2/133,4	8,0
6	1,434	1,32	1,09	2,16/1,9	134,6/132,9	11,5	33,0	14,8	10,4/10,0	11,75/12,0	9,75/9,5	137,9/134,7	8,0
7	1,40	1,34	1,04	1,91/2,5	136,5/135,4	8,2	24,7	14,2	9,967/11,3	9,25/9,0	7,25/7,5	139,4/136,7	8,0
8	1,26	1,26	1,0	1,91/1,2	136,5/137,6	6,5	19,5	14,2	9,96/9,96	6,5/6,5	6,5/6,5	140,8/138,4	5,0
9	1,18	1,27	0,93	2,9/3,5	141,1/141,1	5,5	15,3	15,3	–	–	–	142,5/142,5	–

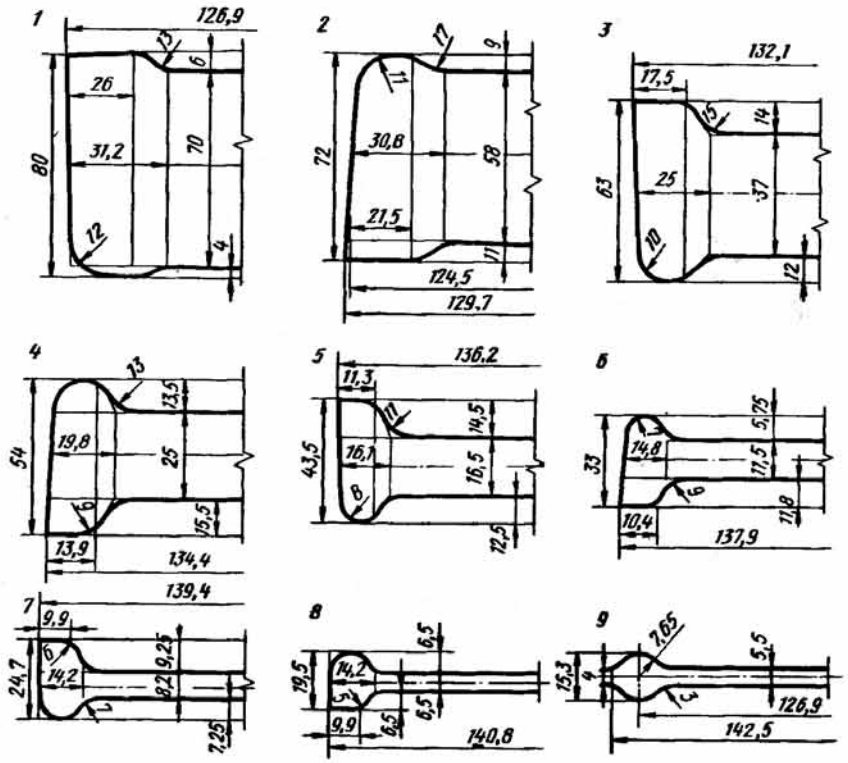


Рис. 142. Калибровка горячекатаного подката для подвижного звена дверной петли автомобиля "Жигули"

$s = (0{,}008 - 0{,}020)\,D.$

Зазор уменьшается в направлении хода прокатки.

После расчета калибровки определяют площади калибров при помощи планиметрирования или графо-аналитическим методом. Направление разъемов в предчистовом и черновых калибрах необходимо чередовать, как это обычно и делается при прокатке профилей в закрытых калибрах.

Для проверки разработанной методики проектирования калибровки рассчитаны калибры для прокатки горячекатаного подката профиля подвижного звена дверной петли автомобиля "Жигули" в условиях линейного стана 500. Для возможности сравнения число фасонных калибров, коэффициенты обжатия $1/\eta_i^{\text{п}}$ и $1/\eta_i^{\text{г}}$ и толщина исходного прямоугольного сечения взяты согласно действующей на заводе калибровке. Данные расчетной и фактической калибровок приведены в табл. 12. При этом для отдельных параметров в числителях указаны расчетные значения, а в знаменателях – значения тех же параметров для действующей калибровки. Спроектированная калибровка приведена на рис. 142.

Максимальное отклонение ширины калибра по средней линии полотна от действующей калибровки составляет 1,75 %, а ширины калибра – 2,38 %.

6. Производство профилей дверных петель высокой точности

Повышенные требования, предъявляемые многими заказчиками к точности изготовления профилей для дверных петель, чистоте поверхности и механическим свойствам, необходимы для устойчивой работы полуавтоматических линий по переработке этих профилей, улучшения качества изделий, повышения производительности процесса изготовления дверных автомобильных петель, экономии металла и улучшения условий работы обслуживающего персонала.

Прогрессивная технология изготовления дверных петель из холоднодеформированных профилей высокой точности освоена на Волжском автозаводе. Для изготовления дверных петель используются два различных профиля. Технология включает операции поперечной рубки профилей на заготовки, изготовление паза под шарнир, продольную рубку заготовок, сверление отверстий под ось шарнира, галтовку, промывку и сборку петель. Поперечная рубка на мерные заготовки осуществляется на высокопроизводительном автоматическом отрезном станке, в состав которого входят два симметрично расположенных загрузочных стола, два парных рольганга, предназначенных для подачи в автоматическом режиме полос к кривошипному прессу с усилием прессования 0,12 МН, оборудованному пневмоприжимом, пневмоупором и двумя наклонными уборочными транспортерами.

Сборка петель осуществляется на автоматических станках и включает операции по установке и центровке отверстий звеньев на центрирующем штоке, смазке, запрессовке пальца, чеканной закрепке и выдаче готовых петель. Все операции выполняются автоматически.

Для получения профилей высокой точности для шарнирных звеньев дверных петель известны следующие основные технологические схемы:

горячая прокатка фасонного подката с последующим волочением или холодной прокаткой;

прессование фасонного подката с последующим волочением или холодной прокаткой;

горячая прокатка фасонного подката – холодная прокатка – волочение.

В указанных технологических схемах для завершающих операций холодной прокатки или волочения используются горячекатаные или прессованные фасонные подкаты, форма которых аналогична форме готовых изделий. Горячекатаный подкат применяется при выполнении крупнотоннажных партий. В тех случаях, когда профили получают в малых количествах или их прокатка приводит к значительным трудностям, а иногда и просто невозможна, более целесообразно использовать горячее прессование фасонного подката.

Итальянская фирма "Fiat" изготавливает профили высокой точности для дверных петель путем волочения горячекатаных фасонных подкатов, имеющих допускаемые отклонения (±0,2 мм) на геометрические размеры. Этот процесс волочения хорошо изучен и освещен в литературе. Однако производительность, дополнительные потери металла, достаточно высокие удельные капитальные затраты, низкая стойкость и сложность изготовления волок (особенно сложной формы), а также высокая себестоимость готовой продукции обусловливает постоянный поиск новых способов производства профилей высокой точности.

Одной из самых трудоемких операций при волочении стальных фасонных профилей является острение (утонение) переднего конца полосы для задачи ее в волоку. Наиболее распространенным методом острения является обжатие конца полосы в профилированных эксцентриковых валках (вальцах). В то же время острение сложных профилей таким способом не всегда осуществимо из-за невозможности выполнения соответствующей калибровки валков.

На многих металлургических предприятиях горячекатаный подкат для дверных петель получают с переполнениями (лампасами) головок профиля в месте разъема калибров, которые затем удаляются на протяжных машинах или с помощью шлифовальных кругов.

В СССР накоплен большой опыт производства профилей повышенной точности для звеньев дверных петель по двум схемам: горячая прокатка фасонных подкатов – холодная прокатка готового профиля, горячая прокатка фасонного подката – волочение готового профиля. Практика освоения этих профилей на сталепрокатных заводах показала, что наиболее простым и экономичным способом является холодная прокатка готового профиля из горячекатаного подката с переполнением чистового калибра при холодной прокатке и с последующим удалением лампасов на специальной установке.

Технология холодной прокатки профилей для дверных петель с использованием четырехвалковых калибров не нашла применения в промышленном производстве вследствие образования лампасов или незаполнения головок в чистовых калибрах из-за недостаточной точности размеров горячекатаного фасонного подката.

Использование холодной прокатки имеет ряд существенных преимуществ перед волочением, так как упрощается технологический процесс (сокращается до шести операций) и увеличивается производительность в 8–10 раз. При переходе с волочения на холодную прокатку из горячекатаного подката при производстве спецпрофилей высокой точности для звеньев дверных петель автомобилей "Жигули" экономический эффект составил более 400 тыс. руб. в год. Холодная прокатка профилей сечением более 1000 мм² осуществляется обычно из горячекатаного подката за один-два прохода с единичным обжатием 3–15 % при скорости прокатки ≤ 1 м/с.

Холодная прокатка профилей для подвижного и неподвижного звена петли автомобиля "Жигули" и "Москвич" проводится на одноклетевом двухвалковом стане 400 с длиной бочки валков 350 мм. Стан работает на подшипниках качения. Привод рабочих валков от электродвигателя постоянного тока мощностью 160 кВт, скорость прокатки 0,25–0,5 м/с, максимальное усилие прокатки 0,75 МН.

Из-за сложности поверхностной закалки профилированной бочки валки для холодной прокатки на стане 400 изготавливаются сборными. Для бандажей валков используют легированные стали 9Х, 9ХФ или 9Х2МФ. Толщина стенок бандажей от 40 до 60 мм. Ручьи нарезают с припуском 0,2–0,3 мм. Кроме того, применяют также конусные соединения бандажей с валом.

После сборки валков их калибры обрабатывают на круглошлифовальном станке мелкозернистым абразивным кругом, рабочая поверхность которого соответствует профилю ручья калибра. Для заправки круга изготавливают специальную оправку. Съемный рабочий элемент оправки (диск диаметром 150–200 мм из термообработанной инструментальной стали) фиксируют на валу при помощи шпонки. Ширину диска выбирают в зависимости от ширины калибра или толщины абразивного круга. На внешней кольцевой поверхности диска нарезают контур обрабатываемого ручья, по которому заправляется абразивный круг. Внешняя кольцевая поверхность дисков рассекается поперечными прямоугольными пазами шириной 4–6 мм на глубину 20–25 мм с шагом 10–15 мм. Это необходимо для образования острых режущих кромок на образовавшихся гребнях. Контур ручья на рабочей поверхности оправок нарезают в центрах оптического профилешлифовального станка при увеличении 25 или 30. Обрабатываемая поверхность проецируется на экран станка, где на кальке при том же увеличении выполнен необходимый контур. Поверхность обрабатывается до тех пор, пока проекция контура ручья полностью не совместится с контуром чертежа. Аналогично изготавливаются шаблоны для контроля нарезки калибров. Перед окончательной доводкой ручьев валков контролируют геометрию рабочей поверхности оправки и абразивного круга. Точность шлифования калибров составляет ±0,01 мм.

Холоднокатаные готовые профили для звеньев дверных петель получают на стане 400 следующим образом.

Исходные горячекатаные подкаты длиной 4–6 м проходят травление в 5–20 %-ном растворе серной кислоты при 80 °С в течение 10 мин. Затем, после десятиминутной промывки травленых заготовок в горячей и холодной воде, заготовки поступают на 5–8 мин в ванны нейтрализации с содовым раствором концентрацией 20 г/л при 60–70 °С.

Прокатка готовых профилей на стане 400 осуществляется за один проход. Особенностью технологии является прокатка этих профилей с лампасами шириной 1–4 мм и толщиной до 2 мм на внешней стороне головки. В качестве смазки и для охлаждения калибров на валки подается эмульсия.

7. Прокатка и калибровка профилей желобчатой формы и шарнирного типа

На первом этапе освоения многие новые профили требуются потребителям опытными малотоннажными партиями, в связи с чем их освоение на металлургических заводах оказывается убыточным. Для снижения затрат такие профили сначала осваивают на полупромышленных станах, а после испытаний у потребителей опытной партии проката, уточнения конфигурации профиля и подтверждения потребности в объемах монтажных норм технология передается на действующие станы для организации промышленного производства. Одним из таких профилей является профиль фаскообразователя.

По существующей на заводе "Строммашина" (г. Черкассы) технологии деталь "фаскообразователь" (рис. 143, *а*) изготавливают из полосовой стали сечением 60×20 мм механической обработкой – на одном из торцов снимают фаску 19×45°. При этом, кроме потери металла в стружку, завод несет большие затраты на механическую обработку этой трудоемкой детали длиной 6000 мм. Для снижения трудоемкости изготовления и экономии металла завод разработал новый профиль фаскообразователя (рис. 143, *б*). Однако в связи с его нетехнологичностью для прокатки в УкрНИИмете разработали горячекатаный профиль с симметричным расположением фасок (рис. 143, *в*). Технологию прокатки отрабатывали на стане 250 опытного завода.

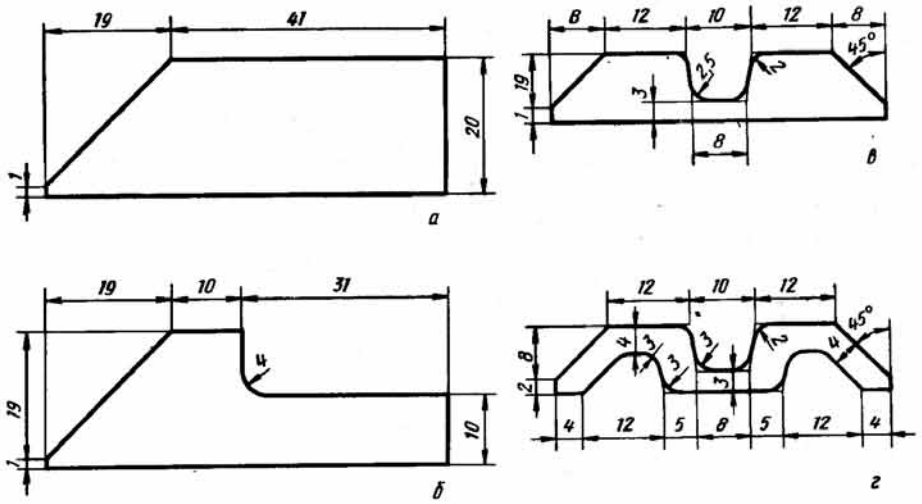


Рис. 143. Различные формы профиля фаскообразователя

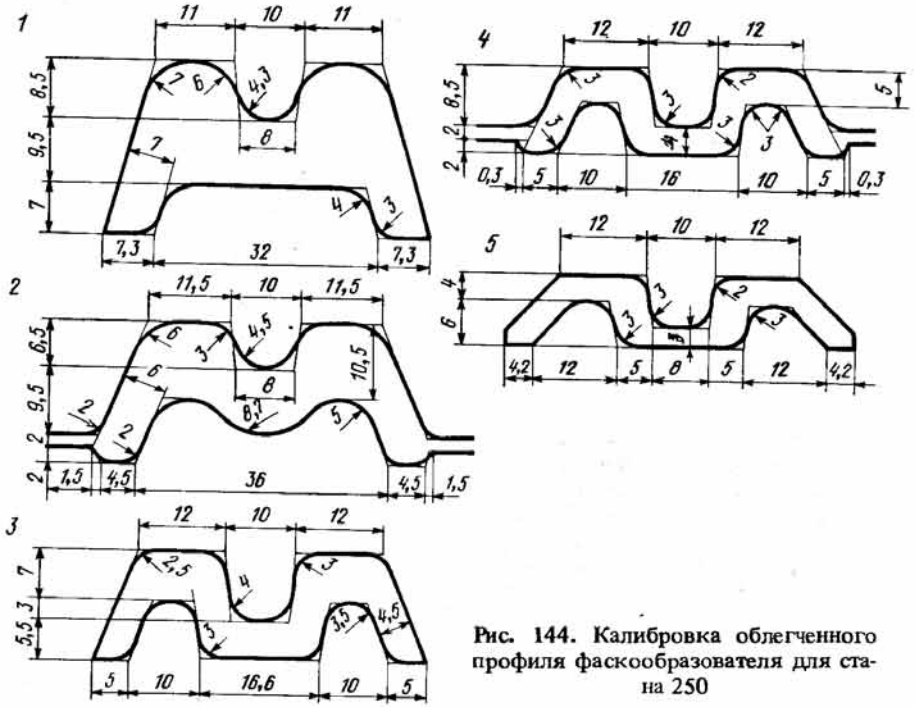


Рис. 144. Калибровка облегченного профиля фаскообразователя для стана 250

Анализ темплетов показал удовлетворительное выполнение всех элементов профиля. Качество поверхности готового проката соответствовало требованиям потребителя.

После испытания опытной партии профиля в промышленных условиях институт разработал новый профиль (облегченный на 35 %) корытообразной формы с тремя горизонтальными участками и наклоненными к ним под углом 45° фасками (рис. 143, *г*). Калибровка выполнена по способу прокатки корытообразных профилей с последовательным чередованием закрытых и открытых калибров с уклоном внешних граней фланцев 32° в предчистовом и 16–22° в черновых калибрах (рис. 144). По конструкции фасонные калибры аналогичны применяемым для прокатки корытообразных профилей с развернутыми полками. Это обеспечивает контроль ширины фаскообразователя во втором черновом и предчистовом калибрах по ходу прокатки и получение профиля без переполнения в местах разъема валков.

Режимы обжатий по проходам, коэффициенты вытяжек по элементам, уширение и радиусы закруглений рассчитывали по методу прокатки корытообразных профилей в прямополочных калибрах. Общая вытяжка в фасонных калибрах составляла 5,1; средняя за проход – 1,225.

Изготовленная партия проката прошла успешное испытание, а данная технология внедрена на стане 280.

Калибровку профиля (рис. 145) для стана 280 выполнили по тем же принципам, что и для стана 250 с учетом особенностей промышленного производства. В качестве подготовительных калибров для прокатки профиля фаскообразователя использовали черновые калибры, предназначенные для прокатки круглой стали, входящей в сортамент стана 280. Это позволило прокатывать профиль без перевалки черновой группы клетей и сократить число фасонных калибров.

По разработанной калибровке (рис. 145) профиль прокатывали в трех фасонных калибрах из овала сечением 46×16 мм, врезанного на валках обжимной

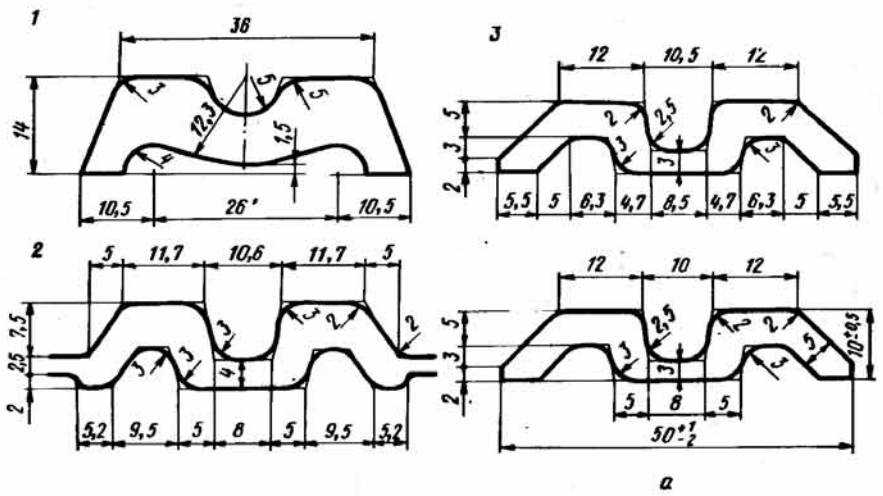


Рис. 145. Профиль фаскообразователя, освоенный на стане 280, и его калибровка; *а* – готовый профиль

клети, с образованием петли между чистовыми клетями V и VI, VI и VII. Раскат овального сечения 46×16 мм в клеть *5* задавали с помощью трайб-аппарата. Вытяжка в фасонных калибрах составила 1,55.

Анализ темплетов показал удовлетворительное выполнение всех элементов профиля, причем ширина его получена в минусовом поле допуска. Качество поверхности готового профиля удовлетворяет требованиям потребителя. Охлаждение профиля на холодильнике проводилось по обычной технологии. Серповидность раскатов не превышала 2,5 мм на 1 м длины.

Профиль был получен с первой прокатки без корректировки калибровки.

На том же стане 250 опытного завода УкрНИИмета освоена прокатка специального профиля СКР20-36×19ПЗ для скребков тяговой цепи угольных конвейеров. Профиль имеет сложную W-образную форму и поставляется заказчику в сжатом состоянии.

По разработанной калибровке (рис. 146) профиль прокатывается в девяти калибрах из заготовки сечением 56×56 мм. В первых шести калибрах прокатывают развернутый W-образный профиль с толщиной элементов, соответствующих готовому профилю, а в последующих трех ящичных калибрах осуществляют его сжатие (гибку) в двух направлениях.

Развернутый профиль имеет высокие фланцы с утолщениями на конце для получения которых использовали исходную заготовку с высотой в три раза большей высоты профиля. В калибрах *1* и *2* прокатку вели со значительным ограничением уширения, а в последних даже с боковым обжатием. Ширина по дну в каждом последующем калибре была несколько меньше, чем в предыдущем. Суммарное уменьшение ширины составило 4,6 мм.

Для симметричной разрезки металла и получения фланцев одинаковой высоты необходимо обеспечить хорошее центрирование полосы в первых калибрах. С этой целью высоту нижнего и верхнего гребней валков в калибре *1* предусмотрели небольшой, а конфигурацию нижнего гребня в калибре *2* выполняли аналогично калибру *1*. Наиболее интенсивно разрезка осуществляется в калибрах *3* и *4*, где коэффициенты высотной деформации по нижнему гребню равны соответственно 1,59 и 1,76, а по верхнему 1,49 и 1,68. В первых двух калибрах гребни оказывают меньшее разрезающее действие, но из-за большой общей высотной деформации и ограничения уширения наблюдается значительное прира-

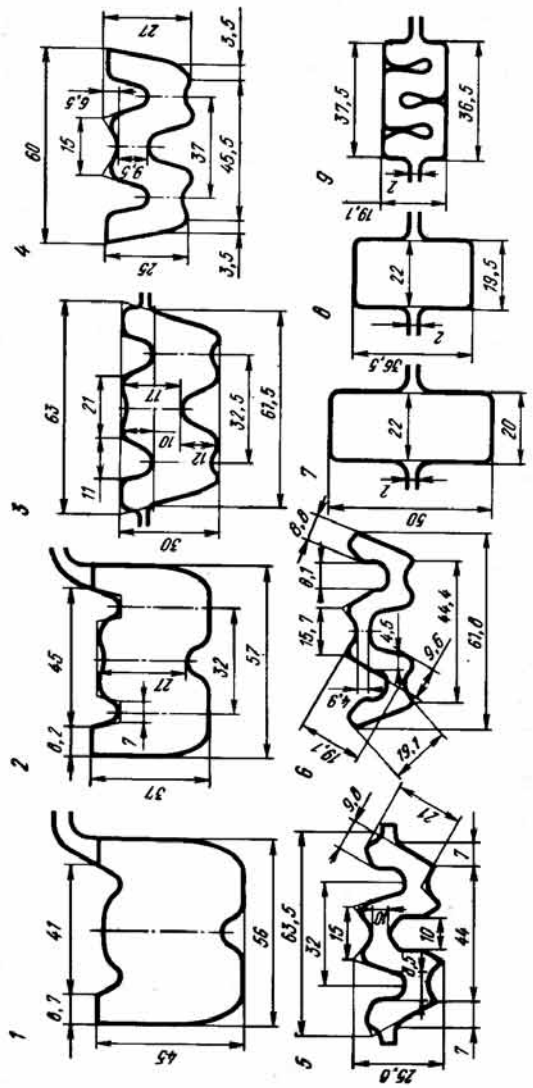
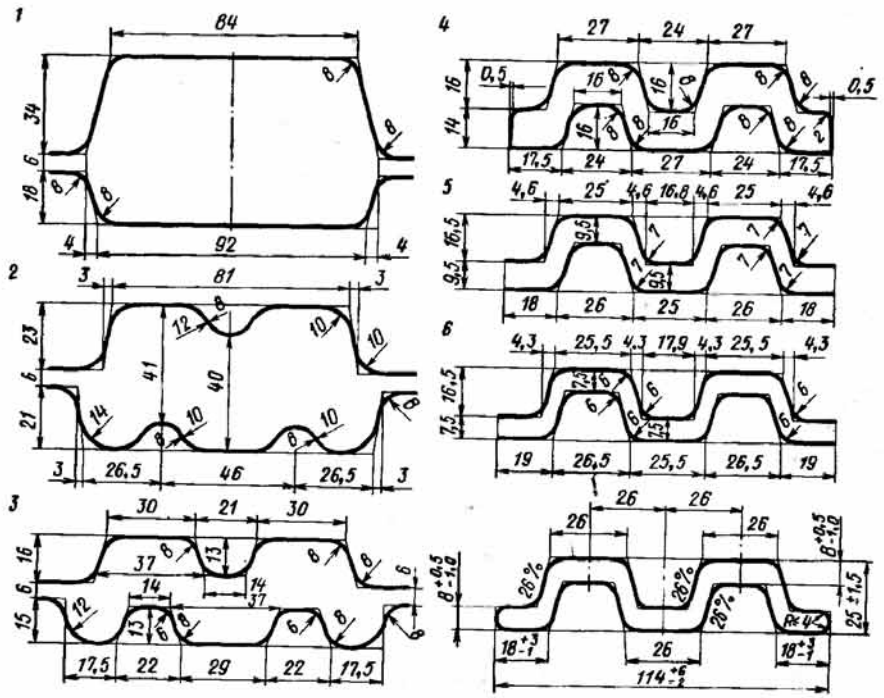


Рис. 146. Калибровка профиля СКР сечением 20–36×19П3



а

Рис. 147. Калибровка профиля для жестких верхняков на линейном стане 500 (исходное сечение 76×76 мм; *а* – готовый профиль)

щение фланцев. Высота фланцев контролируется в калибрах *3* и *5*, где они обжимаются по высоте на 2,6 и 1,0 мм соответственно.

Ящичные калибры сконструированы с учетом геометрических размеров развертки и окончательных размеров профиля. Для надежного захвата полосы валками предполагалось сжимать профиль в двух ящичных калибрах *7* и *8*. Однако опыт показал, что надежный захват обеспечивается и при задаче развертки сразу в калибр *8*. Первая же опытная прокатка профиля показала соответствие его техническим условиям.

МИСиС совместно с металлургическим комбинатом "Азовсталь" разработали и освоили калибровку валков для прокатки профиля СП-63 способом постепенного сгибания полок [3].

На рис. 147–152 приведены калибровки желобчатых профилей.

Украинским научно-исследовательским институтом металлов совместно с Всесоюзным конструкторско-экспериментальным институтом автобусостроения разработан унифицированный профиль корытообразного типа (рис. 153) для подвижной и неподвижной петель аварийных окон автобусов с целью упрощения технологии прокатки и экономии металла при изготовлении этих деталей. Калибровка профиля выполнена по способу прокатки корытных профилей в прямополочных калибрах с подгибкой стенки на 6–10° и уклоном внешних граней фланцев 6° в предчистовом и 8–10° в черновых калибрах. Осевое давление на валки должно быть минимальным, в связи с чем среднее значение катающих радиусов по головкам калибра должно быть одинаковым.

По конструкции фасонные калибры аналогичны применяемым для прокатки двутавровых балок и швеллеров. Все калибры выполнены закрытого типа за

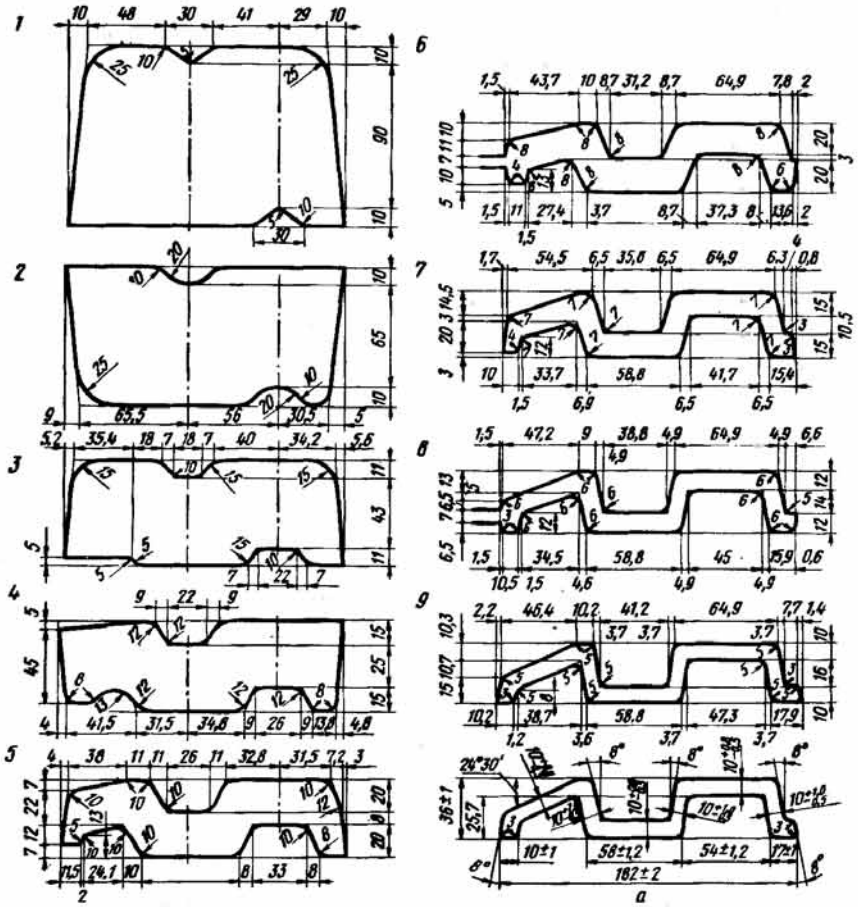


Рис. 148. Калибровка профиля планки замкового соединения металлической крепи ПЗС-20 на линейном стане 620 (исходное сечение 155×135 мм; *а* – готовый профиль)

исключением чистового, форма поперечного сечения которого не позволяет выполнить его закрытым. Конструкция закрытого предчистового калибра обеспечивает получение профиля в заданном поле допусков без усов по месту разъема валков.

Размеры готового профиля определяли в горячем состоянии с учетом коэффициента термического расширения металла (1,013) и 50 % минусового отклонения на соответствующий размер. Коэффициенты деформации по проходам, уширение, вытяжку по элементам, радиусы скруглений рассчитывали по методу прокатки швеллеров в прямополочных калибрах с учетом технических возможностей оборудования.

Согласно разработанной калибровке профиль прокатывали на стане 250 опытного завода УкрНИИмета в девяти фасонных калибрах из круглой заготовки диаметром 65 мм (сталь Ст3кп) по схеме: четыре прохода в обжимной, три – в черновой и два в чистовой трехвалковых клетях. Температура нагрева заготовок составляла 1230–1250 °С, а конца прокатки 950–960 °С. Для предотвра-

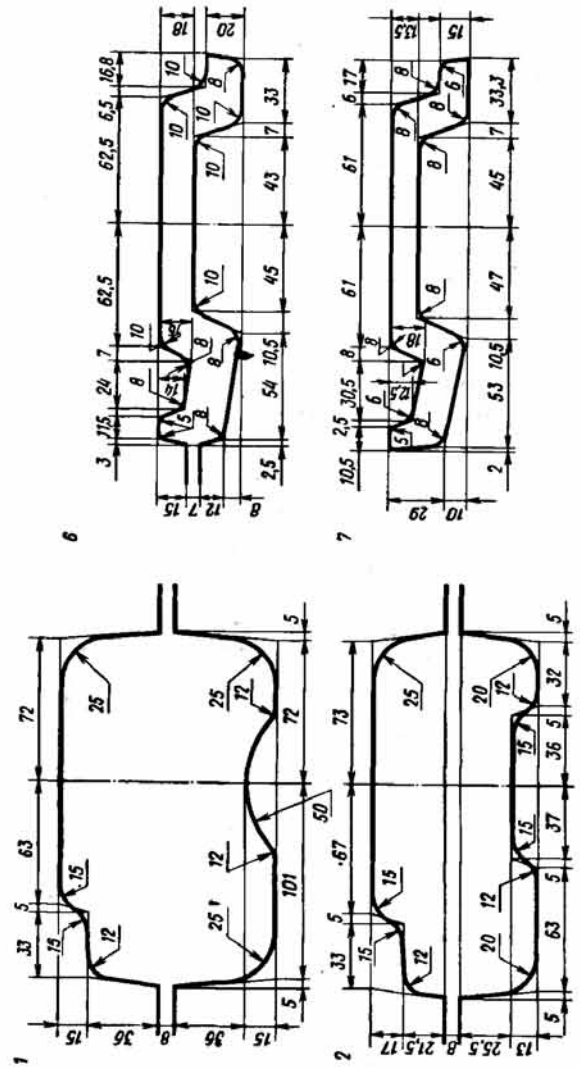
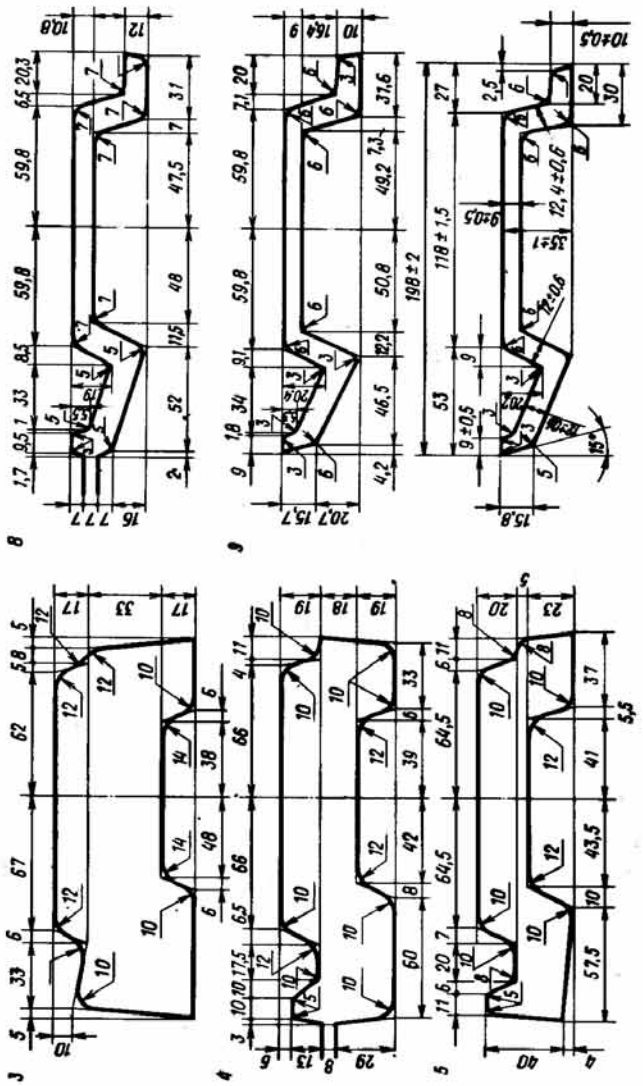


Рис. 149. Калибровка профиля планки замковых соединений арочных крепей горных выработок на линейном стане 620 (исходное сечение 160×135 мм; *а* – готовый профиль)



Продолжение рис. 149

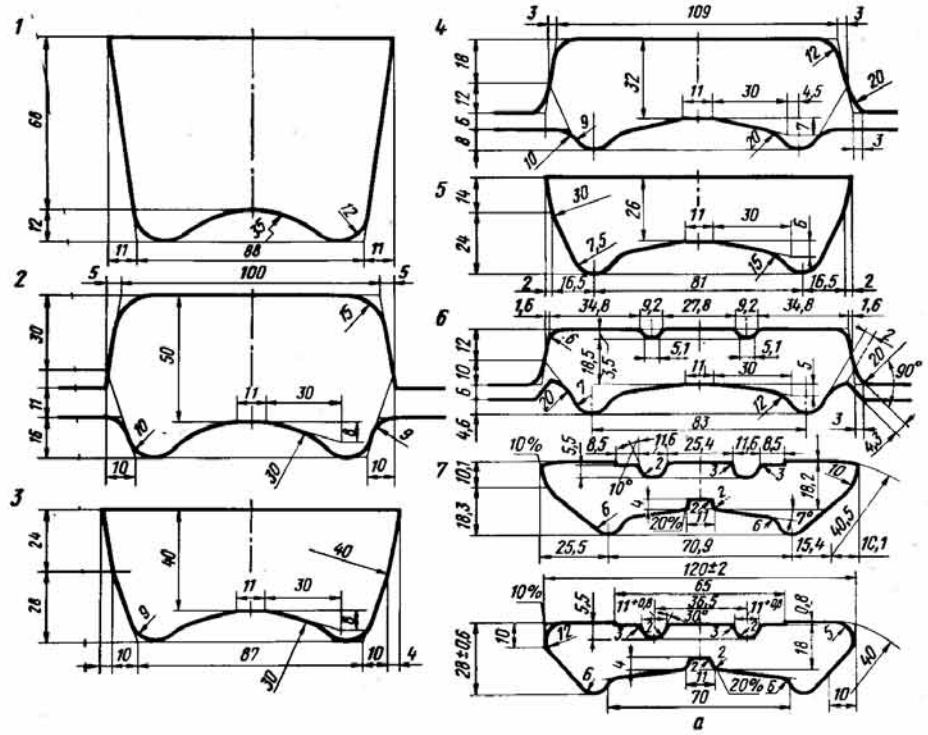


Рис. 150. Калибровка профиля для подушек рессор тракторных прицепов на линейном стане 550; *а* – готовый профиль

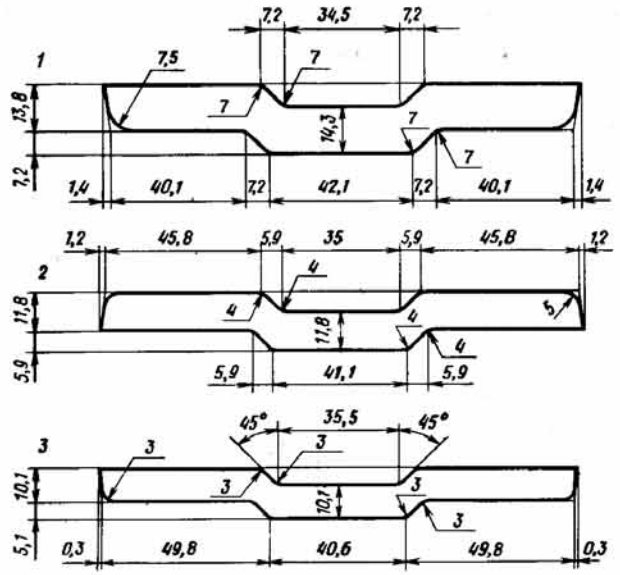


Рис. 151. Калибровка одножелобчатого профиля для сельскохозяйственных машин на линейном стане 585 (исходное сечение 133×17 мм)

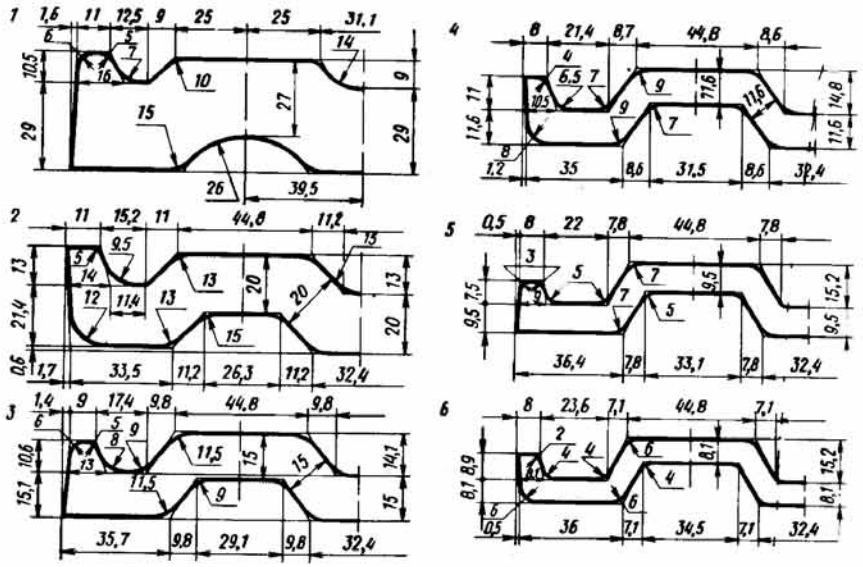


Рис. 152. Калибровка профиля двухжелобчатого сечения на линейном стане 585 (исходное сечение 196,5×43 мм)

щения взаимного смещения валков по крайним буртам выполнили вертикальные двусторонние опорные конусы. Во всех калибрах запроектировали стесненное уширение.

Контроль высоты головки осуществлялся в первом, в пятом по ходу прокатки и в предчистовом калибрах. Общая вытяжка составила 7,2, средняя за проход 1,24.

В результате первой опытной прокатки требования технических условий не были выполнены. По месту разъема валков на круглых головках готового профиля образовывался двусторонний ус шириной 1–1,5 мм.

На основании анализа темплетов, отобранных от полос каждого фасонного калибра, установили, что произошло переполнение головок в третьем и предчистовом калибрах по ходу прокатки; это привело к перетеканию металла в разъемы валков открытого чистового калибра. Для устранения этого дефекта скорректировали черновые калибры с чередованием положения разъемов валков. По скорректированной калибровке (рис. 154) профиль получен без усов в соответствии с требованиями технических условий. Серповидность готового профиля составляла 1–1,5 мм на 1 м длины.

При прокатке профиля по откорректированной калибровке взяты темплеты от полос каждого прохода.

После первого разрезного прохода, в котором боковые грани заготовки еще не пришли в соприкосновение с боковыми стенками полуоткрытого калибра, высота фланцев сверху и снизу заполняется не полностью. В последующих проходах заполняются все элементы калибра при сравнительно небольшой неравномерности высотной деформации по сечению. Средняя часть раската обжимается в большей степени, чем крайние головки.

Прокатка во всех девяти калибрах протекает почти с равномерными вытяжками для всех элементов профиля. Некоторое отклонение наблюдается в первых четырех калибрах по ходу прокатки: здесь коэффициенты вытяжки по стенке несколько меньше, чем по фланцам. В последних четырех проходах коэффициенты вытяжки для стенки и фланцев примерно равны. В чистовом калибре дефор-

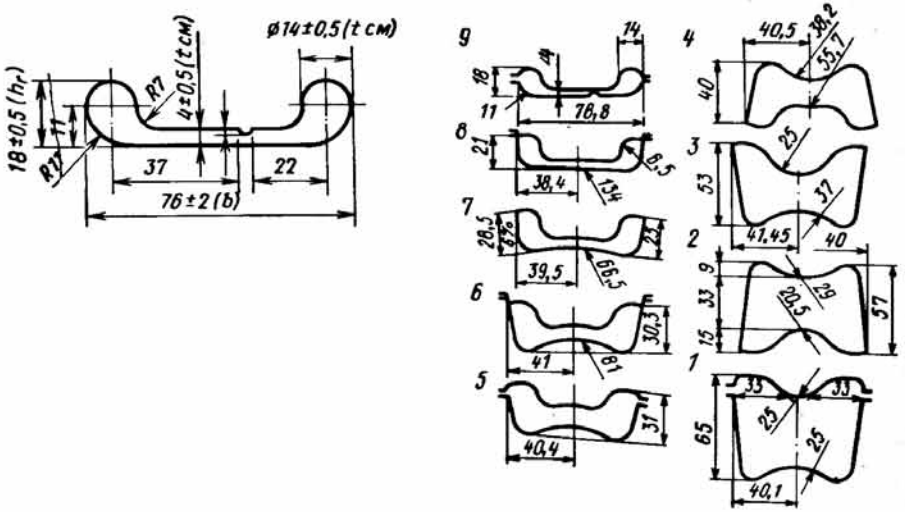


Рис. 153. Профиль петли для аварийного люка автобусов

Рис. 154. Окончательный вариант калибровки профиля петли для аварийного люка автобусов

мация стенки на 4 % превышает обжатие головки профиля, что предотвращает его переполнение.

Коэффициенты вытяжки всего сечения профиля изменяются от 1,15 в первом разрезном калибре до 1,012 в чистовом; средний коэффициент вытяжки за проход составляет 1,176. Боковое обжатие фланцев распределяется равномерно по всей высоте. Исключение составляет только чистовой калибр, в котором уменьшением высоты компенсируется недостаточная боковая обработка.

Во всех калибрах толщина у края фланца, поступающего в последующий ручей, на 1–2 мм больше соответствующего размера ручья, что обеспечивает беспрепятственное проникновение фланцев в калибр. Наличие бокового обжатия по краям фланцев объясняется тем, что профиль петли имеет большой уклон внутренних граней полок (6–10°), что в значительной степени способствует проникновению фланцев в ручей калибра без защемления полосы.

В разработанной калибровке предусмотрены большие значения утяжки фланцев: в первых трех черновых проходах в пределах 13,3–8,7 мм, в последующих четырех 13,6 мм, в предчистовом 3,65 и в чистовом 1,3 мм.

Анализ темплетов показывает удовлетворительное выполнение всех элементов профиля. Качество поверхности готового проката удовлетворяет требованиям потребителя. В результате экономии металла и трудовых затрат у потребителей ожидается получение существенного экономического эффекта.

На непрерывном четырехклетевом стане 300 Череповецкого сталепрокатного завода прокатана опытно-промышленная партия нового профиля для неподвижного звена дверных петель автомобиля "Запорожец".

Профиль представляет собой полотно толщиной 6,5 мм с круглыми бобышками по краям: ширина профиля 124 мм.

В качестве заготовки для его прокатки применяют круг диаметром 70 мм. Прокатка происходит за четыре прохода. С целью получения готового профиля необходимой ширины (124 мм) при разработке калибровки использовали калибры, создающие усиленное вынужденное уширение (рис. 155). В первом калибре ширина раската в основном увеличивается за счет разрезки круга на две по-

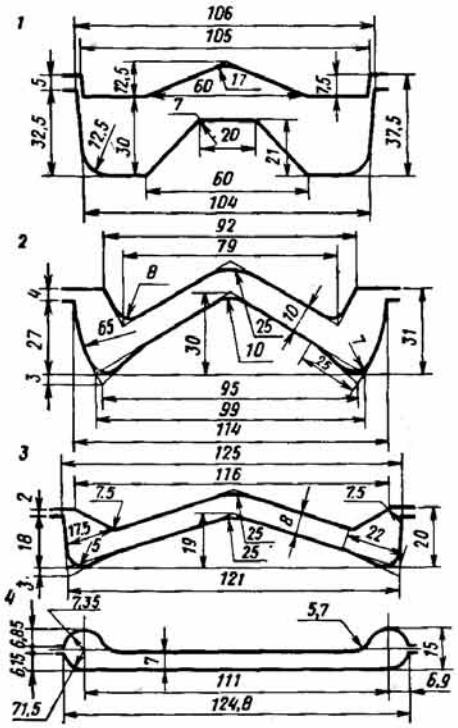


Рис. 155. Калибровка горячекатаного подката для дверных петель автомобиля "Запорожец"

ловины с последующей их разверткой в противоположные стороны, а в остальных калибрах – за счет дальнейшей развертки левой и правой сторон в горизонтальное положение. Для центровки круглой заготовки первый калибр выполнен таким образом, что в момент выхода заготовки касается его в трех точках. Форма поперечного сечения бобышек профиля не позволила применить чистовой калибр закрытым, и он сделан открытым. Для выполнения круглых головок профиля было решено вести прокатку с переполнением чистового калибра. Образовавшиеся при этом прокатки срезают на специальной машине.

Общая вытяжка по четырем клетям составила 3,68; средняя вытяжка за проход – 1,38.

На рис. 156 показаны обводки темплетов полос, отобранных после каждой клети. Ширина прокатанных полос с усом колебалась в пределах 125–133,5 мм. Разноширинность полос с усом на некоторых раскатах достигала 6 мм; толщина усов 1,95–2,1 мм.

После срезания усов с прокатанного профиля на специальной машине ширина полос находилась в пределах 123,6–124,6 мм; при этом разноширинность 91,9 % полос находилась в пределах 0,1–0,75 мм.

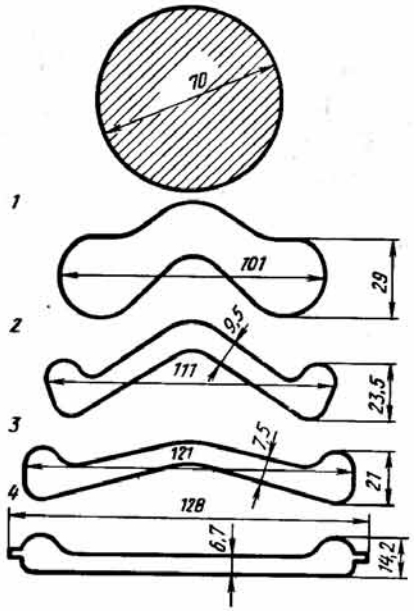
Применение катаного профиля вместо штампованных заготовок позволяет уменьшить расход металла в 1,76 раза и трудоемкость в 1,7 раза при изготовлении профиля, а также улучшить товарный вид дверных петель автомобиля "Запорожец".

Челябинским металлургическим комбинатом совместно с Челябинским политехническим институтом разработана новая калибровка валков для прокатки в спаренном виде фасонного профиля "замочное кольцо" на непрерывном мелкосортном стане 300. На заводах-потребителях полосы разрезают вдоль оси симметрии и на мерные длины.

Стан 300 имеет 15 клетей, из них 10 горизонтальных и 5 вертикальных. Профиль прокатывают из квадратной заготовки сечением 100×100 мм и длиной 9–10 м за 12 проходов. При прокатке не используются три последние вертикальные клети, чередующиеся с горизонтальными.

Первоначальная (*I*) и усовершенствованная (*II*) калибровки показаны на рис. 157. Калибровка валков в первых четырех клетях не изменена. Калибровка валков клетей (8–10 изменена таким образом, что толстые и тонкие элементы профиля приведены в одну плоскость. При прокатке по калибровке *I* пропускная способность участка холодной резки была недостаточной, вследствие чего

Рис. 156. Обводки темплетов при прокатке горячекатаного подката для дверных петель автомобиля "Запорожец"



металл после резки изгибался в вертикальной плоскости, концы его опускались на плитовый настил, в результате металл не продвигался по рольгангу. Каждую штангу после реза приходилось кантовать вручную на ребро на 90°, что сдерживало производство.

Исследование показало, что причиной изгиба являются остаточные термические напряжения. Так как толщина отдельных элементов профиля различна, профиль охлаждается неравномерно. Быстрее охлаждается и сокращается по длине металл на участках меньшей толщины. При этом более горячие толстые элементы могут пластически деформироваться. Когда же остывает и сокращается по длине металл на участках толстых элементов, то уже остывшие тонкие элементы не могут сжиматься, вследствие чего по сечению возникают напряжения противоположных знаков. Так, по калибровке *I* элементы с толстыми и тонкими участками лежат в разных плоскостях по вертикали, что и является причиной изгиба, причем пока длина штанги достаточно большая, напряжения уравновешиваются ее массой, изгиб же происходит после реза штанги на ножницах на мерные длины.

Было предложено, не изменяя размеры и форму готового профиля, изменить угол сопряжения, перевести толстые и тонкие элементы в одну плоскость (калибровка *II*). Напряжения при этом остаются такими же, но из-за того, что элементы находятся в одной плоскости, изгиба металла не происходит.

При новой форме калибра в клети № 8 заполнение его по высоте больше, что обеспечивает выполнение всех элементов готового профиля, одновременно прекратилось выкрошивание калибра. Клеть № 8 можно загружать так же, как и другие, в результате чего снизилась нагрузка на соседних клетях.

Применение новой формы калибров позволило уменьшить исходный диаметр валков в клетях № 8–10 в разность диаметров по калибру, в результате чего уменьшились силы трения в очаге деформации, сократился расход энергии, увеличилась стойкость валков.

На этих клетях прекратились оковы.

В связи с тем, что изменение калибровки валков клетей № VIII–X усложнило настройку стана, была изменена калибровка валков вертикальной клети *B*.

Настройка стана усложняется еще тем, что в качестве опоры валков применяются двухрядные сферические роликоподшипники, при выработке которых образуются довольно большие осевой и радиальный люфты. Как правило, валки смещаются под действием металла в осевом направлении, а после разгрузки клети возвращаются по сфере радиального подшипника в исходное положение,

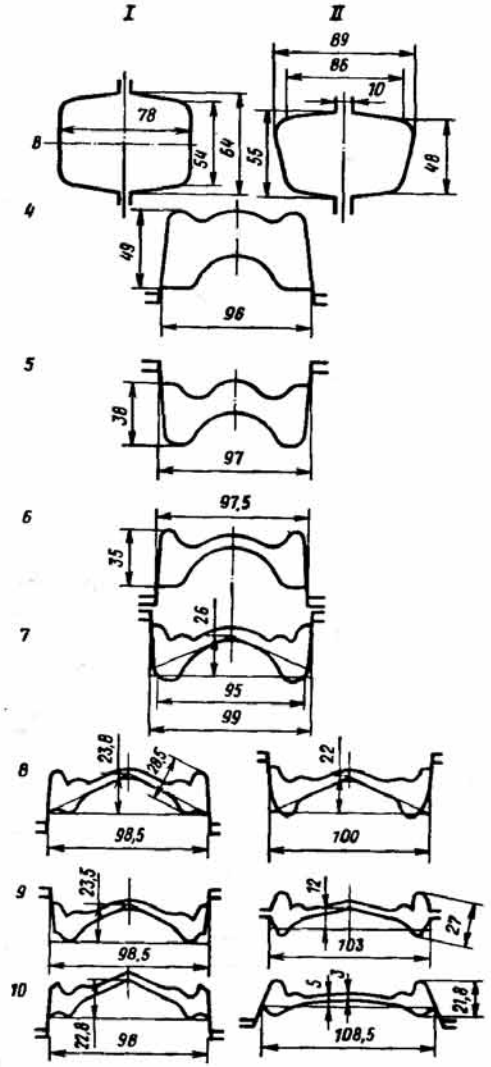


Рис. 157. Схема первоначальной (*I*) и усовершенствованной (*II*) калибровок при прокатке в сдвоенном виде профиля для замочного кольца автомобиля

поэтому осевое смещение валков невозможно определить на холостом ходу или при остановке.

Если ранее по калибровке *I* ширина калибра клети *B* была больше ширины задаваемой полосы и точности разрезки в клети № 4 зависела главным образом от положения вводной арматуры и величины зазора между пропусками и металлом, то при калибровке *II* ширина полосы и формы калибра клети *B* выбраны из условия одновременного захвата металла дном калибра и выпусками боковых стенок. Арматура устанавливается несколько выше обычного, что обусловливает нагрузку главным образом на дно арматуры; раскат задается на верхний валок.

Отраслевой лабораторией прокатного производства Магнитогорского горно-металлургического института предложен и испытан в лабораторных условиях способ холодного калибрования горячекатаного профиля петли двери в клетях с четырехвалковыми калибрами.

Экспериментальная установка выполнена на базе двухвалковой клети. Четырехвалковый калибр образован двумя горизонтальными приводными и двумя вертикальными холостыми валками диаметром 500 мм. Оси всех валков лежат в одной плоскости. Регулировка зазора между приводными валками осуществляется винтовым нажимным устройством клети, между холостыми – перемещением валков нажимными винтами в специальных кассетах, установленных между подушками горизонтальных валков.

Привод клети с четырехвалковым калибром осуществляется от асинхронного двигателя мощностью 100 кВт с частотой вращения n = 590 об/мин через редуктор и шестеренную клеть.

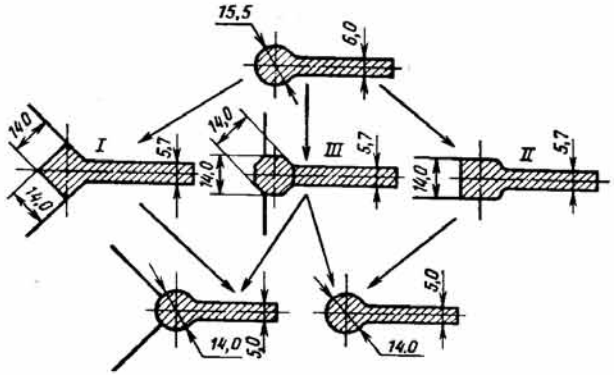


Рис. 158. Схемы калибровок в четырехвалковых клетях для прокатки профилей дверных петель

Системы четырехвалковых калибров рассчитаны с соблюдением правила вписанных фигур. В связи с этим правилом выполнение головки профиля с требуемыми допусками возможно при минимальном числе проходов, равном 2.

На рис. 158 представлены возможные схемы калибровки четырехвалковых клетей при холодной прокатке профиля петли двери для легкового автомобиля ВАЗ. Они различаются формой сечения головки в промежуточном (предчистовом) калибре и сопряжением приводных и холостых валков при образовании калибра.

В схемах *I* и *II* промежуточным сечением головок является квадрат. В соответствии с правилом вписанных фигур, его предельные размеры должны быть такими, чтобы они вписывался в круглое сечение головки исходного (чернового) и был описанным относительно круглого сечения головки готового профиля, выполнение этого правила является условием получения прокатанной полосы без заусенцев. Незаполнение квадратной части промежуточного калибра позволяет работать в любом диапазоне вытяжек вплоть до теоретических ($\lambda = 1{,}57$). Разъемы калибров располагаются в местах, где размеры поперечного сечения заготовки и прокатанной полосы равны, т.е. обжатие по этим направлениям отсутствует.

В схеме *I* квадраты головок врезаны на диагональ. Разъемы предчистового калибра при этом находятся в вершинах квадратов на осях головок, перпендикулярных полке профиля, а линии сопряжения валков наклонены под углом 45°. Ввиду равенства диаметров всех валков при таком сопряжении линейные скорости приводных и холостых валков во всех точках контакта одинаковы. При такой схеме возможна работа взабой и износ по поверхности контакта будет минимальным. Однако данная система исключает индивидуальную регулировку приводных и холостых валков в направлении уменьшения размера.

В схеме *II* в качестве предчистового используется ящичный квадратный калибр. Линии сопряжения в этом случае параллельны осям горизонтальных валков. Ширину полосы в этой схеме можно менять при постоянном зазоре между приводными валками. Разъем чистового калибра выполняется по вертикальной оси головки профиля.

Схема *III* дает возможность при калибровке приводных валков не учитывать "пружину" клети в направлении действия основного усилия. Практически любая "пружина" может быть компенсирована предварительным прижатием горизонтальных валков. Преимуществом данной системы является более равномерная деформация головки в восьмигранном калибре, так как нарушение ее формы незначительно. Схема *III* позволяет в качестве чистовых иметь калибры с сопряжением как по схеме *I*, так и по схеме *II*.

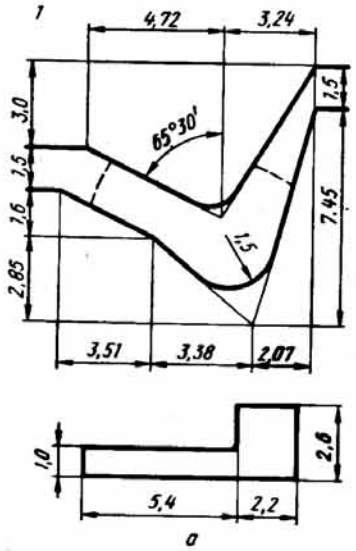


Рис. 159. Калибровка горячекатаного подката профиля для окантовки горных лыж на лабораторном стане ЦНИИчермета (исходное сечение – круг 5,1 мм; *а* – готовый профиль)

Для опытной установки принята система калибровки по схеме *I*. В качестве исходного профиля использован горячекатаный подкат Днепровского металлургического завода, изготовленный в соответствии с ТУ ДГЗ – 30–70. Горячекатаная заготовка перед холодным калиброванием травится в 50 %-ном растворе HCl с последующей нейтрализацией кислоты щелочью. Смазкой при прокатке являлось минеральное машинное масло. Исходя из размеров сечения заготовки определены предельные значения вытяжек по элементам профиля. Вытяжки элементов профиля примерно равны. Вытяжка головки в предчистовом калибре при получении незаполненного квадрата 14 мм составляла 1,04–1,07. В соответствии с этим полка получила примерно такое же удлинение. Отсутствовало коробление, скручивание, серпение полосы, толщина полки после прокатки в предчистовом калибре составляла 5,55 мм. При расчете предчистового калибра не было введено никакой корректировки на "пружину" клети. При прокатке для исключения этого несоответствия применено предварительное напряжение клети. Так как нажимное устройство не позволяло создать необходимое предварительное напряжение, то последнее создавалось распором валков настроечной полосой. Для этого при разведенных холостых валках между горизонтальными валками установлен зазор, необходимый для получения заданного обжатия по полке в одном проходе. В валки задавалась полоса без головок шириной, равной ширине полки, и соответствующей толщины и останавливалась в валках, создавая тем самым необходимое усилие распора. Холостые валки с помощью нажимных устройств вводились до упора с приводными. После удаления настроечной полосы из валков калибр получался предварительно напряженным. Полосы, прокатанные после такой настройки, имели размеры, удовлетворяющие требованиям технических условий.

Опытная партия неподвижной части профиля в количестве 100 кг и длиной полос 2 м дала удовлетворительные результаты при изготовлении дверных петель на Волжском автозаводе.

В ЦНИИчермете разработан и опробован на лабораторной двухклетевой установке непрерывного типа технологический процесс с использованием способа холодной прокатки и исследованы его особенности для получения мелких высокоточных фасонных профилей площадью сечения 11–15 мм².

Для выявления особенностей процесса прокатки профилей на непрерывных станах исследовано изготовление потенциального профиля для окантовки горных лыж (рис. 159, *а*). Этот профиль изготавливался из калиброванного прутка стали У7А диаметром 5,1 мм по следующей схеме: горячая прокатка (рис. 159) – холодная прокатка (один проход) – светлый отжиг – травление – холодная прокатка (один проход). Данная технологическая схема получения мелких профилей может быть осуществлена как на станах с последовательным расположением клетей, так и на непрерывных.

При проведении исследований решались две основные задачи:

1. Выявление возможности сокращения промежуточных операций термообработки и травления в технологической цепи получения профилей и, следовательно, возможность непрерывной холодной прокатки.

2. Выявление степени влияния натяжения на параметры процесса и размеры готовых профилей при непрерывной холодной прокатке.

УкрНИИметом совместно с Краматорским металлургическим заводом на крупносортном стане 620 освоено получение из стали 30ХМА низкокорытного

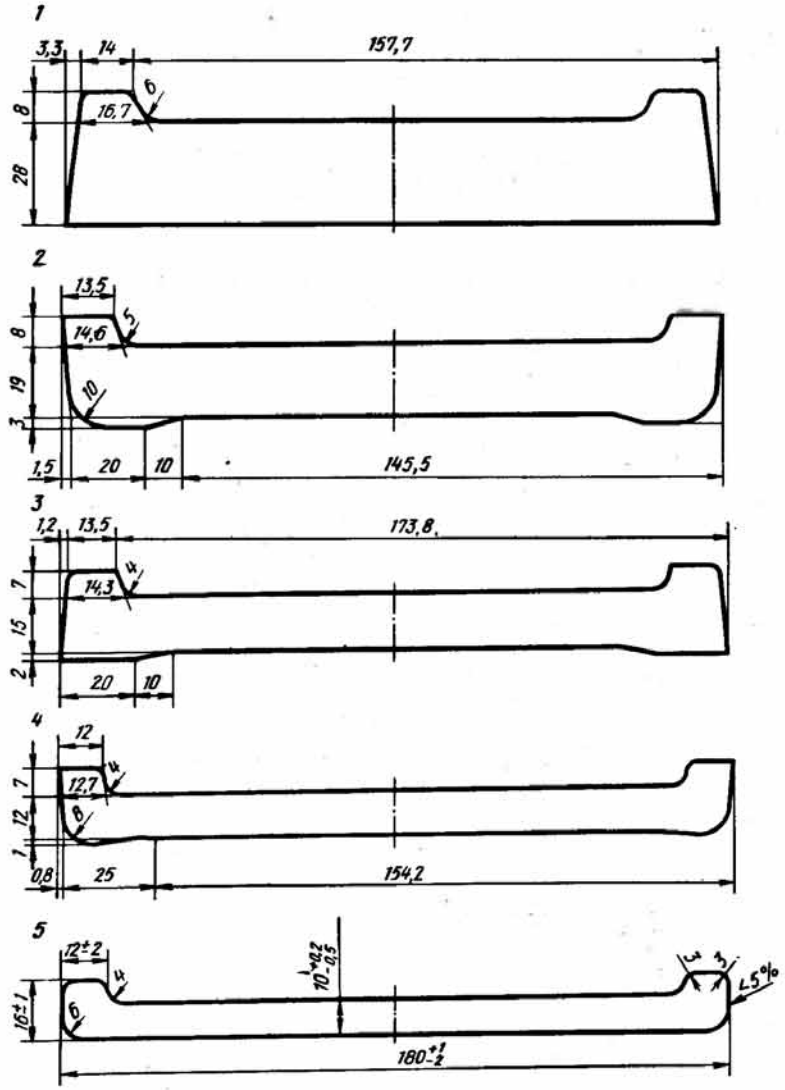


Рис. 160. Калибровка низкокорытного профиля на линейном стане 620 (исходное сечение 169×42 мм)

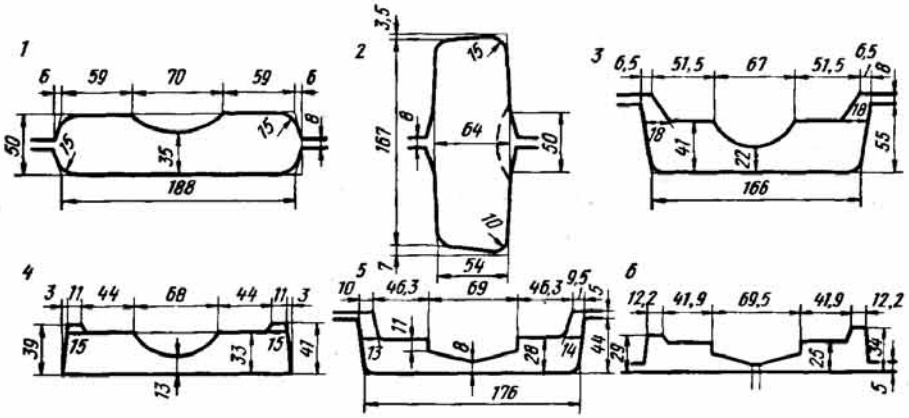


Рис. 161. Калибровка специальных профилей для лапок-удержек на линейном стане 450 (исходное сечение 184×55 мм)

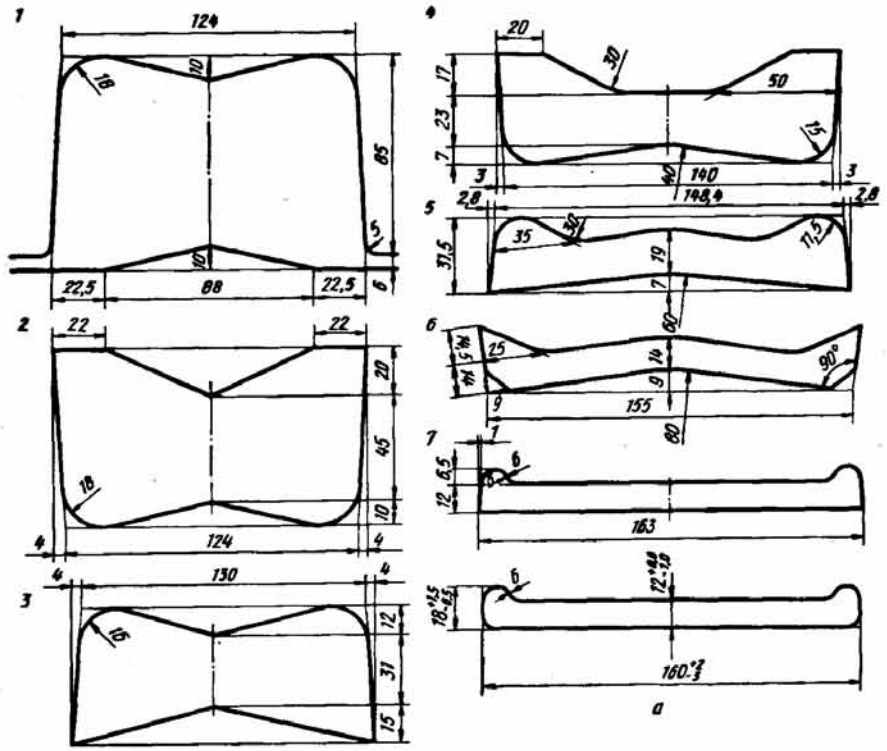


Рис. 162. Калибровка профиля для хомутов стоек на линейном стане 500; *а* – готовый профиль

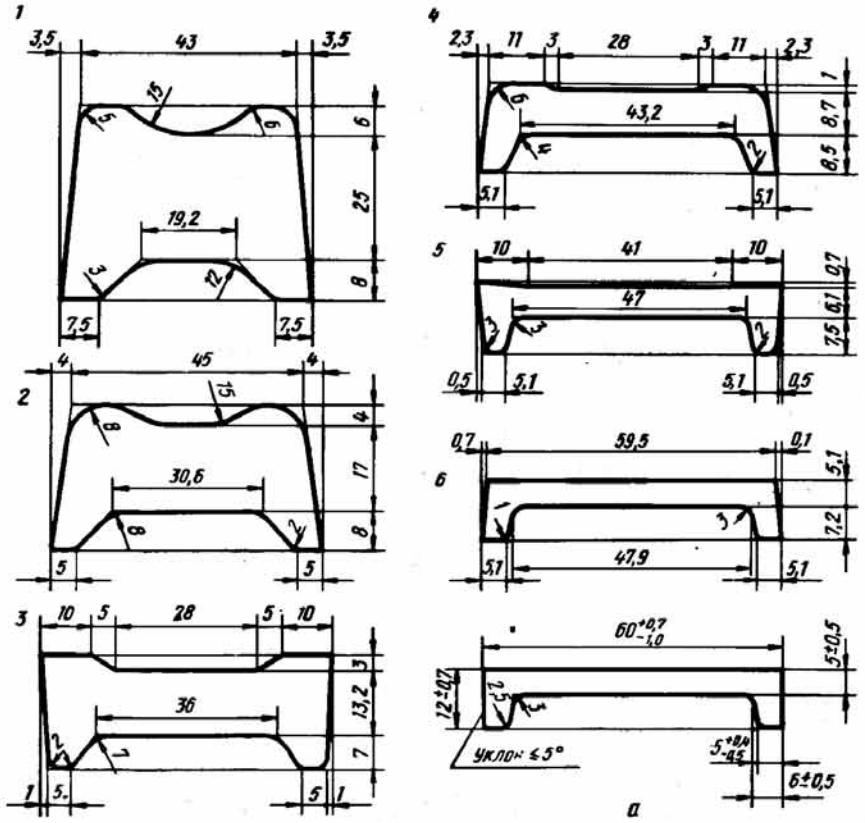


Рис. 163. Калибровка низкокорытного профиля для сельскохозяйственных машин на линейном стане 300 (исходное сечение 53,3×52,2 мм; *а* – готовый профиль)

профиля сечением 180×16×10 мм, который используется для стоек крепления забоя в подземных выработках.

Для производства этого профиля применили систему прямополочных калибров с чередованием закрытых и открытых полок (рис. 160). распределение проходов по клетям: 4–5–4; заготовка сечением 170×170 мм.

Высота исходного сечения для калибра *1* в 2,6 раза превышает высоту готового профиля вследствие интенсивной утяжки полок, вызванной значительным различием площадей полок и стенки готового профиля.

Для улучшения центрирования полос калибровка профиля выполнена таким образом (рис. 160), что максимальная ширина полосы, задаваемой в каждый калибр, примерно равна ширине калибра на высоте, соответствующей половине толщины стенки. Это обеспечивает симметричную разрезку прямоугольной полосы и равномерное боковое обжатие в калибрах *2* и *4*. Применение выпусков калибров в диапазоне 4–9 % позволяет вести прокатку с полным заполнением калибров металлом без образования заусенцев в разъемах калибров валков. Формирование полок в калибрах *3* и *5* осуществляется без бокового обжатия. Так как применение интенсивного бокового обжатия полок приводит к увеличению

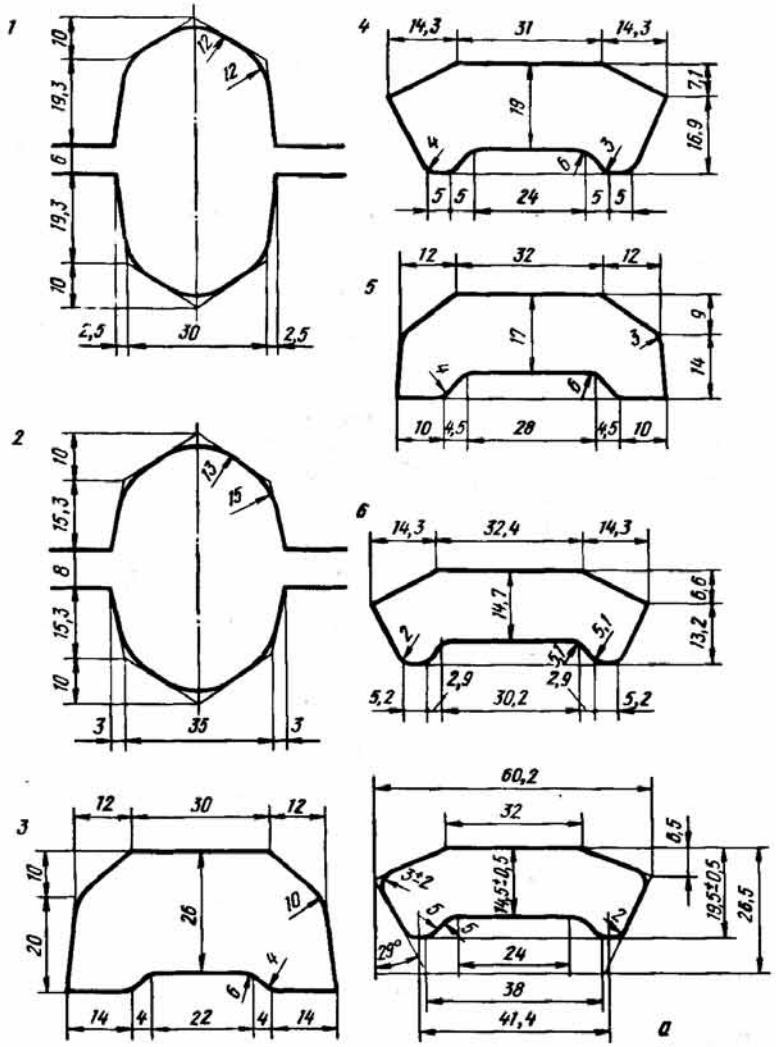


Рис. 164. Калибровка профиля рудничной накладки к рельсам типа Р-18 на шахматном стане 350 (исходное сечение 87×31 мм; *а* – готовый профиль)

их утяжки, то в калибрах *2* и *4* с открытыми ручьями коэффициенты деформации полок по толщине изменяются в пределах 1,09–1,12. Кроме того, незначительное боковое обжатие полок уменьшает возможность образования закатов.

Наибольшая неравномерность деформации предусмотрена в первых черновых калибрах, где коэффициенты высотной деформации по стенке изменяются в пределах 1,50–1,24.

Профили лапок-удержек размерами 85×29×25×5 мм и 85×34×25×5 мм, предназначенные для крепления рельсов к шпалам (наличие двух видов лапок-удержек связано с различием рельсов по массе) и изготавливаемые ранее путем

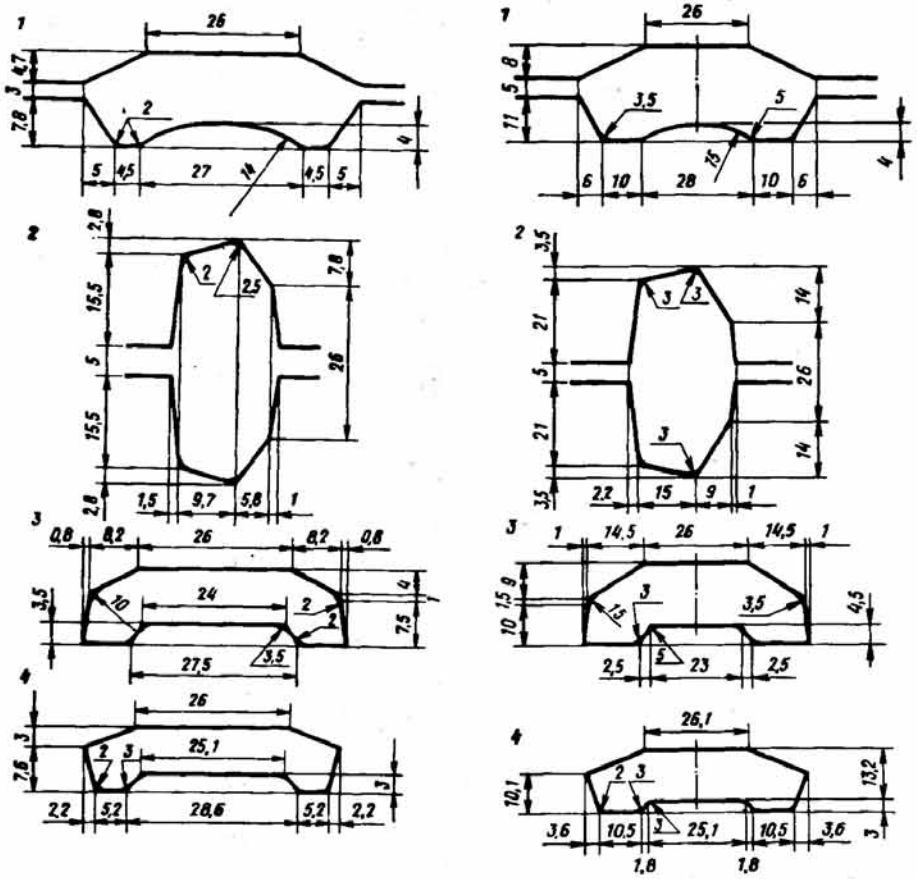


Рис. 165. Калибровка профиля накладки к рельсам Р-8 на линейном стане 330

Рис. 166. Калибровка профиля накладки к рельсам Р-11 на линейном стане 330

литья, освоены на линейном четырехклетевом стане 450 Кузнецкого металлургического комбината.

В целях исключения серповидности полос, сокращения парка валков и создания технологичности профили прокатывают (рис. 161) в сдвоенном виде. В дальнейшем по участку соединения их разрезают пополам (у потребителей).

Лезвие профилей получается разрезкой, начиная с калибра 1; в центральной части по лезвиям сдвоенного профиля коэффициенты высотной деформации приняты большими, чем на участках профиля толщиной 25 мм. Это сделано для четкого оформления лезвий и получения минимальной толщины их на участке соединения профилей. При прокатке лапок-удержек обязательным является получение и четкое выполнение различных по высоте (4 и 9 мм) выступов по кромкам профилей, которые при креплении рельсов заходят в специальные отверстия.

Калибровки профилей с утолщениями на краях приведены на рис. 162–176.

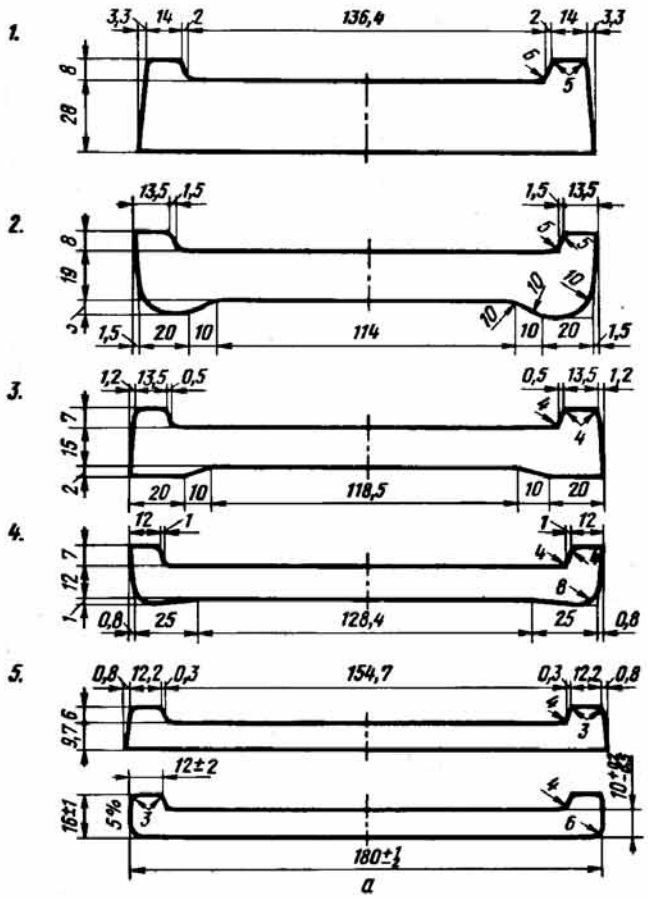


Рис. 167. Калибровка профиля низкокорытной стали для призабойных стоек трения на линейном стане 620 (исходное сечение 169×42 мм; *а* – готовый профиль)

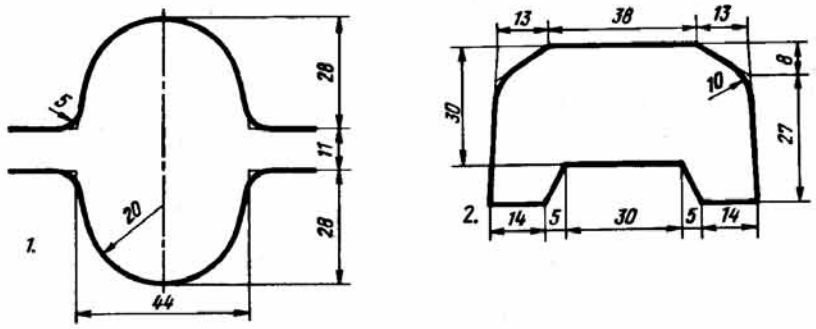
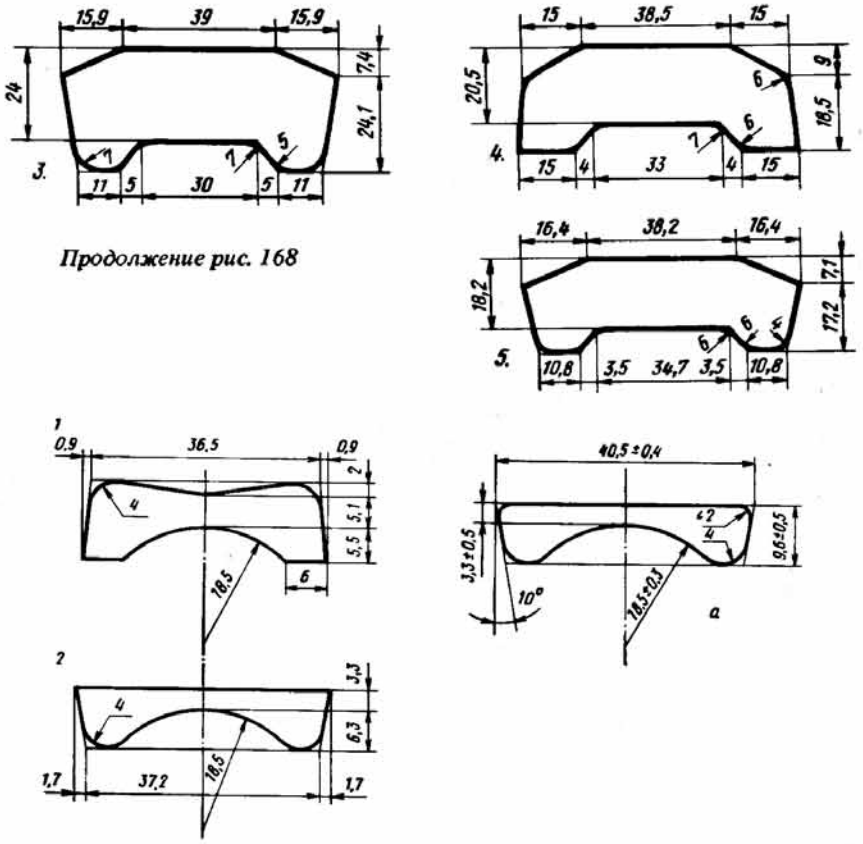


Рис. 168. Калибровка профиля накладки к рельсам Р-24 на шахматном стане 350



Продолжение рис. 168

Рис. 169. Калибровка профиля "башмак большой" на линейном стане 300 (исходное сечение 38×15 мм; *а* – готовый профиль)

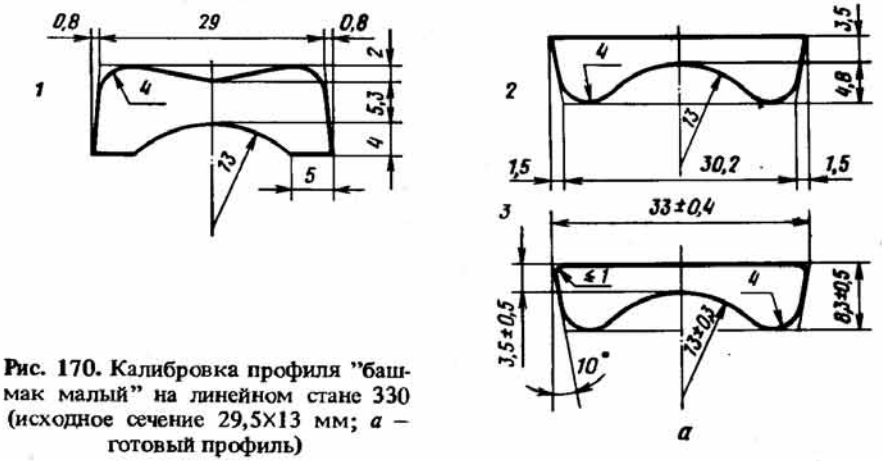


Рис. 170. Калибровка профиля "башмак малый" на линейном стане 330 (исходное сечение 29,5×13 мм; *а* – готовый профиль)

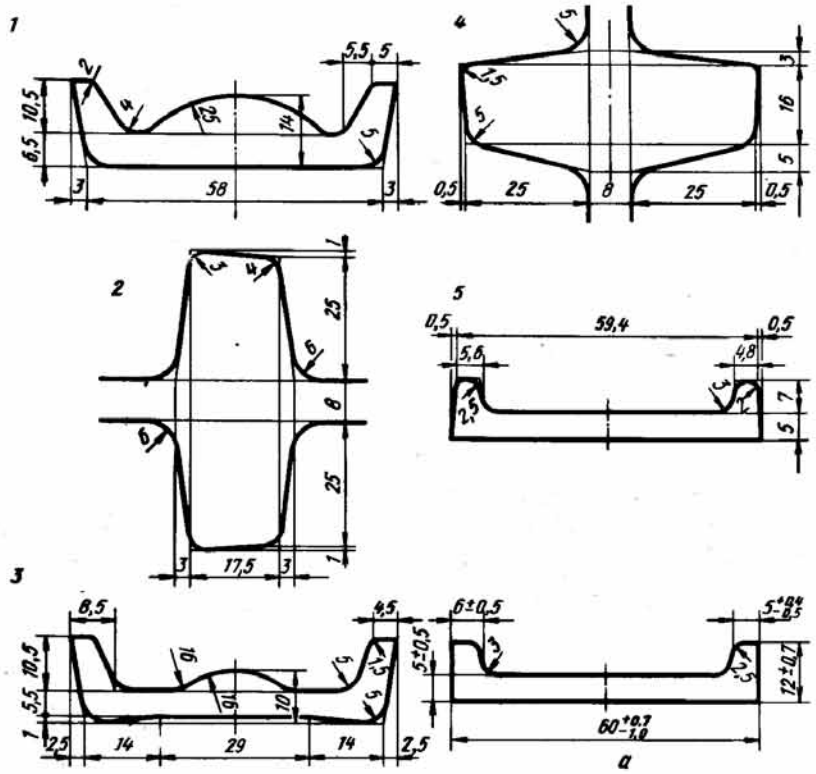


Рис. 171. Калибровка низкокорытного профиля на полунепрерывном стане 250 (исходное сечение 59×18 мм; *а* – готовый профиль)

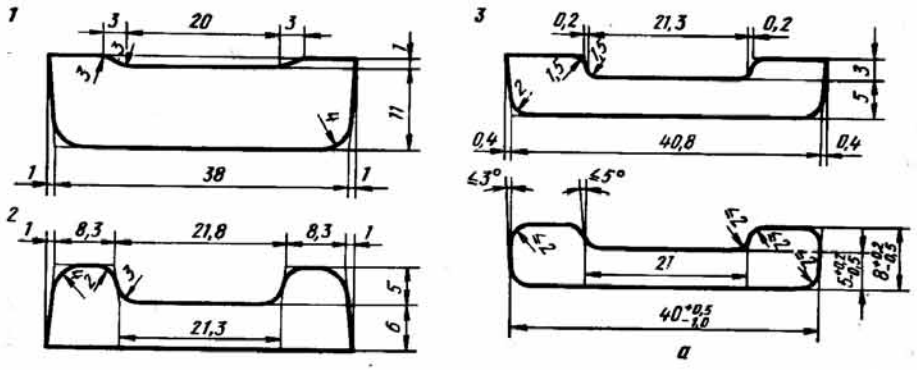


Рис. 172. Калибровка низкокорытного профиля сечением 40×8×5 мм на полунепрерывном стане 250 (исходное сечение – круг 28 мм; *а* – готовый профиль)

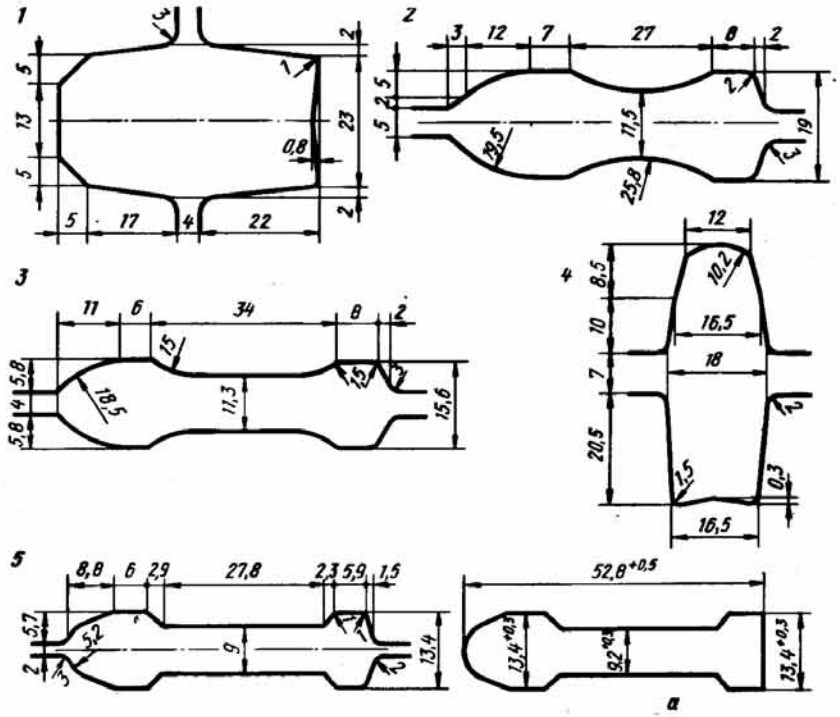


Рис. 173. Калибровка профиля сечением 52,8×13,4×9,2 мм на стане 300/280 (исходное сечение 60×22 мм; *а* – готовый профиль)

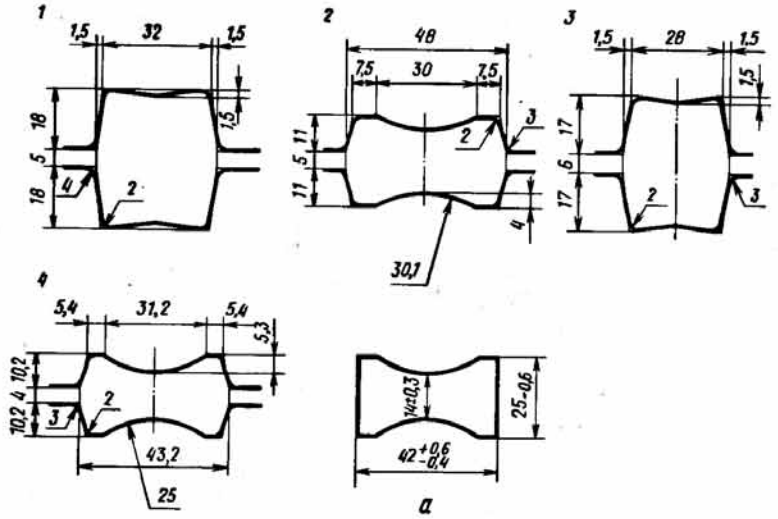


Рис. 174. Калибровка полосового двояковыгнутого профиля размером 42×25×14 мм на линейной стане 180 (исходное сечение 50×30 мм; *а* – готовый профиль)

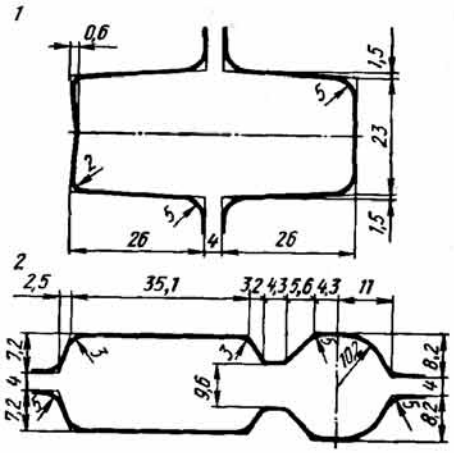


Рис. 175. Калибровка профиля размером 62,9×20,4×9,6 мм на стане 300 (исходное сечение 66×23 мм)

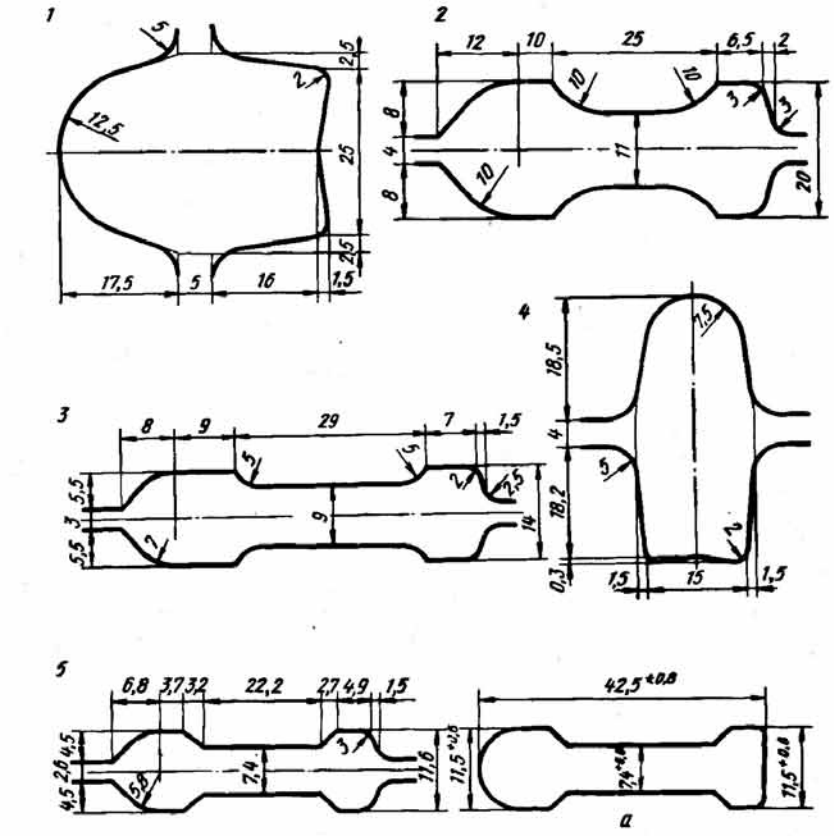


Рис. 176. Калибровка профиля размером 42,5×11,5×7,4 мм на полунепрерывном стане 300/280 (исходное сечение 70×22 мм; *а* – готовый профиль)

Глава 8.

ПОЛОСОБУЛЬБОВЫЕ ПРОФИЛИ И ПРОФИЛИ С УТОЛЩЕНИЯМИ НА КОНЦЕ

1. Технические требования и сортамент

Полособульбовые профили, прокатываемые из обыкновенных углеродистых и низколегированных конструкционных сталей, предназначены для судостроения и обычно характеризуются номером, который обозначает высоту профиля в сантиметрах.

Конструирование профилей в судостроении имеет важное значение, так как затраты количества стали на постройку корпуса корабля не только приводят к перерасходу металла, но и снижают эксплуатационные качества судна. Кроме рациональности сечения, следует обязательно учитывать те конструктивные свойства профиля в части прочности и жесткости, которые он приобретает после присоединения пояска в связи с приваркой его к листу.

Ранее при применении в судостроении клепаных конструкций в основном использовали швеллерные и углобульбовые профили, приклепываемые пояском к листу. При современной технологии изготовления сварных корпусов кораблей эти профили заменяются угловыми и полособульбовыми.

Прокат для судостроения, включая и полособульбовые профили, должен быть выполнен из хорошо свариваемой стали, не имеющей склонности к образованию трещин при низких температурах. Эта сталь должна по своему химическому составу, ударной вязкости при нормальных и низких температурах, удлинению и другим физико-механическим требованиям удовлетворять всем требованиям, предъявляемым в судостроении.

Полособульбовые профили прокатываются по ГОСТ 21937–76 (несимметричные профили) и ГОСТ 9335–76 (симметричные относительно горизонтальной оси).

ГОСТ 21937–76 включает полособульбовые Г-образные профили с высотой от 50 до 240 мм и толщиной от 4 до 14 мм. Профили с высотой 140 мм и более прокатываются двух типоразмеров, которые отличаются толщиной стенки, причем у второго типоразмера стенка толще на 2 мм. Утолщение на конце профиля обычно называют полкой или головкой.

ГОСТ 9235–76 включает тавровые полособульбовые профили:

нормальные симметричные полособульбовые профили облегченного типа (сортамент А) с высотой от 90 до 300 мм;

усиленные симметричные полособульбовые профили (сортамент Б) с высотой от 60 до 400 мм.

По ГОСТ 9235–76 все профили поставляются с тремя градациями по толщине для каждого номера. Как показывают исследования, применение симметричных полособульбовых профилей позволяет получить значительную экономию металла при изготовлении металлокон-

струкций в судостроении. Утолщения симметричного полособульбового профиля по аналогии с тавровой сталью называют полками.

Прокатка полособульбовой стали связана с определенными затруднениями, которые в основном обусловливаются большой разницей в толщине основных элементов (полок и стенки) и относительно малой толщиной стенки по сравнению с высотой профиля. В результате при прокатке наблюдается неустойчивое положение раската в валках и изгиб полос в вертикальной и горизонтальной плоскостях, сопровождающимися поломками проводок и оковыванием валков.

Основные виды дефектов полособульбовой стали: колебания размеров по ширине стенки, волнистость стенки и утолщение стенки и полок по сравнению с допускаемыми размерами.

2. Прокатка и калибровка полособульбовой стали

Методы прокатки и калибровки полособульбовой стали наиболее подробно разработаны Д.И. Старченко. При этом в процессе проектирования рациональной калибровки основные цели и задачи заключались в удовлетворении следующих требований:

устойчивость и интенсификация процесса прокатки и повышение производительности труда;

устойчивость формы и размеров профиля и улучшения технико-экономических показателей.

При прокатке симметричных и несимметричных полособульбовых профилей наибольшее распространение получили четыре основные схемы:

1. Калибровка с использованием обычных плоских закрытых калибров (рис. 177, *а*) по конструкции аналогичных полосовым калибрам, но с утолщением по месту образования полки (или полок).

2. Калибровка симметричных полособульбовых профилей с наклонным расположением всех калибров (рис. 177, *б*), за исключением чистового. Чистовой калибр выполняется закрытым по стенке и открытым по полкам с разъемом посередине. Иногда первоначальное формирование профиля осуществляется в тавровом ребровом калибре с задачей квадратной заготовки на диагональ.

3. Калибровка несимметричных полособульбовых профилей с изгибом стенки в черновых калибрах (рис. 177, *в*). Чистовой, а иногда и предчистовой калибры имеют горизонтальное расположение стенки. При этом в предчистовом калибре осуществляется контроль высоты полки. Эта схема представляет собой разновидность и в какой-то степени усовершенствование предыдущего варианта.

4. Калибровка, в которой все фасонные калибры, кроме чистового (а иногда и предчистового), имеют П-образную форму (рис. 177, *г*). Благодаря этому искусственно создается симметричность калибров относительно вертикальной оси и обеспечиваются достаточная устойчивость полосы в калибрах, прямолинейный выход полосы из валков и нормальные условия работы валковой арматуры. Разновидностью схемы является калибровка, в которой используется от 4 до 7 калибров П-образной формы в 2–3 последних по ходу прокатки плоских закрытых калибров.

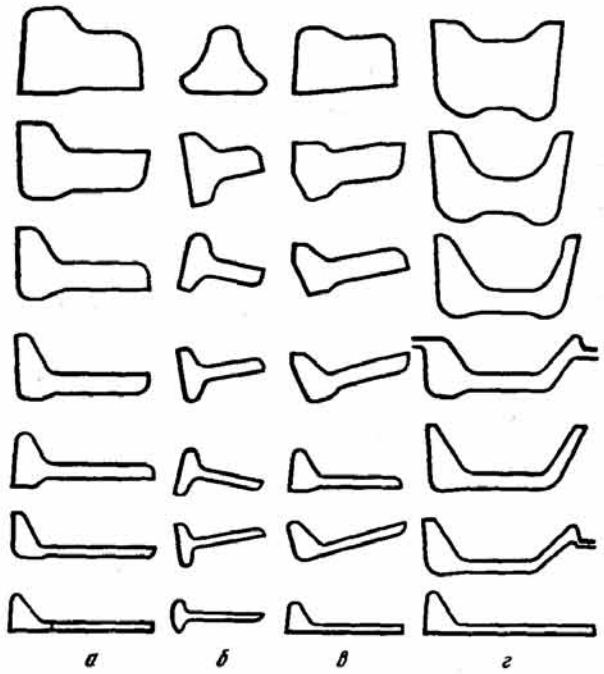


Рис. 177. Схемы калибровки полособульбовой стали

Как показывает опыт работы прокатных станов, наибольшие трудности возникают при применении для прокатки полособульбовых профилей, особенно малых размеров, полосовых калибров с горизонтальным расположением стенки. В этом случае наиболее резко выражена несимметричная по ширине раската неравномерная высотная деформация во всех калибрах. Вследствие этого при прокатке наблюдается серповидный изгиб в сторону полок и скручивание полос. При изгибе и скручивании положение проводок становится неустойчивым, происходит их выбивание, а в отдельных случаях и оковывание валков. В полособульбовых калибрах уклон боковых граней сравнительно небольшой и соответственно при переточках калибры плохо восстанавливаются по ширине. Возрастает расход валков . Кроме того, в полособульбовых калибрах затруднительно осуществлять надежный контроль ширины полос.

Дальнейшим совершенствованием схемы калибровки с горизонтальным расположением стенки профиля является применение косорасположенных калибров, которые обеспечивают достаточно надежный контроль ширины профиля путем стесненного уширения и хорошую восстанавливаемость при переточках валков. Первые по ходу прокатки один-два фасонных калибра могут иметь горизонтальное расположение

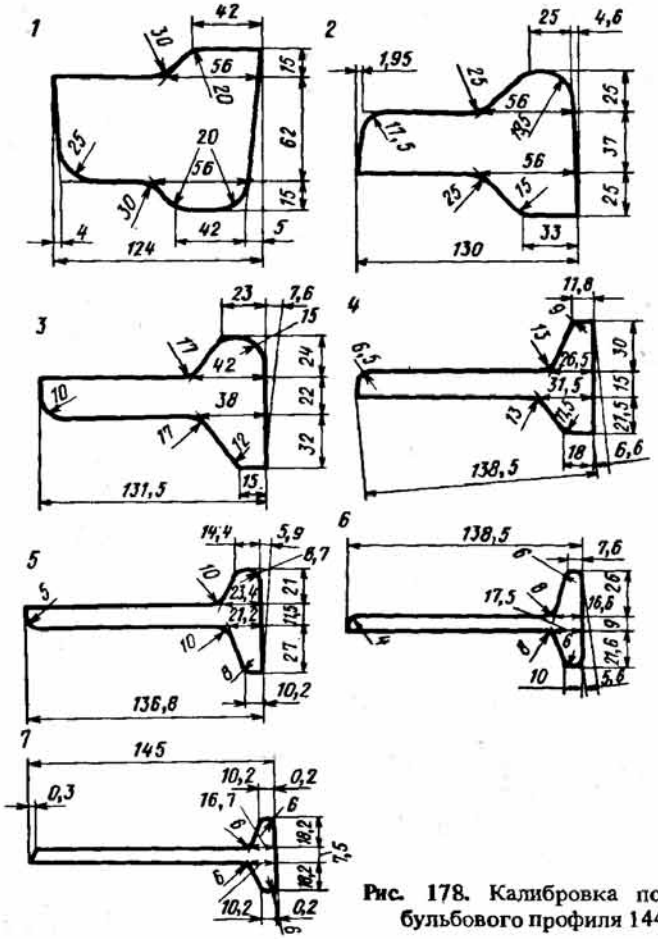


Рис. 178. Калибровка полособульбового профиля 1447

стенки. Хотя в этих калибрах и приходится принимать неравномерное обжатие отдельных элементов, однако высокая температура и пластичность металла допускает такой характер формоизменения и если и имеет место, то сравнительно небольшой изгиб полос. Кроме того, применение косорасположенных калибров позволяет использовать заготовку меньшей высоты.

Косая калибровка симметричных полособульбовых профилей применяется на крупносортном стане 620. Наклон стенки в первых восьми фасонных калибрах, включая предчистовой, относительно горизонтали составил от 5,0 до 28,5 %. Такое расположение калибров с чередованием открытых и закрытых элементов полок позволило обеспечить надежный контроль высоты полок и несколько уменьшить расход энергии. Для устранения серповидного изгиба полос применили массивные выводные линейки. Однако при этом на поверхности профиля обнаружены при прокатке риски, царапины, задиры и поэтому пришлось использовать роликовую выводную арматуру, устанавливаемую на линейках со стороны полок.

Симметричный полособульбовый профиль 1447 из стали Ст3сп и Ст5 освоен на стане 450 с расположением клетей в две линии. Обжимная трехвалковая клеть с валками диаметром 550 мм и длиной бочки 1800 мм, мощность привода 900 кВт, угловая скорость вращения валков 75 об/мин.

Вторая линия стана состоит из двух трехвалковых и одной двухвалковой клетей, диаметр валков 450 мм, мощность электродвигателя главного привода 1250 кВт, угловая скорость вращения валков 588 об/мин.

Калибровка валков для прокатки полособульбового профиля 1447 приведена на рис. 178. Калибры *1* и *2* выполнены закрытыми с горизонтальным расположением стенки. Обжатие по отдельным элементам неравномерное, вследствие чего при прокатке наблюдается незначительный серповидный изгиб в сторону полок. Эти калибры рассчитывали с учетом нормальных условий захвата, прочности валков и мощности главного привода. Калибры *3–6* выполнены косорасположенными, с диагональным разъемом и со стесненным уширением.

Для опытной прокатки разработаны два варианта чистового калибра с горизонтальным расположением стенки. По варианту *I* (рис. 178) калибр с разъемом посередине и свободным уширением стенки, по варианту *II* одна полка формируется в закрытом ручье, другая в открытом, то есть чистовой калибр балочного типа. Уширение стенки свободное.

Опытная прокатка профиля 1447 проходила нормально. В качестве исходной заготовки использовали сечения 110×86 и 94×94 мм. Захват в первых калибрах был удовлетворительный и надежный. Скручивания полос при устойчивом положении их (за исключением калибров *1* и *2*) не наблюдалось. Некоторое скручивание в калибрах *1* и *2* в сторону полок и незначительный серповидный изгиб не создавали никаких трудностей при прокатке в последующих калибрах.

В процессе освоения прокатки профиля 1447 проверили оба варианта чистового калибра. По варианту *I* на готовом профиле в месте разъема валков со стороны наружных граней полок образовывался ус, устранить который полностью оказалось невозможным, даже при точной установке вводной валковой арматуры. Поэтому в дальнейшем принята конструкция чистового калибра по варианту *II*.

Результаты проверки характера заполнения калибров по взятым при прокатке темплетам подтверждают хорошее совпадение расчетных данных с фактическими.

Калибровка полособульбовой стали с изгибом стенки не имеет существенных преимуществ по сравнению с калибровкой с наклонным расположением стенки и поэтому применяется сравнительно редко. На рис. 179 приведена калибровка несимметричного полособульбового профиля № 8 для линейного стана 400 с расположением клетей в две линии.

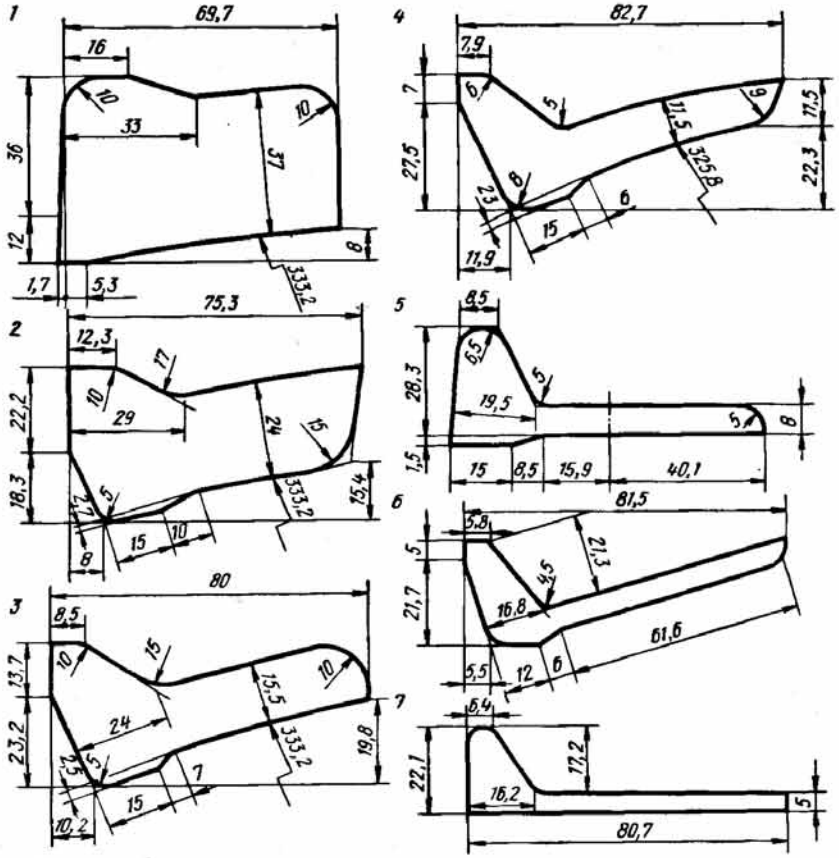


Рис. 179. Калибровка полособульбового профиля № 8

При прокатке профиля № 8 в течение длительного периода с использованием калибров с изогнутым полотном выявлены существенные недостатки этой схемы. При выходе полосы из валков происходил ее изгиб в сторону полок или винтообразное скручивание вокруг продольной оси. Все это вызывало выбивание проводок и оковывание валков, а также повышенный износ калибров по ширине и невыполнение размеров на готовом профиле. Так как регулировка высоты готового профиля могла быть осуществлена только за счет изменения исходного квадратного сечения, то часто приходилось работать с неполным заполнением калибров. Соответственно менялась высота готового профиля в процессе прокатки, а колебания ширины отдельных полос в пределах одной полосы достигали 3–5 мм. Брак при прокатке составлял 13 %, а производительность стана была в 1,5–2 раза меньше, чем при прокатке других симметричных профилей, прокатываемых на стане 400. Технологические простои превышали 12 %.

При переходе на прокатку профиля № 8 по схеме с П-образными

калибрами общее число фасонных калибров осталось прежним и равным семи. Поскольку при расчете калибровки не было необходимости в боковом обжатии в первых формирующих калибрах, то эти калибры выполнены с прямой стенкой и с разъемом сверху.

Ввиду того, что при прокатке вследствие большой разницы в катающих диаметрах валков происходили сильные удары, приводящие к поломкам шеек валков, вынуждены были перейти на использование чугунных валков высокой твердости с повышенным содержанием никеля, что резко увеличило стойкость чистового и предчистового калибров.

В результате освоения новой калибровки технологические простои уменьшились с 12,4 до 9,6 %, брак сократился с 13 до 3,6 % и производительность возросла на 11 %.

Наиболее рациональной с точки зрения технологичности и высоких технико-экономических показателей работы стана при прокатке полособульбовых профилей следует признать схему прокатки с использованием П-образных калибров, которая находит все большее распространение как для симметричных, так и для асимметричных полособульбовых профилей.

В то же время в зависимости от конкретных особенностей условий производства применяются и другие схемы прокатки, к которым в первую очередь относится прокатка полособульбовой симметричной стали с наклонным положением стенки.

3. Прокатка полособульбовой стали в сдвоенном виде

Прокатка полособульбовых, как и других несимметричных профилей, связана с существенными трудностями. Поэтому представляет интерес и имеет, безусловно, важное народнохозяйственное значение производство этих профилей в сдвоенном виде. Продольная разрезка сдвоенного профиля может производиться как у потребителя, так и непосредственно в процессе прокатки. В отечественном производстве накоплен уже значительный опыт прокатки в сдвоенном виде несимметричных относительно вертикальной оси профилей, в частности при прокатке замочных колец для колес автомобилей, профиля для полюсов рельсового тормоза и т.д.

При сдваивании симметричных относительно горизонтальной оси полособульбовых профилей сдвоенный профиль становится аналогичным по форме двутавровой балке, благодаря чему значительно улучшаются технологичность процесса прокатки, уменьшается брак и повышается производительность.

Однако при соотношениях толщины полок и стенки для полособульбовых профилей больших размеров по ГОСТ 9235–76 при прокатке этих профилей в сдвоенном виде возникает опасность получения волнистости полотна (стенки).

Дефект волнистости на рельсобалочном стане 800 впервые был обнаружен при освоении облегченных двутавровых балок № 45, 50 и

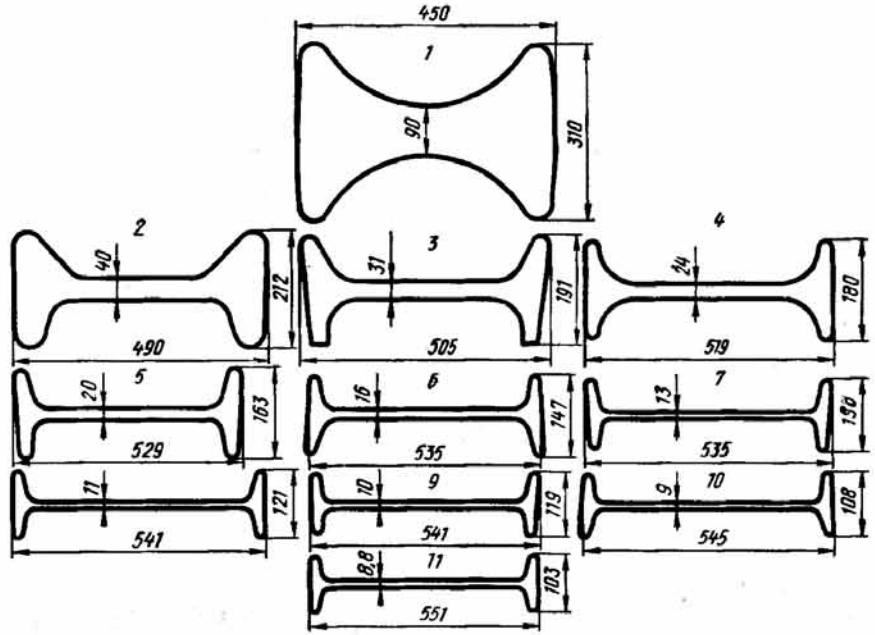


Рис. 180. Схема прокатки полособульбовой стали в сдвоенном виде

55. Причиной волнистости оказалось возникновение в стенке балок значительных сжимающих напряжений вследствие разницы температур полок и стенки, которая составляет в чистовом калибре 150–170 °С. При этом в результате исследований и наблюдений установлено, что критическое отношение толщины полок и стенки, при котором наблюдается волнистость, для балок № 45–55 находится в пределах 1,60–1,65.

Так как для осваиваемого на стане 800 сдвоенного полособульбового профиля № 2779 из стали 10ХСНД это соотношение составило 2,57 (что значительно больше критического), то взамен профиля № 2779 был предложен сдвоенный новый профиль СПБ 271010 по ТУ 14–2–9–72, в котором толщина полок существенно уменьшена. Сдвоенный профиль предусмотрено разделять у потребителя.

Для получения заготовки использовали имеющийся калибр на валках блюминга, предназначенный для прокатки балки № 50. Для уменьшения обжатия полок по высоте на рельсобалочном стане толщину стенки заготовки с блюминга уменьшили на 30 мм.

На реверсивной клети 900 в калибре *1* с разъемом посредине (рис. 180) осуществляется максимальное высотное обжатие и контроль ширины полок, благодаря чему исключается переполнение или незаполнение этих элементов в последующих калибрах балочного типа.

На трехклетевой линии 800 вследствие недостаточной длины бочки валков применили систему сопряженных балочных калибров, обеспечивающую размещение максимального числа калибров при данной длине бочки валков. Во всех калибрах линии 800, кроме чистового калибра, толщина стенки посередине меньше толщины у основания полок. Вследствие этого в чистовом калибре обжатие стенки от ее середины к полкам возрастает и в средней части стенки возникают растягивающие напряжения, исключающие возникновение волнистости.

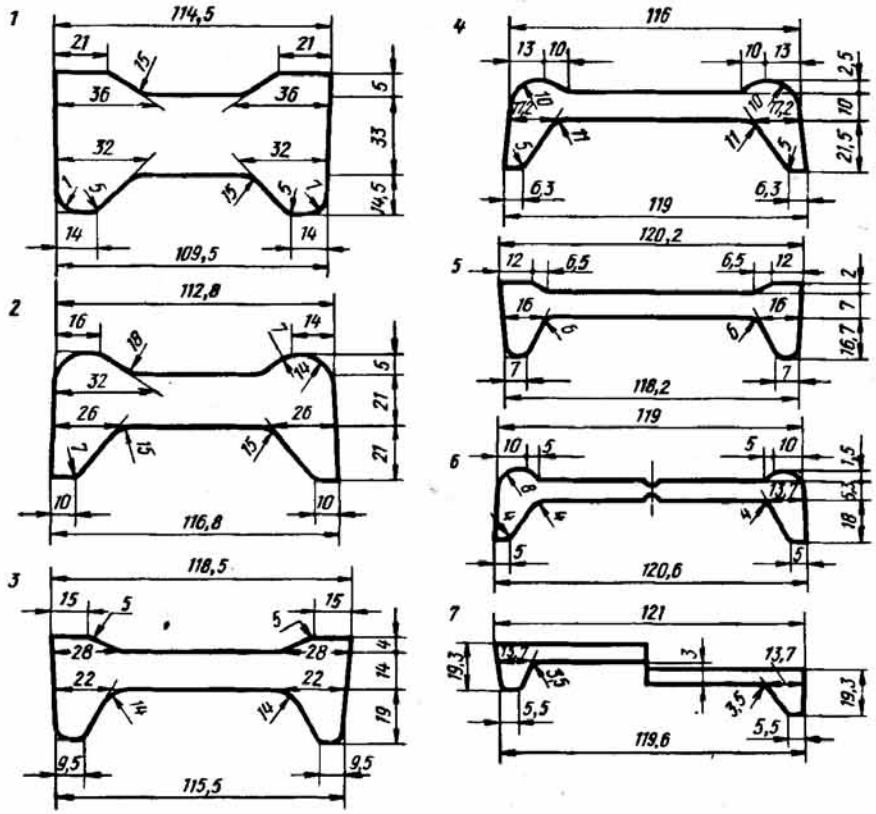


Рис. 181. Калибровка сдвоенного полособульбового профиля № 6

При опытной прокатке заполнение всех калибров было близким к расчетному. Волнистости стенки не наблюдалось. Нагрузки двигателей главных приводов не превышали допустимых. По внешнему виду, допускаемым отклонениям размеров и механическим свойствам прокатанный профиль соответствовал техническим условиям.

На стане 400 с расположением клетей в две линии были проведены опыты по прокатке сдвоенного полособульбового профиля № 6 из стали Ст4 с продольной разрезкой в валках чистовой клети.

На первом этапе исследований проверена возможность продольной разрезки в валках сдвоенного профиля на две части и выбран наиболее рациональный вариант конструкции предчистового (подготовка к разрезке) и чистового (разрезка) калибров (рис. 181).

Из возможных конструкций чистового калибра приняли калибр, в котором разрезка производится по принципу дисковых ножниц. В качестве предчистового предусмотрели калибры двух типов: вариант I – разрезка также по принципу дисковых ножниц, но с меньшим смещением правой и левой частей стенки по вертикали; вариант II – с образованием в середине стенки профиля с нижней и верхней сторон канавок размерами 4×1 мм.

Прокатка сдвоенного полособульбового профиля на стане 400 проводилась за 14 проходов из заготовки сечением 130×130 мм и длиной 1500 мм. После семи проходов в обжимной трехвалковой клети по общей для всего сортамента стана 400 калибровке полоса сечением 106×55 мм поступает на трехклетевую чистовую линию, в которой при прокатке сдвоенного профиля используются трехвалковые клети I и II. Температура конца прокатки 930–950 °С. Прокатаны были две промышленные партии массой 25 т и 60 т соответственно. В месте разрезки полос наблюдалось образование заусенцев, допустимый размер которых указан в технических условиях.

Проведенные исследования подтвердили возможность прокатки полособульбовых профилей с последующей разрезкой в валках чистовой клети. При соблюдении технологии кривизна и скручивание полос после разрезки не превышает предельно допустимые.

Величина образующихся при разрезке заусенцев зависит от способа подготовки полосы к разрезке, то есть от конструкции предчистового калибра, и от величины зазора между режущими кромками валков чистового калибра. Можно полагать, что при достаточной точности изготовления валков образование заусенцев можно свести к минимуму.

Износ калибров, включая и режущие кромки, не превышает износа при прокатке полос в одинарном виде.

4. Основные положения калибровки полособульбовой стали в П-образных калибрах

По Д.И. Старченко, калибровка полособульбовых профилей с использованием П-образных калибров (рис. 177, *г*) определяется двумя основными особенностями:

1. Все подготовительные калибры, включая и предчистовой, имеют П-образную (корытную) форму. Окончательное выпрямление полотна производится в чистовом калибре закрытого типа. Уширение стенки в чистовом калибре свободное.

2. Контроль высоты полок и ширины стенки осуществляется за счет их реброваго обжатия по крайней мере дважды: первый раз, как правило, в четвертом против хода прокатки калибре и во второй раз – по стенке в предчистовом калибре, а по полкам – в чистовом калибре.

Теория калибровки в П-образных калибрах обычно рассматривается применительно к несимметричной Г-образной полособульбовой стали по ГОСТ 9235–76. В то же время данная схема применяется и при прокатке симметричных полособульбовых профилей. Правда, в этом случае авторы называют калибровку корытнокосой, хотя сущность ее от этого вряд ли меняется. Кроме того, освоены калибровки симметричной полособульбовой стали, в которых используется в той или иной степени прокатка в П-образных калибрах.

При разработке калибровки несимметричных полособульбовых профилей рекомендуется в качестве исходного сечения, задаваемого в первый фасонный калибр, использовать квадрат. Сторона квадрата равна 2/3 высоты полособульбового профиля.

Для формирования профиля вполне достаточно 6 или 7 фасонных калибров, хотя число их в зависимости от конкретных условий может быть увеличено. Все калибры, за исключением чистового, выполняются П-образной формы и в большей или меньшей степени симметричными относительно вертикальной оси. Ребровое обжатие стенки осуществляется в двух контрольных калибрах, один из которых предчистовой. Благодаря этому достигается контроль и постоянство высоты готового профиля.

При прокатке несимметричной полособульбовой стали профиль в калибрах обычно располагают полкой вверх, что предохраняет полку от царапин и других повреждений при транспортировке полос по рольгангам или плитному настилу. В чистовых калибрах разъем выполняется снизу.

Чистовой калибр в валках может быть расположен двумя способами: с горизонтальной (рис. 182, *а*) или наклонной (рис. 182, *б*) стенкой. Монтаж чистового калибра в валках с горизонтальным расположением стенки имеет следующие существенные недостатки:

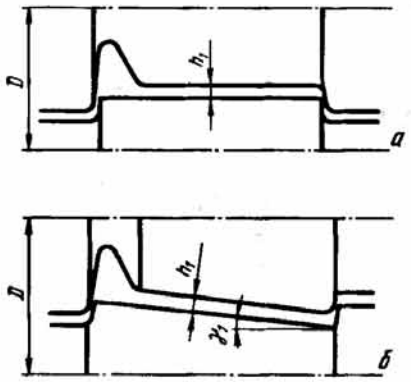
при расточке верхнего валка в значительной степени снимается отбеленный слой чугуна;

незначительный уклон (1–2 %) наружной грани полки, вследствие чего калибр не восстанавливается по ширине при переточках валков;

даже при небольшой степени стеснения стенки происходит защемление полосы в калибре и при выходе полосы из валков образуется волнистость по стенке профиля. Обычно волнистость не может быть устранена на правильных машинах и является причиной брака профиля.

Поскольку в рассматриваемой схеме желательно иметь повышенную износостойкость верхнего ручья чистового калибра на конце стенки по месту контакта предчистового раската в момент выпрямления стенки, то предложено наклонное (рис. 182, *б*) расположение чистового калибра. При этом рекомендуется принимать такой наклон стенки, чтобы место интенсивного износа верхнего валка на конце стенки смещалось на уровень бурта со стороны полки, то есть в область отбеленного слоя валка.

При наклонном расположении чистового калибра, кроме повышения износоустойчивости, существенно улучшаются условия работы калибра на участке полки профиля и исключается возможность защемления полосы.



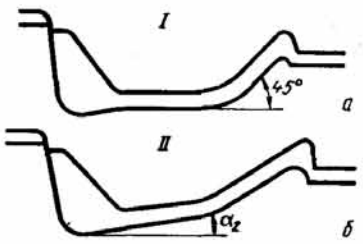


Рис. 182. Схема чистового полособульбового калибра с горизонтальным (*а*) и наклонным (*б*) расположением стенки

Рис. 183. Схема предчистового полособульбового калибра с горизонтальным (*а*) и наклонным (*б*) расположением стенки

Для калибровки полособульбовой стали в качестве предчистовых используются калибры двух типов, представленные на рис. 183. Разница между этими конструкциями калибров заключается в расположении примыкающего к полке элемента стенки профиля. Если в калибре типа *I* (рис. 183, *а*) этот элемент расположен горизонтально, то в калибре типа *II* (рис. 183, *б*) элемент, примыкающий к полке профиля, имеет наклонное положение. И в том, и в другом варианте предчистовой калибр имеет П-образную форму и по конфигурации напоминает швеллерные калибры.

Для предчистового калибра типа *I* угол отгиба конца стенки относительно горизонтали принимается равным 45°, а так как вертикальные проекции правой и левой частей калибра одинаковы, то определение ширины горизонтального участка стенки трудностей не вызывает.

При проектировании предчистового калибра типа *II* вначале полагают, что примыкающий к полке элемент стенки имеет такую же ширину, как и в калибре первого типа. Углы отгиба конца стенки (рис. 183, *б*) рекомендуется в зависимости от размера профиля принимать следующие: для профилей № 5–14 $\alpha_2 = 20^\circ$, для профилей № 16–27 $\alpha_2 = 15^\circ$. После того, как определен отогнутый участок стенки, переходят к расчету угла наклона, примыкающего к полке элемента стенки из условия равенства вертикальных проекций правой и левой частей профиля.

При расчете калибровки предчистовой и черновые калибры делятся на следующие элементы с более или менее одинаковыми условиями деформации: полка профиля с ложным фланцем; элемент стенки, примыкающий к полке; отогнутый конец стенки.

В предчистовых калибрах конфигурация полки выбирается таким образом, чтобы соблюдалось равенство вертикальных проекций правой и левой частей калибра. Тем самым уменьшается опасность возникновения осевых усилий и обеспечивается стабильность размеров и прямолинейный выход полосы из валков.

Для окончательного контроля ширины стенки предчистовой калибр со стороны конца стенки выполняется полузакрытым. Поэтому в чистовом калибре нет никакой необходимости ограничивать уширение стенки, что способствует более устойчивой работе стана и исключает образование дефектов (заусенцев) на конце полотна.

При проведении исследований в лабораторных и промышленных условиях установлено, что наиболее рациональным сочетанием при прокатке полособульбовой стали является применение чистового наклонного и предчистового П-образного калибров. В этом случае деформация изгиба стенки частично переносится с чистового калибра на предчистовой и износостойкость калибров повышается настолько существенно, что данная схема прокатки становится целесообразной для прокатки как самых крупных, так и самых малых размеров полособульбовой стали.

Следует отметить, что в производственных условиях испытаны и исследованы другие конструкции предчистовых калибров. Из изученных четырех типов калибров, включая рассмотренные ранее, наиболее несовершенным и поэтому не рекомендуемым для использования, является П-образный калибр полузакрытого типа как со стороны стенки, так и со стороны полки, и с углом отгиба конца полки, равным 60°.

Недостатки калибра этого типа заключаются в следующем:

1. Возможность образования лампаса в месте разъема калибра со стороны полки и последующим закатом его в чистовом калибре.

2. Образование на готовом профиле наплыва и вследствие этого заката на конце полотна по месту контакта раската из предчистового калибра с верхним валком чистового калибра.

3. Повышенный износ верхнего ручья чистового калибра в месте конца стенки в виде неглубокой полуовальной кольцевой канавки шириной 3–5 мм.

Испытан также предчистовой калибр с формированием полки в закрытом ручье и при угле отгиба стенки, равном 60°. В этом случае сохраняются все недостатки предыдущего калибра, связанные с большой величиной угла отгиба конца стенки.

Черновые калибры, а их используется обычно два или три, по конструкции аналогичны предчистовым и могут быть также двух типов. При этом как отмечалось выше, в четвертом против хода прокатки калибре обычно предусматривается контроль высоты полки и ширины стенки.

При прокатке полособульбовой стали с использованием П-образных калибров первоначально формируется профиль в двух разрезных ка-

либрах закрытого типа. Уклон боковых стенок этих калибров принимается достаточно большим и равен 10–15 % со стороны полки и 10–25 % со стороны стенки. Вследствие повышенного уклона в разрезных калибрах возможно полностью ограничивать уширение или же предусматривать вынужденное уширение, если по условиям работы стана нет заготовки необходимого сечения.

В общем случае целесообразно для лучшего заполнения калибра и повышения коэффициента вытяжки частично ограничивать уширение. Из опыта прокатки полособульбовых профилей следует, что суммарное (ограниченное) уширение в разрезных калибрах можно принимать в пределах 5–8 % от ширины примыкающего к полке элемента стенки в следующем за разрезными калибре.

Методика расчета калибровки полособульбовых профилей с использованием П-образных калибров подробно разработана Д.И. Старченко.

5. Освоение профилей с утолщениями на конце

На крупносортном стане 550 освоено производство симметричных и несимметричных полособульбовых профилей. Стан 550 состоит из пяти клетей, первая (обжимная) и вторая (черновая) трехвалковые клети открытого типа с валками диаметром 570 мм и длиной бочки 1600 мм и 1500 мм соответственно; клети *III, IV,V* – двухвалковые открытого типа с диаметром валков 580 мм и длиной бочки 1000 мм.

Исходная заготовка сечением 150×150 мм и длиной 1500 мм нагревается в трехзонной методической печи с боковой выдачей. Производительность печи 40 т/ч. Резка полос проводится на двух пилах салазкового типа. После охлаждения предусмотрена правка полос на семироликовой правильной машине консольного типа. Скорость правки 0,8 м/с.

На стане 550 освоено производство:

несимметричных полособульбовых профилей № 12, 14а и 14б по ГОСТ 21937–76 с высотой 120 и 140 мм и толщиной 6,5 мм, 7 мм и 9 мм соответственно;

симметричных полособульбовых профилей № 1235, 1446 и 1646 по ГОСТ 9235–76.

На рис. 184 приведена калибровка профиля № 12. Преимущества этой калибровки заключаются в том, что достигается симметричность калибров и получаемого в них раската относительно вертикальной оси и обеспечивается достаточно устойчивое положение его в калибрах. Кроме того, осуществляется надежный контроль ширины стенки в калибре *5* и предчистовом калибре *7* и высоты полки в калибрах *5* и *8*.

Во всех подготовительных корытных калибрах *1–4*, предшествующих первому контрольному калибру *5*, при формировании раската предусматривается свободное уширение полки и стенки. Вследствие этого принят интенсивный режим деформации по всем элементам полосы и в особенности по стенке. Свободное уширение предусматривается также в калибрах *6* и *8*.

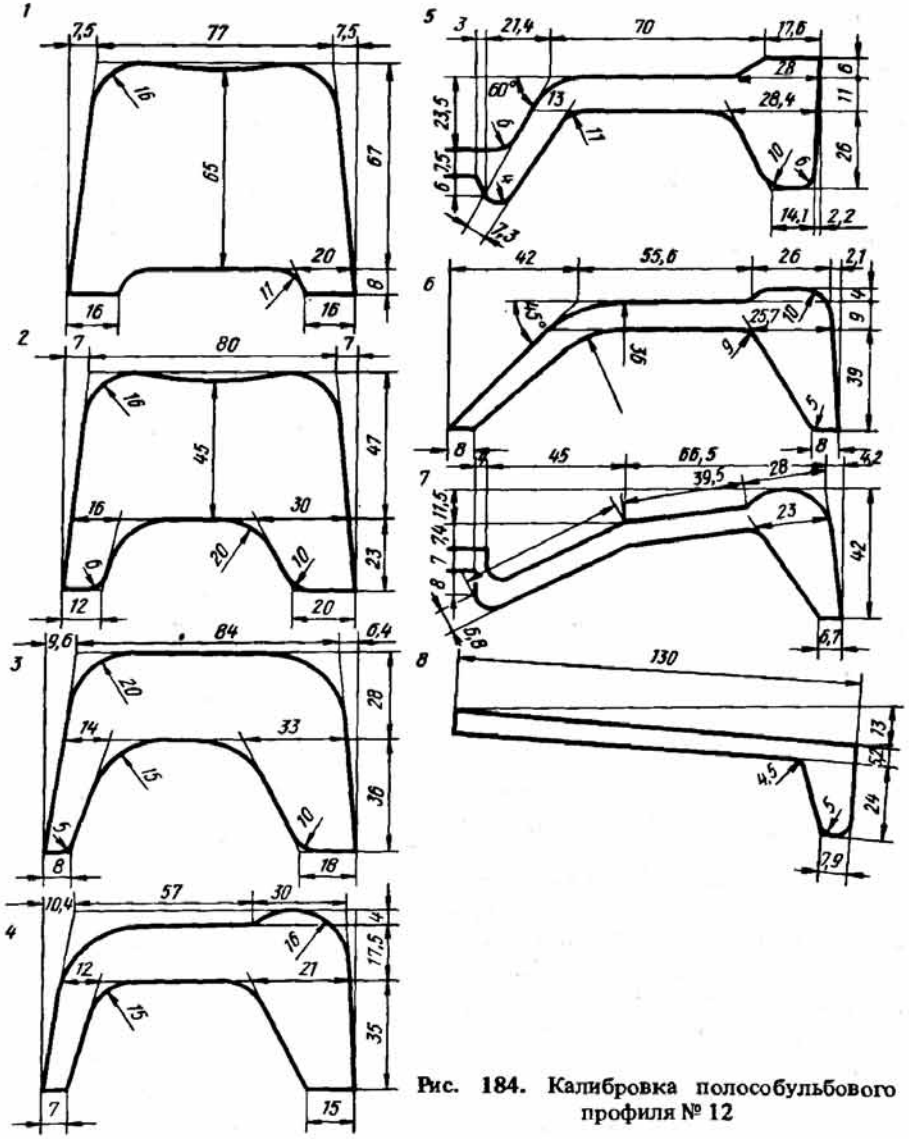


Рис. 184. Калибровка полособульбового профиля № 12

В разработанной калибровке наиболее резко выраженную П-образную форму имеют первые по ходу прокатки калибры *1–4*, предназначенные для интенсивного обжатия середины полосы и формирования отогнутого элемента стенки. В последующих калибрах отогнутый элемент стенки постепенно отгибается и деформируется по толщине с таким расчетом, чтобы в предчистовом калибре *7* получить стенку без значительного перегиба. Благодаря постепенному выпрямлению стенки обеспечивается достаточно высокая износостойкость калибров.

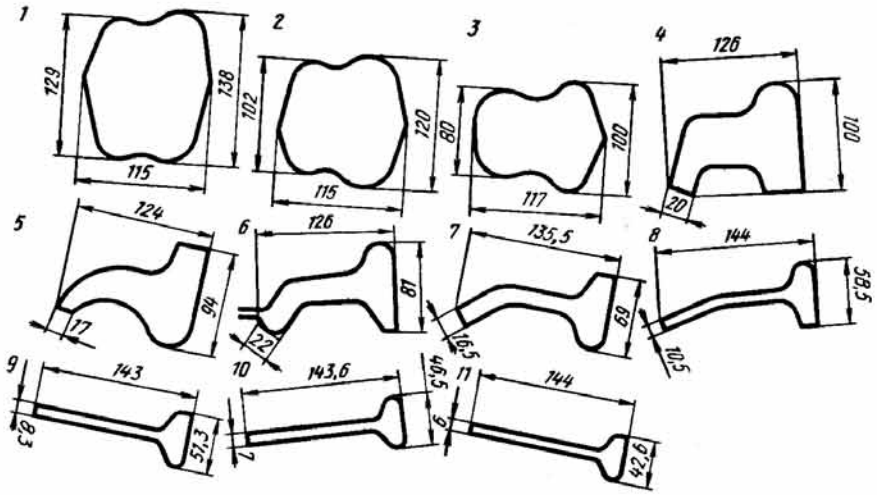


Рис. 185. Схема прокатки симметричного полособульбового профиля № 1446

На основании опыта прокатки могут быть рекомендованы следующие углы отгиба конца стенки: калибр *4* – 75–80°, калибр *5* – 60°, калибр *6* – 45°, калибр *7* – 12–20°. При освоении на стане 550 симметричных полособульбовых профилей за основу принята схема калибровки, применяемая для асимметричной полособульбовой стали.

Опыт прокатки подтвердил преимущества П-образной формы, калибров, заключающиеся в устойчивости раската при прокатке, возможности интенсивной деформации по всем элементам профиля и хорошей восстанавливаемости калибров при переточках валков.

В то же время при промышленном производстве на стане 550 асимметричных полособульбовых профилей выявился существенный недостаток данной схемы, заключающийся в переполнении контрольного предчистового калибра на конце стенки и последующим образованием заката в чистовом калибре.

Поэтому для прокатки симметричных полособульбовых профилей была принята (рис. 185) комбинированная схема калибровки со стесненным уширением в трех последних по ходу прокатки калибрах.

При прокатке профиля № 1446 применяется, как и обычно, заготовка сечением 150×150 мм. Общее число проходов 13. Начиная уже с третьего прохода (калибр *1*) формируется профиль. Для более равномерного износа валков и лучшей восстанавливаемости при переточках П-образные калибры *4–8* выполнены с косым расположением.

В калибрах *7, 8* применена схема с изгибом стенки и со стесненным уширением, что обеспечивает надежный контроль ширины стенки.

Калибры *4–11* выполнены с уклоном от 5°20′ до 6° относительно горизонтали и с уклоном боковых стенок калибров до 10 %. Такая конструкция калибров обеспечивает перпендикулярность стенки относительно полок, надежный вход и выход полосы из валков, нормальные условия работы валковой арматуры и хорошую восстанавливаемость калибров при переточках.

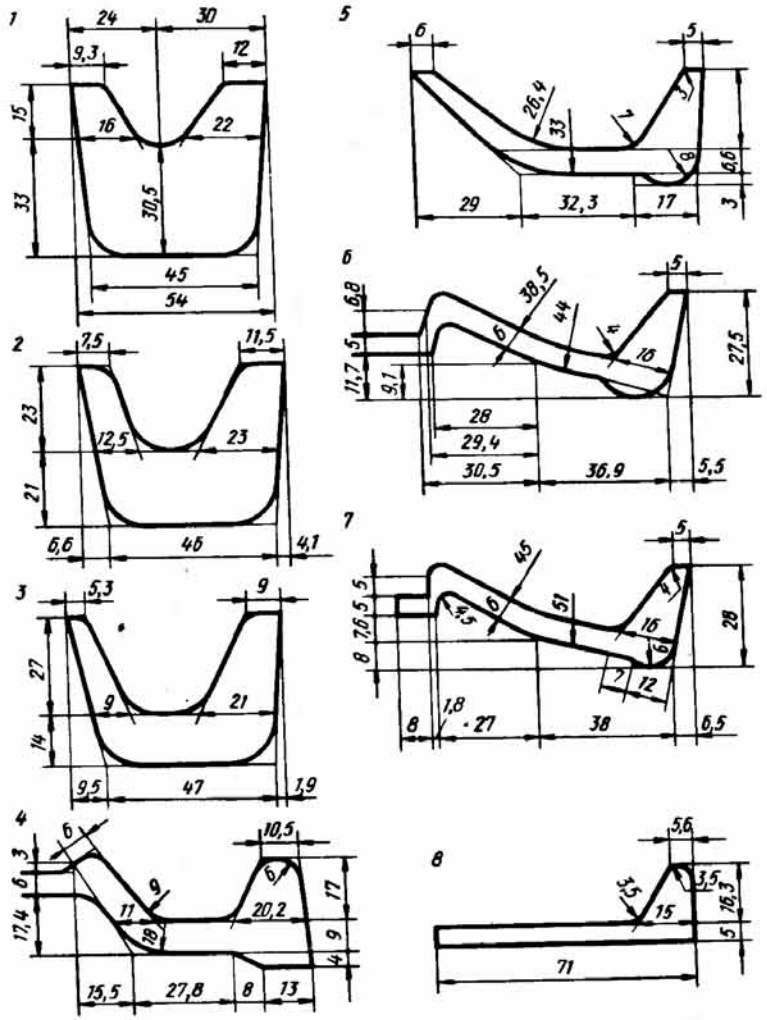


Рис. 186. Калибровка полособульбового профиля № 7

При освоении профиля № 1446 наблюдался неудовлетворительный захват в формирующем фасонном калибре *1* обжимной клети, что нарушало устойчивость процесса. Кроме того, имело место незаполнение открытой полки в чистовом калибре и несимметричность полок на готовом профиле в пределах 1,5–2,0 мм.

При корректировке калибровки изменили форму первых фасонных калибров, что существенно улучшило условия захвата. Для достижения симметрии полок и обеспечения устойчивых размеров профиля на

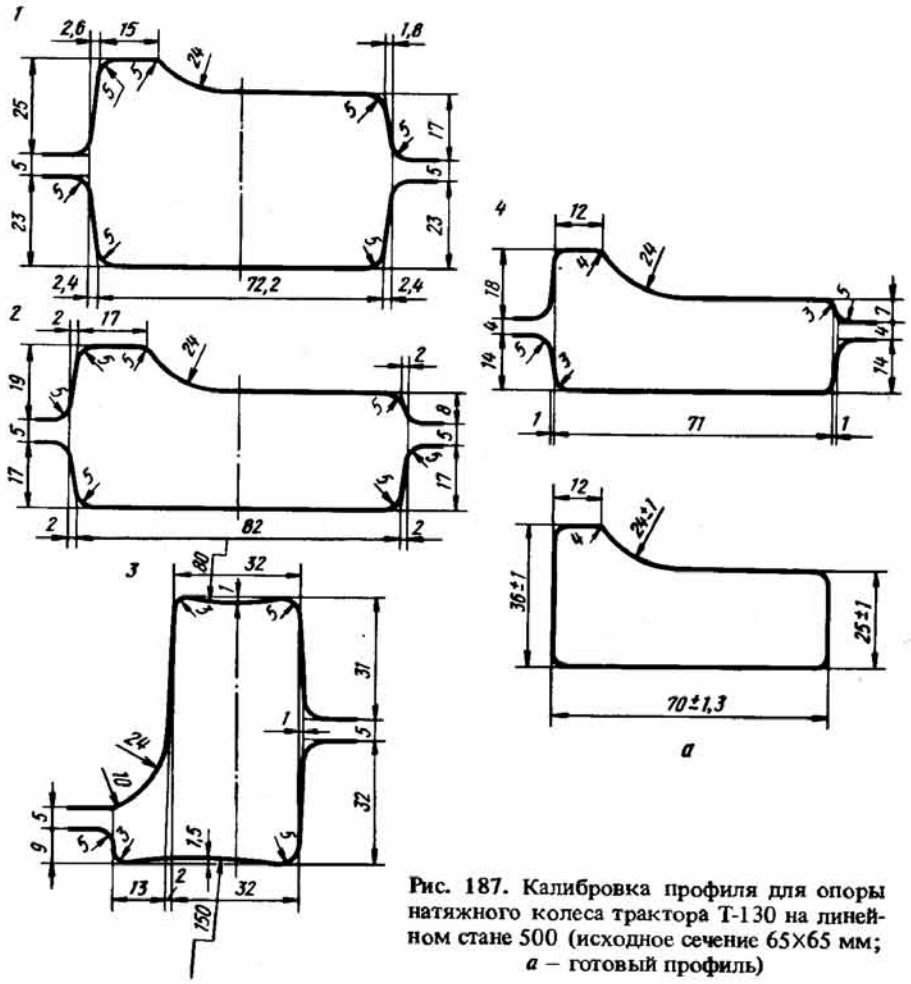


Рис. 187. Калибровка профиля для опоры натяжного колеса трактора Т-130 на линейном стане 500 (исходное сечение 65×65 мм; *а* – готовый профиль)

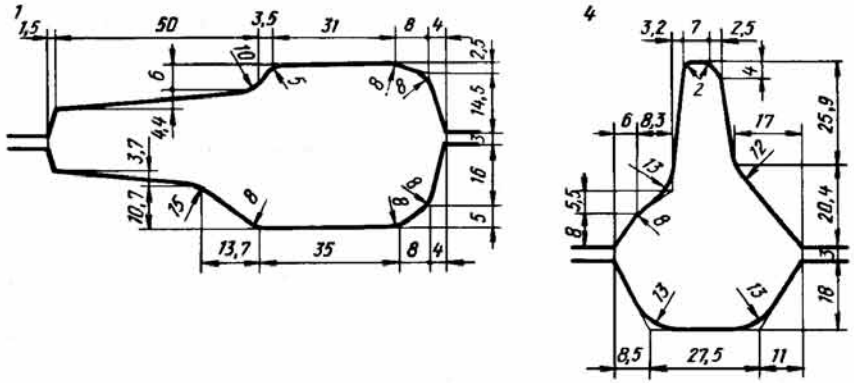
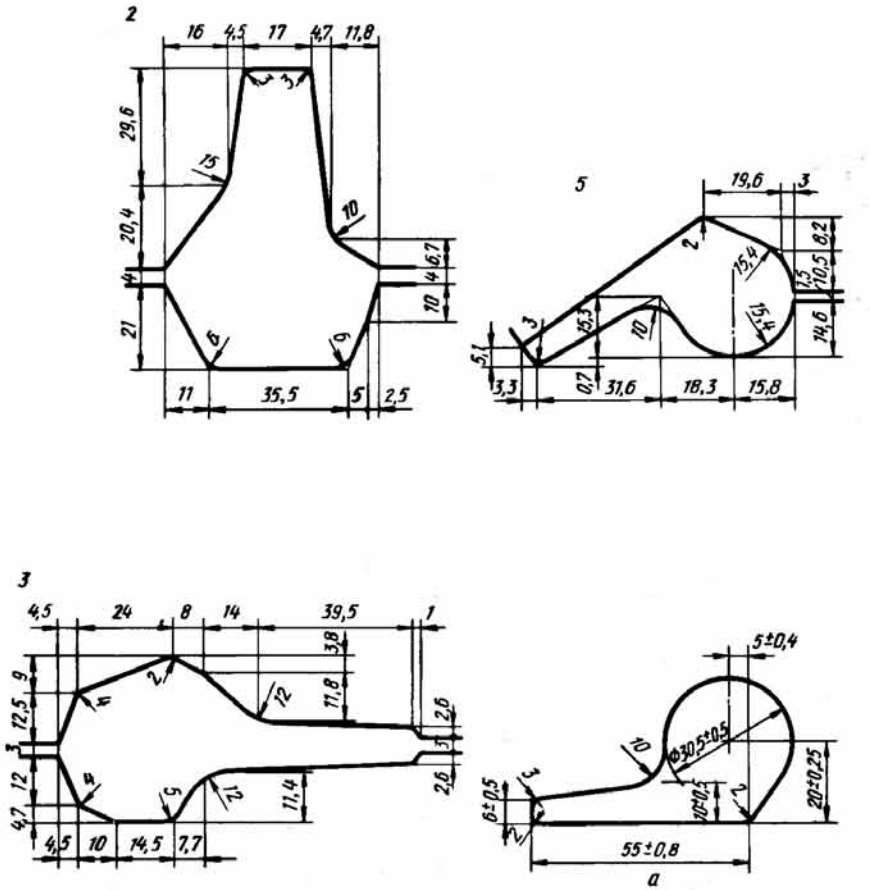


Рис. 188. Калибровка шарнирного профиля № 2556 на стане 300 (исходное сечение 83×45 мм; *а* – готовый профиль)



Продолжение рис. 188

валках черновой клети предусмотрели опорные конусы, что полностью устранило осевое смещение валков.

На станах 350 и 400 с широким сортаментом симметричных и асимметричных полособульбовых профилей был осуществлен переход на прокатку полособульбовых профилей с использованием П-образных калибров. Во всех калибровках первоначальное формирование профиля осуществляется из квадратной заготовки со стороной квадрата, равной 2/3 высоты профиля. При переходе на новые схемы прокатки значительно увеличилась производительность, снизился брак и улучшилось качество.

Калибровка полособульбового профиля № 7 для стана 350 приведена на рис. 186.

На рис. 187–196 приведены калибровки полособульбовых профилей и профилей с утолщениями на конце.

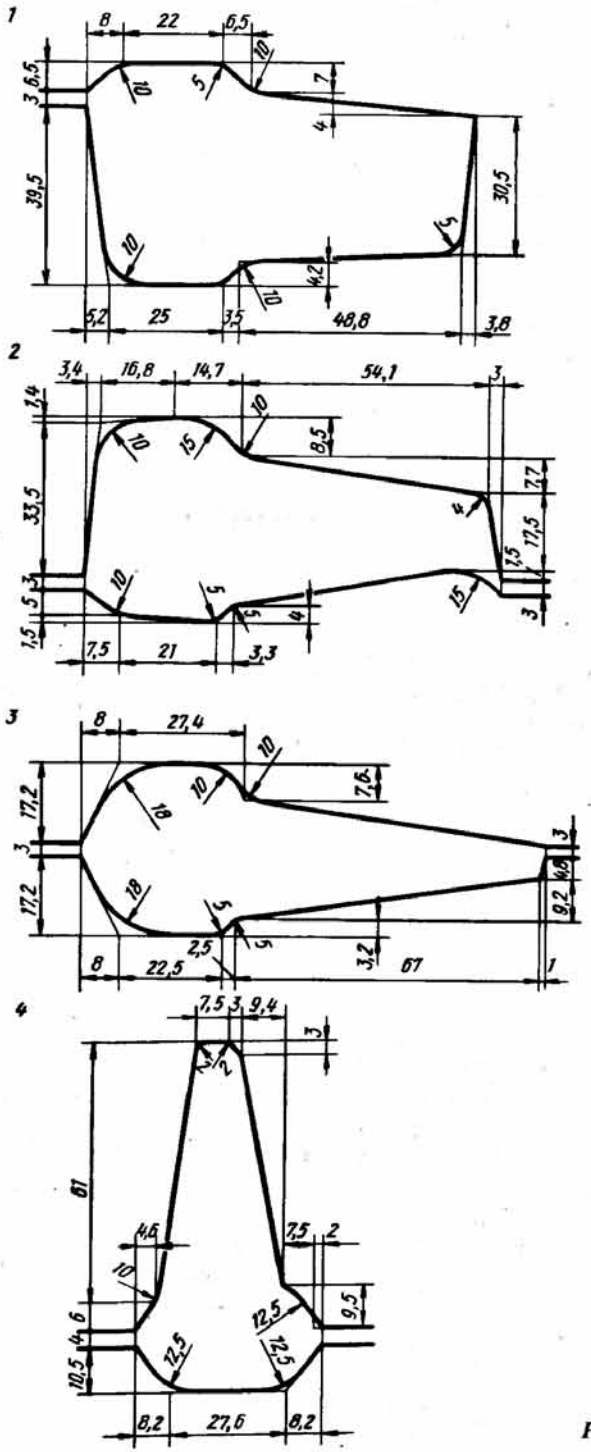


Рис. 189

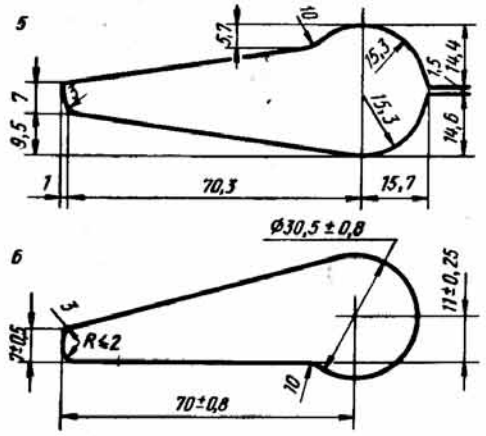


Рис. 189. Калибровка шарнирного профиля № 2558 на стане 300 (исходное сечение 76×53 мм; *а* – готовый профиль)

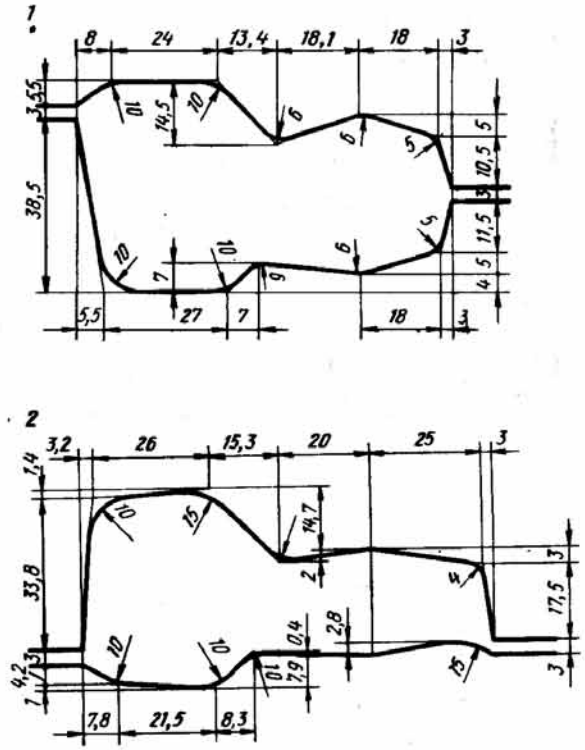
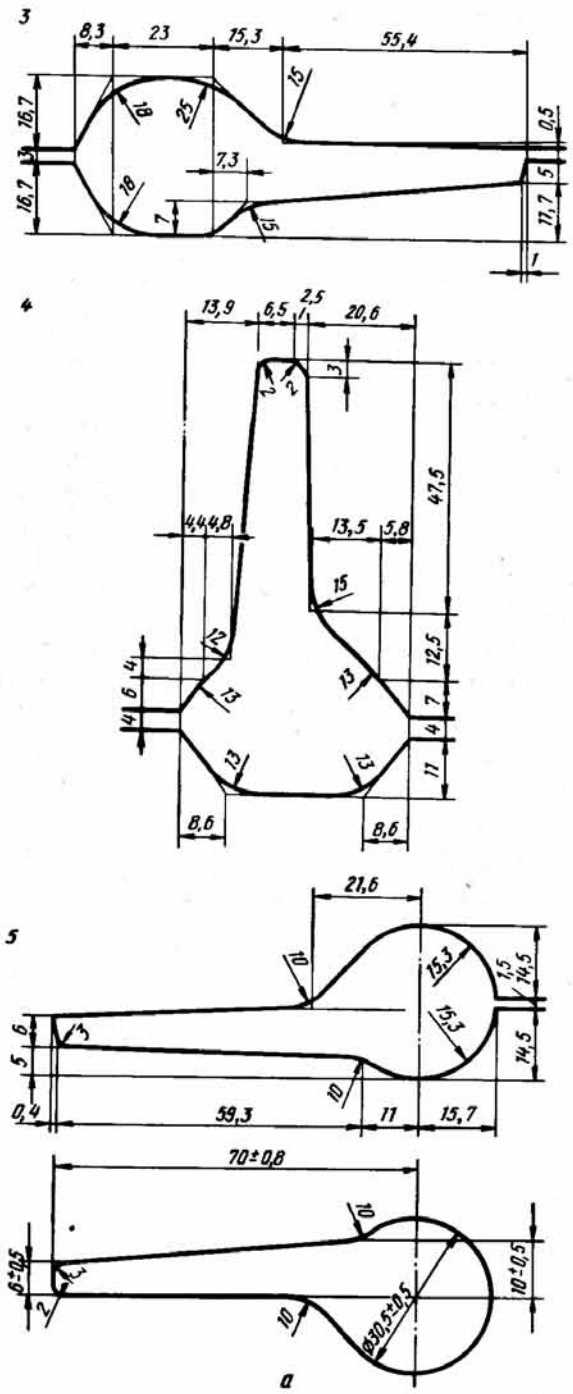


Рис. 190. Калибровка шарнирного профиля № 2557 на стане 300 (исходное сечение 70×50; *а* – готовый профиль)



Продолжение рис. 190

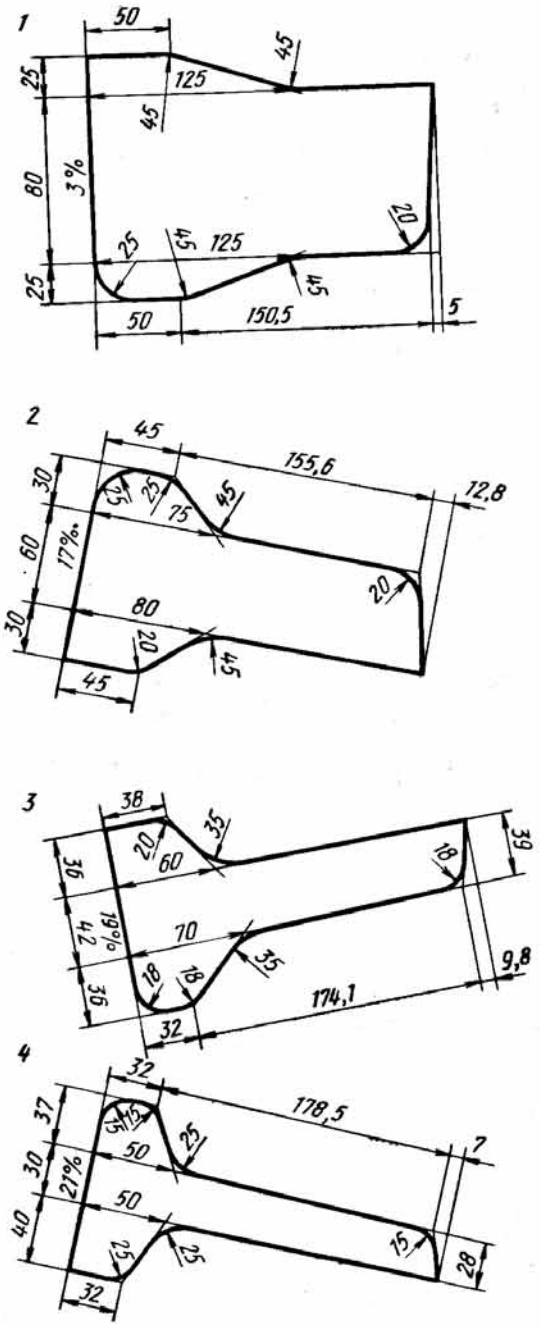
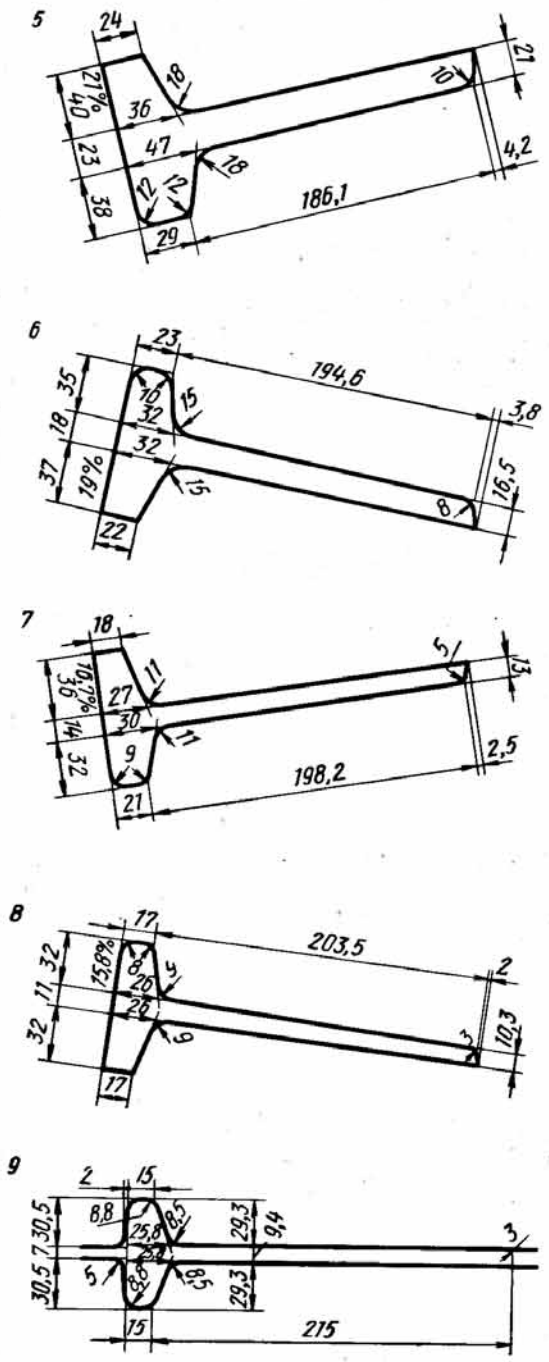


Рис. 191. Калибровка полособульба симметричного № 22610 для судостроения на линейном стане 620



Продолжение рис. 191

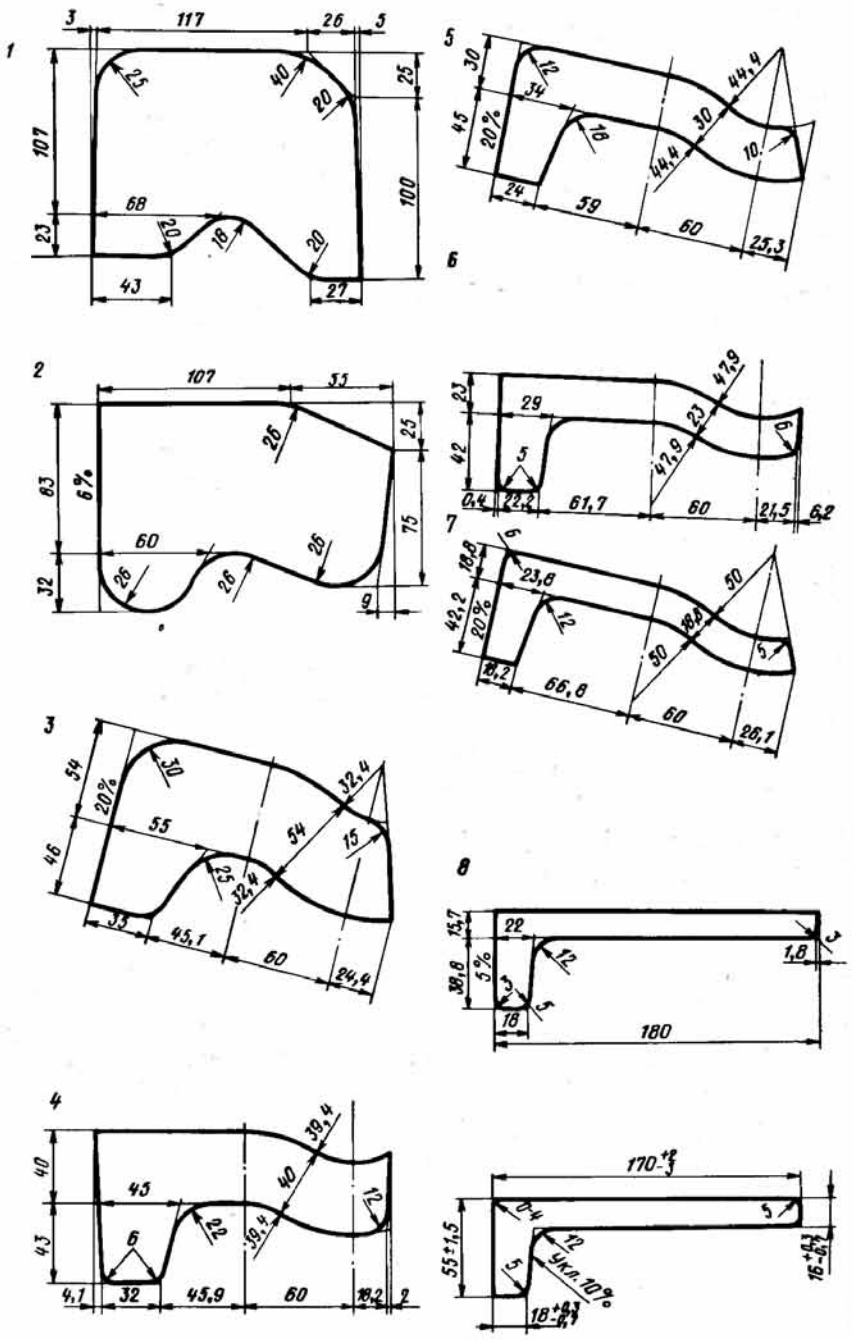


Рис. 192. Калибровка профиля угловой стали для захватов направляющей угольного комбайна на линейном стане 620 (исходное сечение 150×145 мм; *а* – готовый профиль)

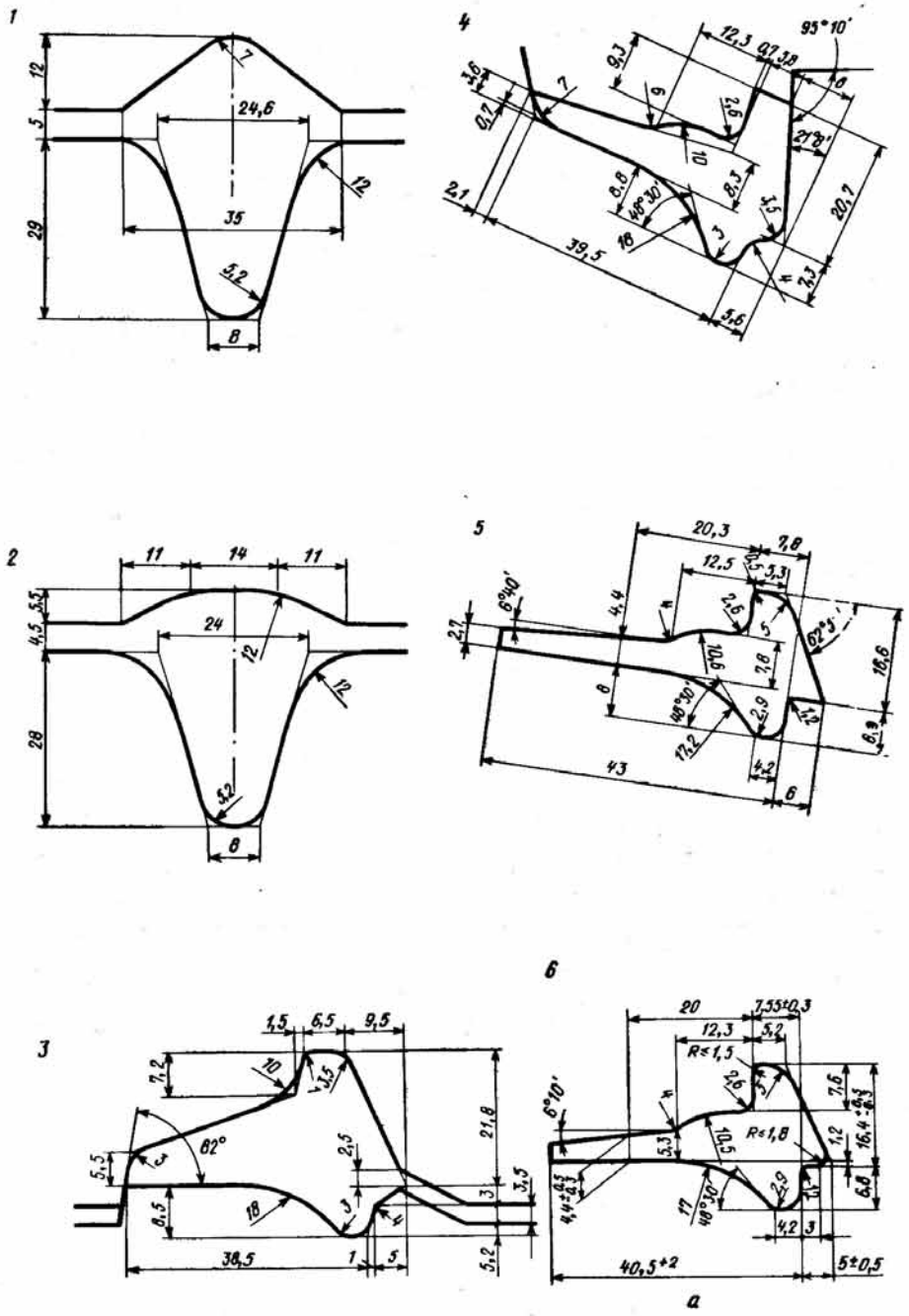


Рис. 193. Калибровка профиля для замочного кольца колеса автомобиля КамАЗ на линейном стане 280 (исходное сечение – ромб 60×29 мм; *а* – готовый профиль)

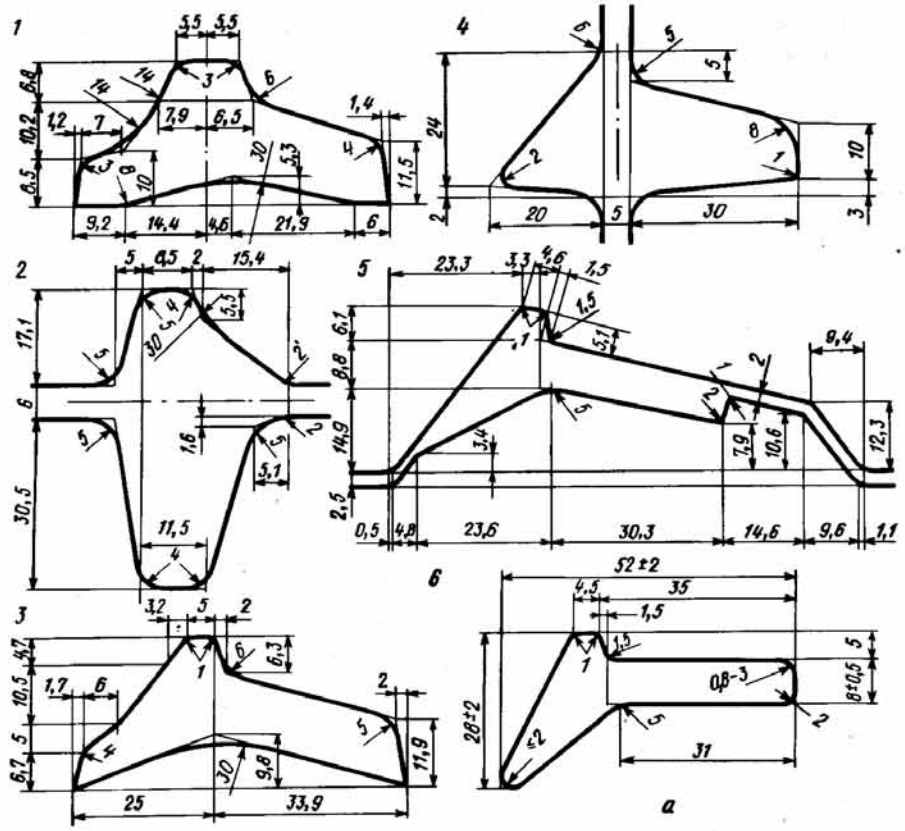


Рис. 194. Калибровка профиля ножа для торфяных шнеков на полунепрерывном стане 250 (исходное сечение 54×26 мм; *а* – готовый профиль)

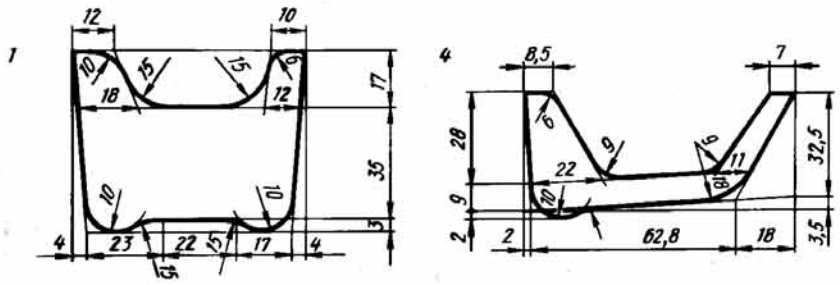
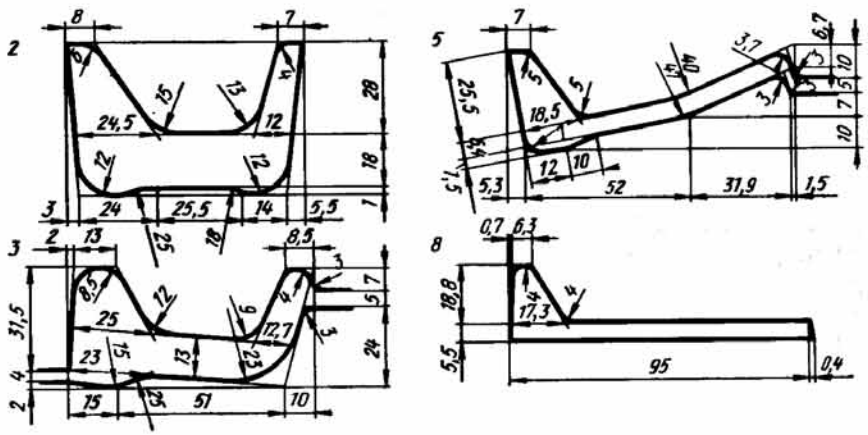


Рис. 195. Калибровка профиля полособульба несимметричного № 9 для судостроения на линейном стане 400



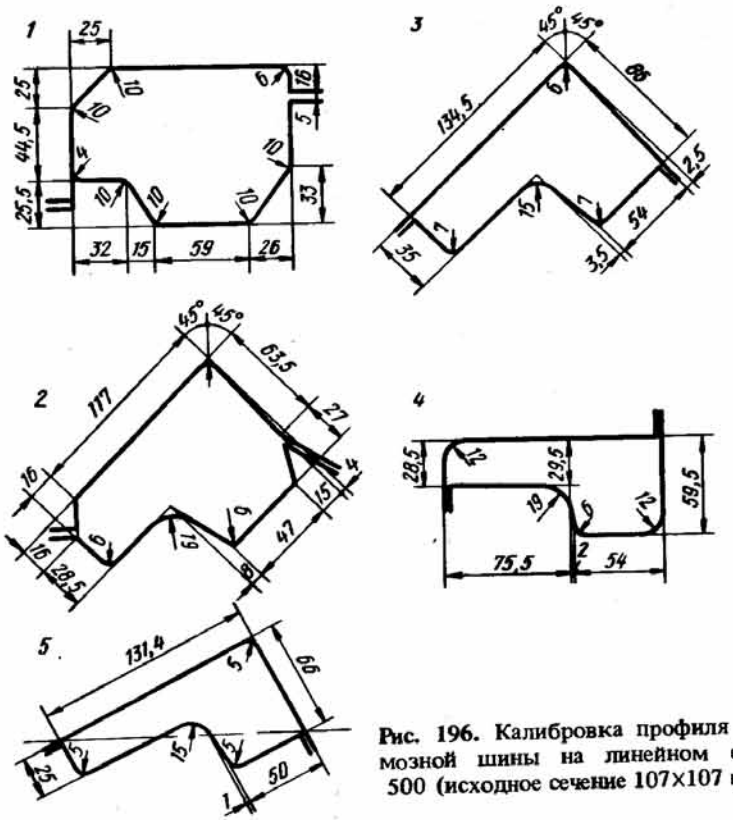


Рис. 196. Калибровка профиля тормозной шины на линейном стане 500 (исходное сечение 107×107 мм)

Глава 9.

ПРОФИЛИ С РЕБРАМИ ЖЕСТКОСТИ

1. Сортамент и схемы прокатки

Сортамент профилей с ребрами жесткости по технологической классификации (см. рис. 1) включает [1] полосовые одногребневые асимметричные профили (группа 12) и двух- и многогребневые полосовые профили (группа 13).

Одногребневые полосовые асимметричные профили в сечении имеют вытянутую прямоугольную форму. Иногда прямоугольная часть заканчивается с одной стороны изогнутым участком. Продолжением полки в противоположном направлении является малая полка. Перпендикулярно к ним расположено вертикальное ребро (шпора) трапециевидной формы.

Двух- и многогребневые профили представляют собой полотно с двумя и более ребрами (выступами), расположенными чаще всего с одной стороны полотна. Наружные и внутренние (между ребрами) участки полотна могут быть прямыми или наклонными. В большинстве случаев ребра расположены перпендикулярно к полотну и имеют трапециевидную форму. Имеются профили, у которых одно или оба ребра и наружные части полотна имеют изогнутую форму. Профили данного типа (с вертикальной осью симметрии и асимметричные) находят широкое применение при изготовлении подкладок к железнодорожным рельсам и в тракторной промышленности в качестве гусеничных траков.

При прокатке одногребневых профилей в основном применяют две схемы:

а) прокатка в открытых или закрытых калибрах без кантовки полосы;

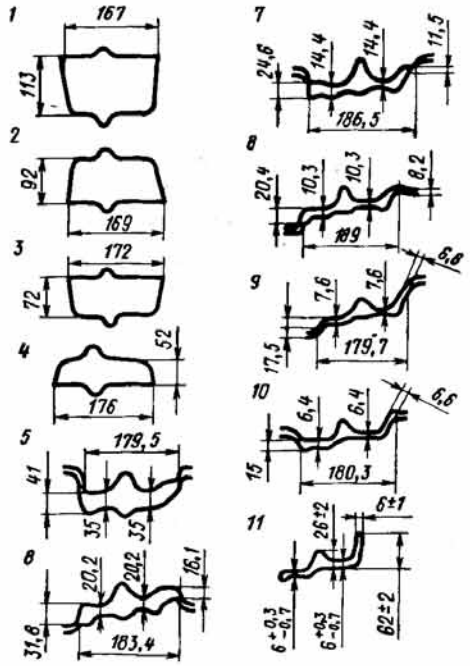


Рис. 197. Схема прокатки профиля для боковины решетка на линейном стане 550

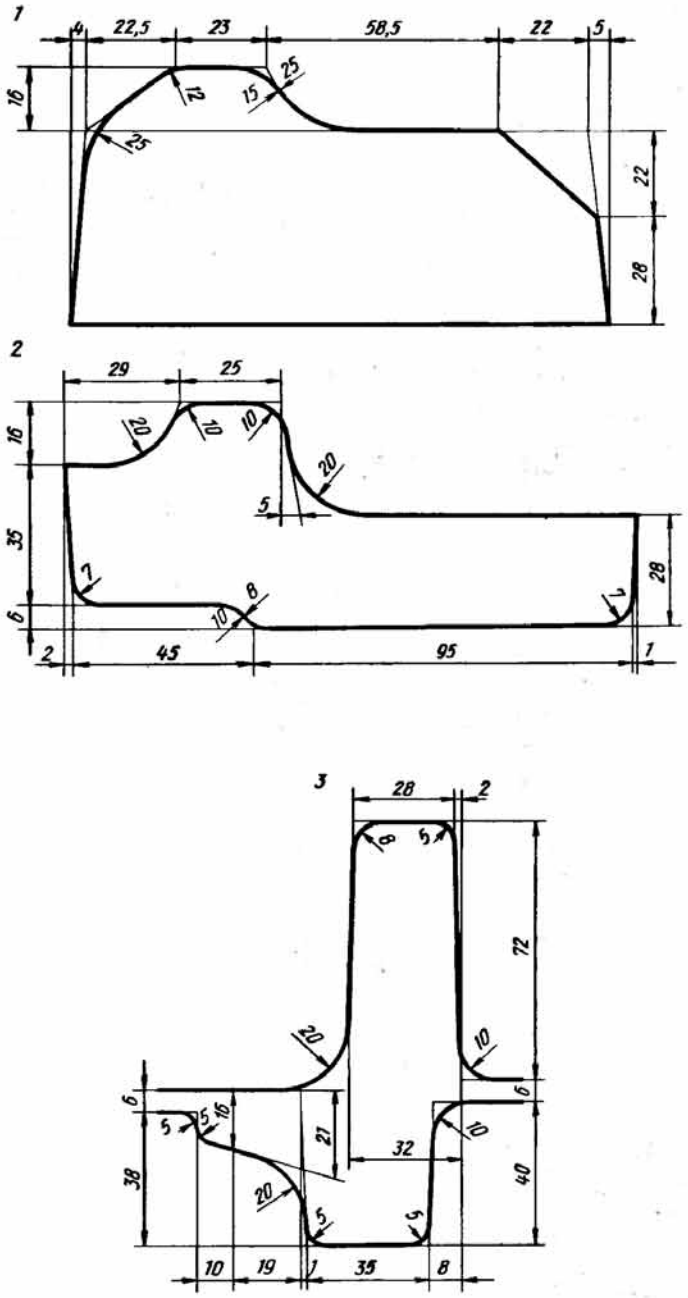
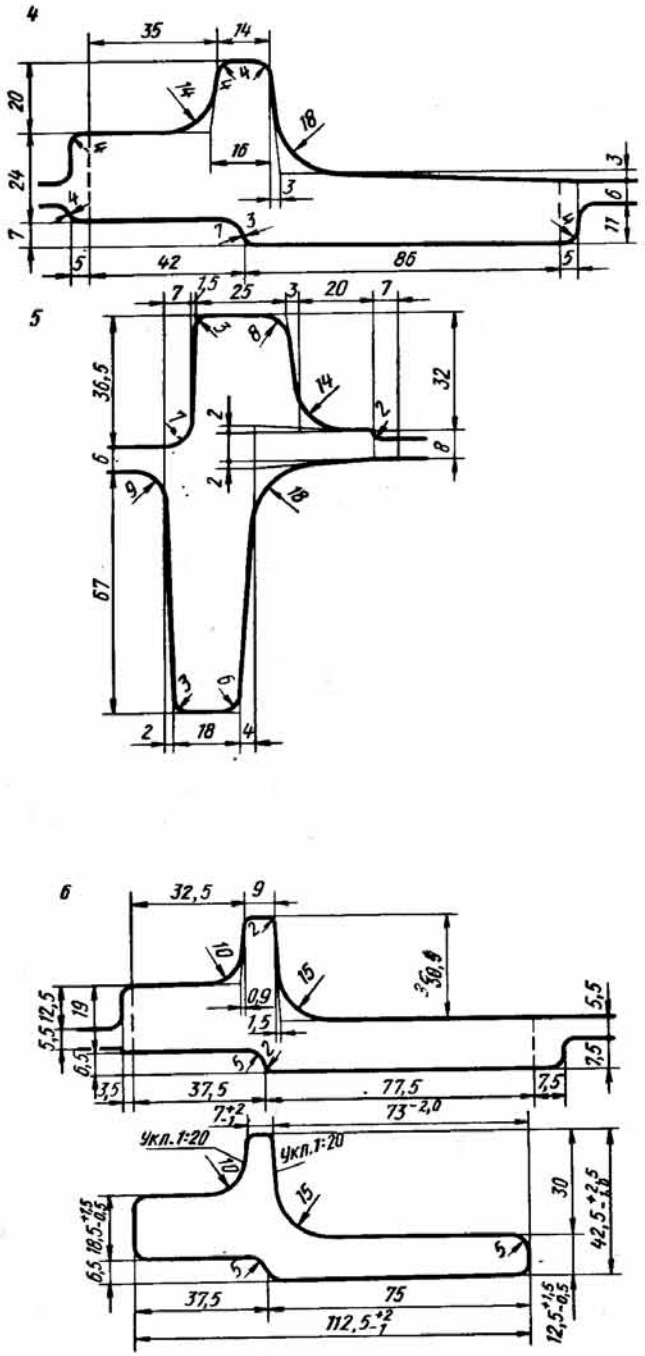


Рис. 198. Калибровка спецпрофиля для планки опорной направляющей колеса трактора Т-4А на линейном стане 500 (исходное сечение 130×84 мм; *а* – готовый профиль)



Продолжение рис. 198

б) прокатка в открытых или закрытых калибрах с интенсивным обжатием выступа и его вынужденным уширением в одном или двух пластовых (с горизонтальным расположением выступа) калибрах.

Схема прокатки в открытых или закрытых калибрах без кантовки полосы применяется в тех случаях, когда выступ имеет сравнительно небольшую высоту и, что самое главное, форма профиля исключает возможность его кантовки на 90°. По такой схеме прокатывается на стане 550 профиль для боковины решетка (рис. 197), кантовка профиля в процессе прокатки невозможна из-за боковой полки, однако сравнительно небольшая высота выступа (20 мм) позволяет сформировать этот выступ только в закрытых ручьях. Рассмотренная схема может быть при увеличенной высоте выступа несколько видоизменена с горизонтальным расположением полки в черновых калибрах, использованием пластового калибра для вынужденного уширения высту-

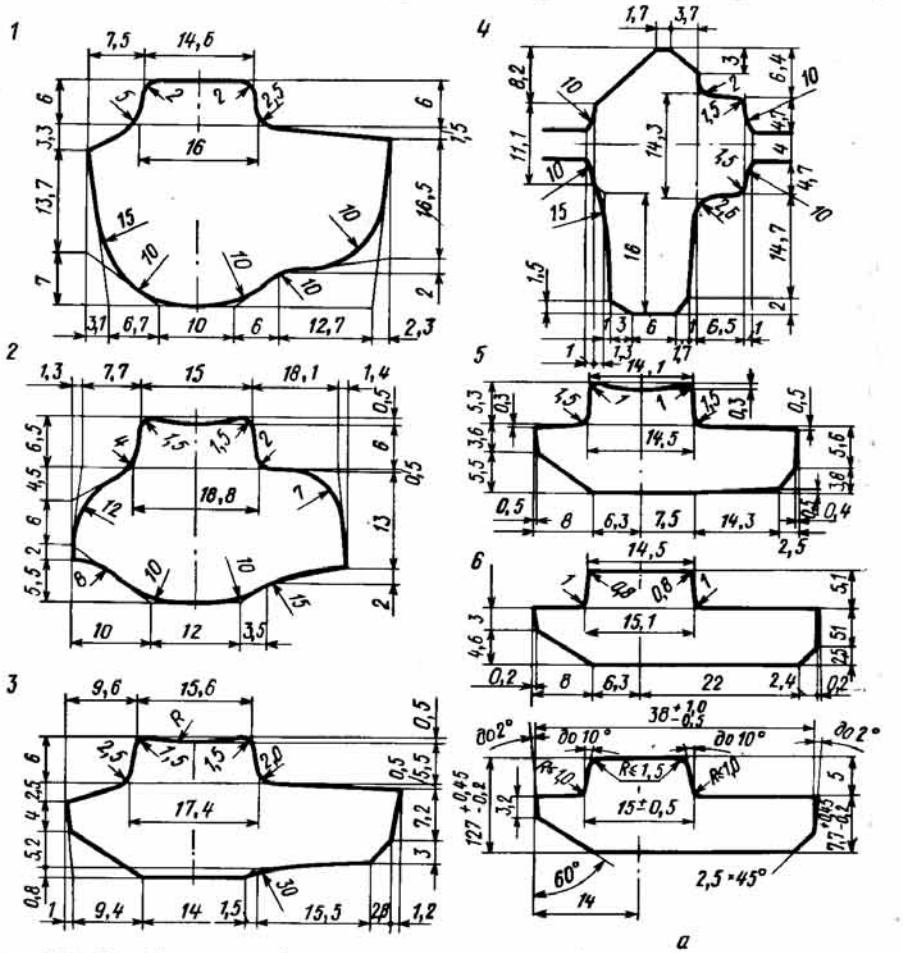


Рис. 199. Калибровка профиля для сухаря тормозной колодки на линейном стане 325 (исходное сечение 33×33 мм; *а* – готовый профиль)

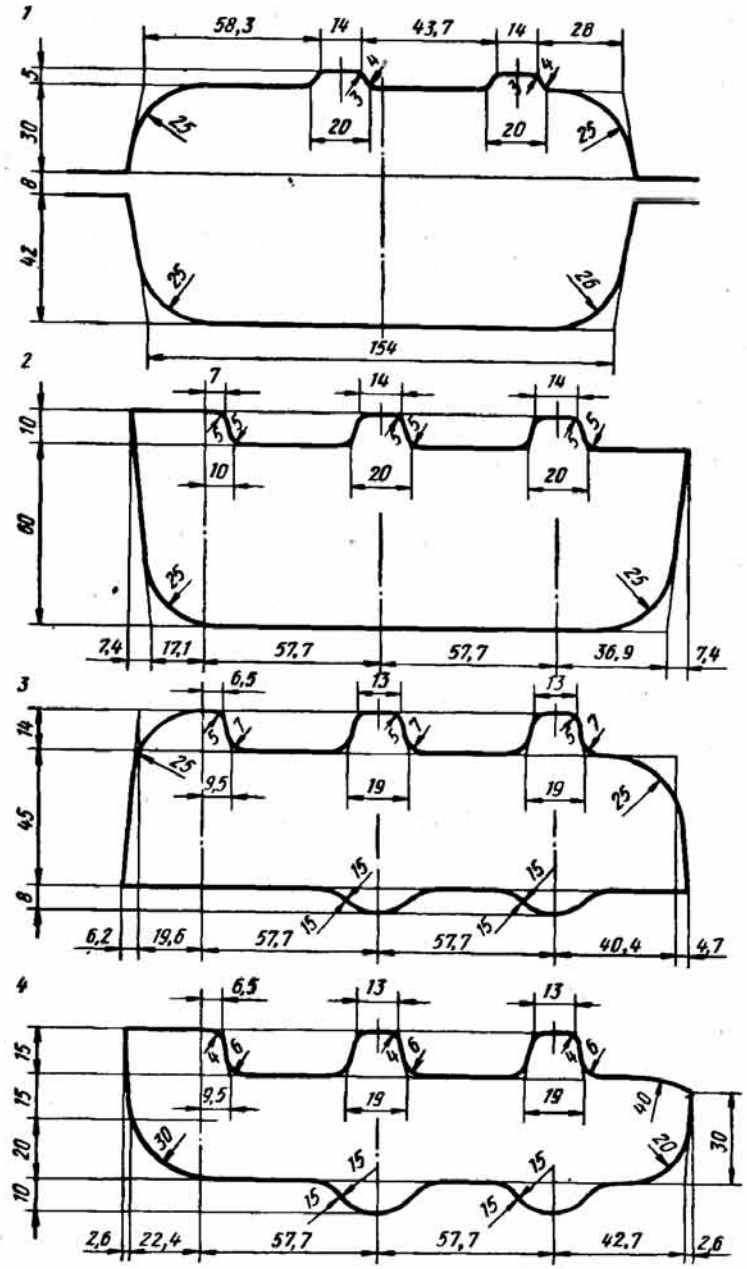
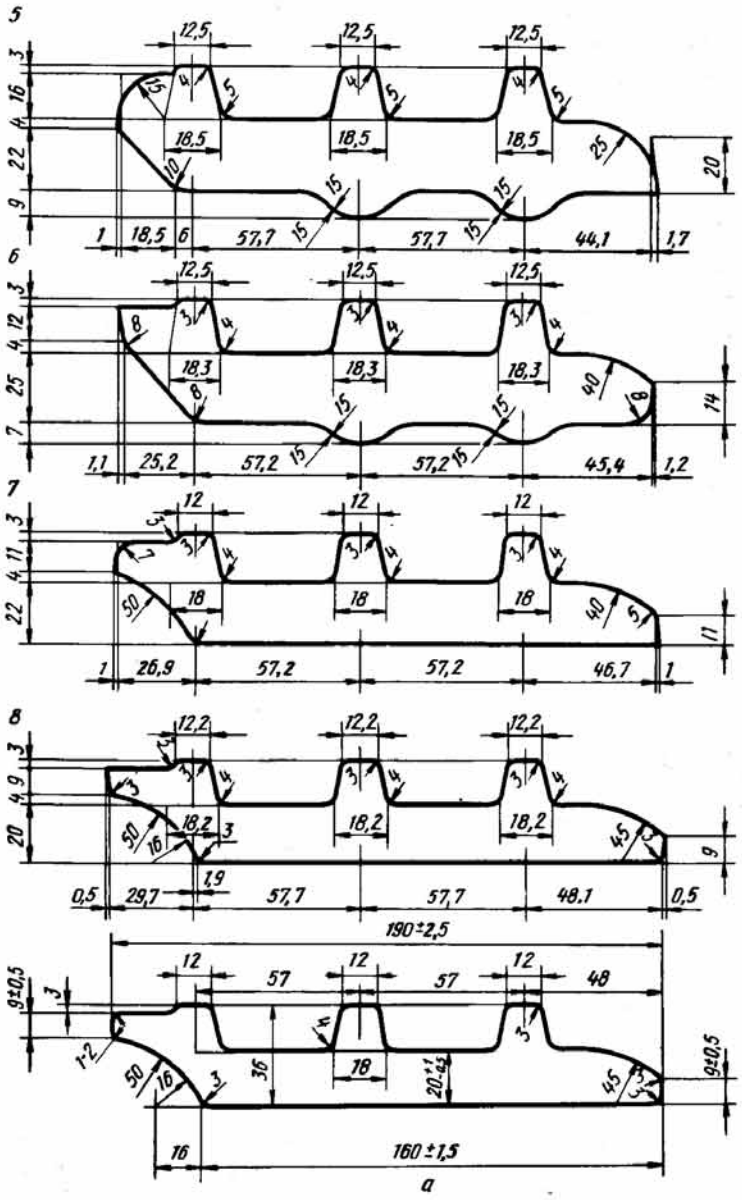


Рис. 200. Калибровка профиля пластины гусеничного полотна тяжеловоза ТГ-60 на линейном стане 620 (исходное сечение 60×105 мм; *а* – готовый профиль)



Продолжение рис. 200

па при обеспечении его высоты и последующим загибом полки в нужное положение.

На рис. 198 приведена калибровка профиля для планки опорной направляющей, прокатываемой по схеме с двумя ребровыми калибрами, в которых за счет обжатия и вынужденного уширения обеспечиваются заданные размеры выступа.

Калибровка профиля для сухаря тормозной колодки с одним ребровым калибром приведена на рис. 199.

Для прокатки двухгребневых профилей (с двумя ребрами жесткости) в настоящее время известны три основные схемы прокатки.

Схема 1. Прокатка в калибрах, подобных по форме чистовому и отличающихся друг от друга только размерами и расположением разъемов. Получение двухгребневых профилей по этой схеме не представляет особых затруднений, если высота выступов (ребер) сравнительно невелика. Утяжка выступов по высоте компенсируется подбором необходимой высоты заготовки и наличием в черновых калибрах ложных фланцев. Схема *1* широко распространена на практике. На рис. 200 приведена калибровка профиля пластины гусеничного полотна тяжеловоза ТГ-50, который прокатывается на стане 620 в восьми фасонных калибрах. Особенностью калибровки являются практически постоянные расстояния между осями выступов по проходам.

Однако сохранение постоянного расстояния по проходам между осями выступов является возможным только в том случае, если в калибрах по ходу прокатки предусматривается постепенное утонение выступов. Если же утонение выступов не предусматривать, то будет

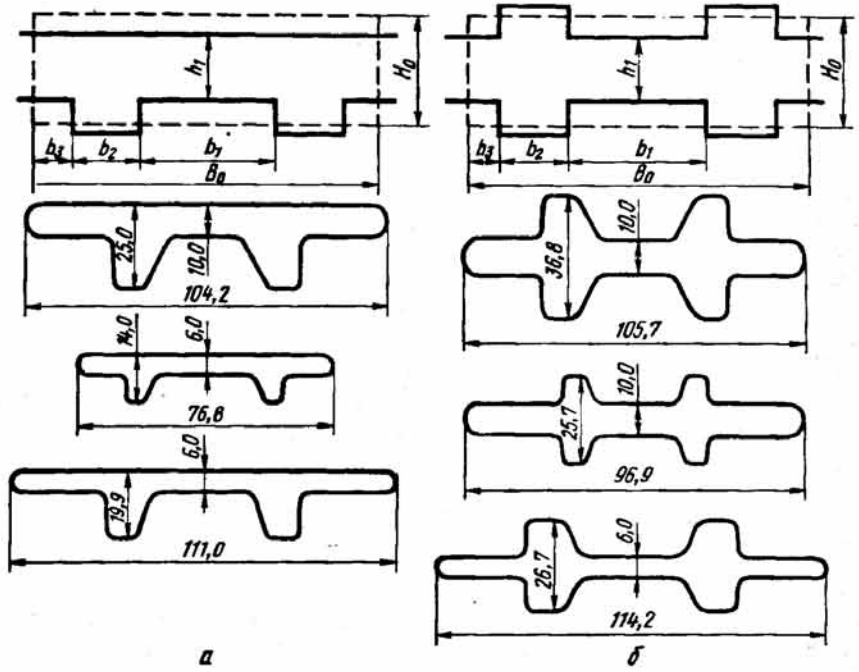


Рис. 201. Одностороннее заполнение выступов при прокатке полос за несколько проходов в калибрах с постоянным расстоянием между выступами: *а* – с односторонними выступами; *б* – с двухсторонними выступами

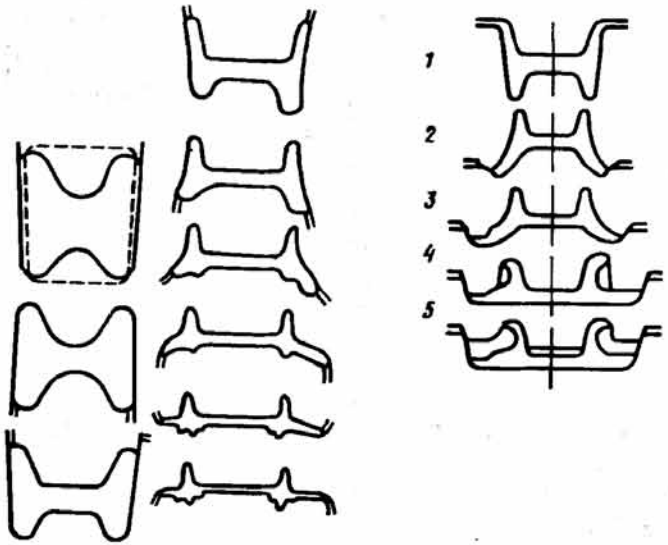


Рис. 202. Схема прокатки профиля для тракторных траков

Рис. 203. Схема прокатки профилей железнодорожных подкладок для пружинных скреплений

происходить утяжка внутренних поверхностей выступов (рис. 201), что может привести к браку.

Схема 2. По этой схеме первоначальное формирование профиля производится в балочных калибрах из прямоугольной заготовки. В последующих калибрах осуществляется отгибка верхних или нижних фланцев (полок) в горизонтальное положение с одновременным обжатием их по высоте, а противоположные фланцы деформируются в закрытых ручьях. В качестве примера можно привести [1] калибровки профилей для тракторных траков (рис. 202) и железнодорожных подкладок (рис. 203). При прокатке железнодорожных подкладок подкат балочной формы формируется в калибре *2*, а в калибрах *2* и *3*, наряду с общей деформацией, предусматривается отгибание нижних фланцев. В калибре *4* осуществляется разгибание нижних фланцев до горизонтального положения и начинается сгибание верхних фланцев. Окончательно формируются профили и в последнем чистовом калибре.

Схема 3. Данная схема предусматривает использование прямоволочных швеллерных калибров. При этом возможны два варианта калибровки:

1. Ложные фланцы, полученные в швеллерных калибрах, деформируются с вынужденным уширением в последующих калибрах. В результате из ложных фланцев формируются наружные части подкладки. Действительные фланцы полученного швеллерного раската деформируют в закрытых ручьях. Этот вариант следует применять при необходимости получения высоких ребер (выступов).

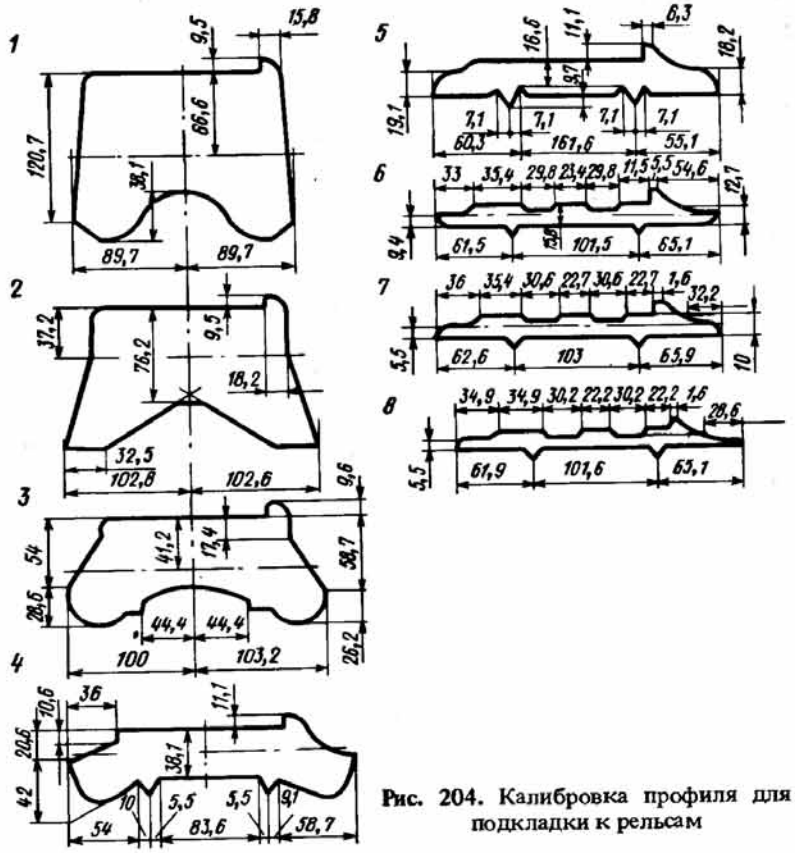


Рис. 204. Калибровка профиля для подкладки к рельсам

2. Формирующиеся в первых черновых калибрах швеллерной формы массивные фланцы в дальнейшем за счет отгибки и обжатия их по высоте формируются с образованием концевых участков и выступов профиля (рис. 204). Этот способ прокатки целесообразно применять при незначительных выступах из относительно небольшой заготовки.

2. Экспериментальные исследования формоизменения при прокатке профилей с ребрами жесткости

При калибровке полосовых профилей с ребрами жесткости существенное значение имеет определение формоизменения и в особенности коэффициента утяжки слабообжимаемых частей (ребер) профиля.

С целью получения формул для определения коэффициентов вытяжки, уширения и утяжки выполнены на опытно-промышленном стане 300 ДИИ экспериментальные исследования формоизменения металла при прокатке полосовых профилей с односторонними (рис. 205, *а*) и двухсторонними (рис. 205, *б*) ребрами жесткости. Образцы длиной

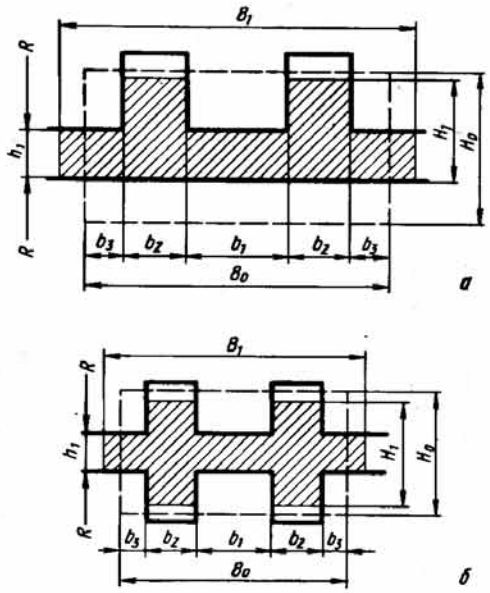


Рис. 205. Схема очага деформации при прокатке профилей с односторонними (*а*) и двухсторонними (*б*) ребрами жесткости

350 мм изготавливали из стали марки МСт3. Температура нагрева образцов перед прокаткой 1100 °С.

Главной целью исследования являлось определение зависимостей влияния числа проходов и суммарного обжатия (одна точка эксперимента охватывает процесс прокатки за несколько проходов) на утяжку ребер профиля по высоте, а также на продольную и поперечную деформации. Учитывая, что на практике для прокатки полосовых профилей с ребрами жесткости вполне достаточно 5–7 проходов, в эксперименте указанные профили прокатывали за четыре и шесть проходов (чистовой калибр не учитывался ввиду незначительной деформации). При этом коэффициенты обжатия по проходам приняты на основании практических данных: для четырех проходов – 1,40; 1,35; 1,25; 1,20; для шести проходов – 1,50; 1,40; 1,40; 1,35; 1,25; 1,20.

В качестве плана эксперимента использована полуреплика полного факторного эксперимента 2^{5-1}. Число экспериментальных точек в том и другом экспериментах равно $N = 2^{5-1} = 16$.

Пределы значений размерных геометрических параметров для профилей с односторонними (рис. 205, *а*) и двухсторонними (рис. 205, *б*) ребрами жесткости определены на основании анализа известных калибровок, а также исходя из технической характеристики опытно-промышленного стана 300 и соответственно равны (мм):

$$\left.\begin{array}{l} 17{,}0 \leqslant H_0 \leqslant 59{,}5;\ 6{,}0 \leqslant h_1 \leqslant 10{,}0;\ 30{,}0 \leqslant b_1 \leqslant 60{,}0; \\ 8{,}0 \leqslant b_2 \leqslant 32{,}0;\ 6{,}0 \leqslant b_3 \leqslant 12{,}0;\ 58{,}0 \leqslant B_0 \leqslant 136{,}0. \end{array}\right\} \quad (74)$$

Радиусы R нижнего и верхнего валков приняты постоянными и равными 150 мм.

Из параметров очага деформации R, H_0, b_1, h_1, b_2 и b_3 образованы пять безмерных относительных параметров m_i :

$$\left.\begin{array}{l} m_1 = H_0/h_1,\ m_2 = b_1/b_2,\ m_3 = b_1/R, \\ m_4 = b_3/R,\ m_5 = R/h_1. \end{array}\right\} \quad (75)$$

Параметры m_i являются варьируемыми и определяют собой широкую область факторного пространства. При этом фактор $m_1 = H_0/h_1$ учитывает число проходов, за которое прокатывается образец.

Из условия (74) при R = 150 определены пределы изменения безразмерных относительных параметров m_i :

$$\left.\begin{array}{l} 2{,}835 \leqslant m_1 \leqslant 5{,}954;\ 1{,}875 \leqslant m_2 \leqslant 3{,}75; \\ 0{,}2 \leqslant m_3 \leqslant 0{,}4;\ 0{,}04 \leqslant m_4 \leqslant 0{,}08;\ 15 \leqslant m_5 \leqslant 25. \end{array}\right\} \quad (76)$$

При планировании эксперимента в качестве модели для неизвестных функций $\lambda = L_1/L_0$; $\beta = B_1/B_0$ и $\delta = H_1/H_0$ принята линейная модель

$$\begin{array}{l} y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4 + a_5x_5 + a_{12}x_1x_2 + \\ + a_{13}x_1x_3 + a_{14}x_1x_4 + a_{15}x_1x_5 + a_{23}x_2x_3 + a_{24}x_2x_4 + \\ + a_{25}x_2x_5 + a_{34}x_3x_4 + a_{35}x_3x_5 + a_{45}x_4x_5, \end{array} \quad (77)$$

где область планирования эксперимента в пространстве $n = 5$ определяется неравенствами

$$-1 \leqslant x_i \leqslant +1,\ i = 1, 2, \ldots, 5. \quad (78)$$

Переменные x_i и m_i связаны зависимостями:

$$\left.\begin{array}{l} x_1 = 0{,}6412\, m_1 - 2{,}8179;\ x_2 = 1{,}0667\, m_2 - 3{,}0; \\ x_3 = 10{,}0\, m_3 - 3{,}0;\ x_4 = 50{,}0\, m_4 - 3{,}0; \\ x_5 = 0{,}2\, m_5 - 4{,}0, \end{array}\right\} \quad (79)$$

которые получены при переходе от переменных (76) к кодированным переменным x_i из условия (78) на основании соотношений

$$x_i = 2\,\frac{m_i - m_{i\,\text{ср}}}{m_{i\max} - m_{i\min}}, \quad (80)$$

где $m_{i\,\text{ср}}$ – среднее значение, определяемое из выражения $m_{i\,\text{ср}} = 0{,}5(m_{i\max} + m_{i\min})$, где $m_{i\max}$ и $m_{i\min}$ – соответственно верхний и нижний пределы изменения m_i .

План-матрица исследований приведена в табл. 13.

Определение геометрических размеров образцов до и после прокатки H_0, h_1, B_0, b_1, b_2 и b_3 и обработка результатов планируемого эксперимента произведены на основании экспериментальных данных (табл. 14 и 15) по методике, изложенной в [11]. Вследствие сложности формул для расчета суммарных коэффициентов вытяжки $\lambda_{\text{об}}$, уширения $\beta_{\text{об}}$ и утяжки $\delta_{\text{об}}$ в зависимости от переменных m_i была выполнена проверка значимости коэффициентов a_i по критерию

Таблица 13. План-матрица эксперимента и условия проведения опытов

№	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	m_1	m_2	m_3	m_4	m_5	H_0	B_0	h_1	b_1	b_2	b_3	m
1	−1	−1	−1	−1	+1	2,835	1,875	0,2	0,04	25	17,0	74,0	6,0	30,0	16,0	6,0	4
2	+1	−1	−1	−1	−1	5,954	1,875	0,2	0,04	15	59,5	74,0	10,0	30,0	16,0	6,0	6
3	−1	+1	−1	−1	−1	2,835	3,75	0,2	0,04	15	28,3	58,0	10,0	30,0	8,0	6,0	4
4	+1	+1	−1	−1	+1	5,954	3,75	0,2	0,04	25	35,7	58,0	6,0	30,0	8,0	6,0	6
5	−1	−1	+1	−1	−1	2,835	1,875	0,4	0,04	15	28,3	136,0	10,0	60,0	32,0	6,0	4
6	+1	−1	+1	−1	+1	5,954	1,875	0,4	0,04	25	35,7	136,0	6,0	60,0	32,0	6,0	6
7	−1	+1	+1	−1	+1	2,835	3,75	0,4	0,04	25	17,0	104,0	6,0	60,0	16,0	6,0	4
8	+1	+1	+1	−1	−1	5,954	3,75	0,4	0,04	15	59,5	104,0	10,0	60,0	16,0	6,0	6
9	−1	−1	−1	+1	−1	2,835	1,875	0,2	0,08	15	28,3	86,0	10,0	30,0	16,0	12,0	4
10	+1	−1	−1	+1	+1	5,954	1,875	0,2	0,08	25	35,7	86,0	6,0	30,0	16,0	12,0	6
11	−1	+1	−1	+1	+1	2,835	3,75	0,2	0,08	25	17,0	70,0	6,0	30,0	8,0	12,0	4
12	+1	+1	−1	+1	−1	5,954	3,75	0,2	0,08	15	59,5	70,0	10,0	30,0	8,0	12,0	6
13	−1	−1	+1	+1	+1	2,835	1,875	0,4	0,08	25	17,0	198	6,0	60,0	16,0	12,0	4
14	+1	−1	+1	+1	−1	5,954	1,875	0,4	0,08	15	59,5	116,0	10,0	60,0	16,0	12,0	6
15	−1	+1	+1	+1	−1	2,835	3,75	0,4	0,08	15	28,3	116,0	10,0	60,0	32,0	12,0	4
16	+1	+1	+1	+1	+1	5,954	3,75	0,4	0,08	25	35,7	100,0	6,0	60,0	32,0	12,0	6

Стьюдента [11]. После отбрасывания незначащих членов полиномов, перехода от переменных x_i к m_i согласно зависимостям (79) и подстановки значений m_i из выражений (75) получены окончательные формулы для определения суммарных коэффициентов деформации $\lambda_{об}$, $\beta_{об}$ и $\delta_{об}$ за четыре и шесть проходов, которые определены для интервалов изменения параметров m_i, указанных в системе неравенств (76):

а) для профилей с односторонними ребрами жесткости

$$\lambda_{об} = L_1/L_0 = 1{,}628 + 0{,}22\, m_1 - 0{,}38\, m_2 - 2{,}78\, m_3 - 10{,}98\, m_4 - 0{,}015\, m_5 + 0{,}089\, m_1 m_2 + 2{,}165\, m_1 m_4 - 0{,}005\, m_1 m_5 + 0{,}17\, m_2 m_3 - 3{,}44\, m_2 m_4 + 0{,}0244\, m_2 m_5 + 77{,}6\, m_3 m_4 - 0{,}099\, m_3 m_5 - 0{,}249\, m_4 m_5, \quad (81)$$

$$\beta_{об} = B_1 B_0 = 1{,}20 + 0{,}098\, m_1 - 0{,}0737\, m_2 - 0{,}264\, m_3 - 2{,}625\, m_4 - 0{,}0766\, m_5 + 0{,}00213\, m_1 m_2 - 0{,}1558\, m_1 m_3 - 0{,}0004\, m_1 m_5 + 3{,}407\, m_3 m_4 + 0{,}00628\, m_3 m_5 + 0{,}05674\, m_4 m_5, \quad (82)$$

$$\delta_{об} = H_1/H_0 = 0{,}7693 - 0{,}1101\, m_1 - 0{,}08\, m_2 + m_3 + 3{,}28\, m_4 + 0{,}009\, m_5 - 0{,}0012\, m_1 m_2 + 0{,}05\, m_1 m_3 - 0{,}14\, m_1 m_4 + 0{,}0012\, m_1 m_5 + 0{,}56\, m_2 m_4 - 0{,}00066\, m_2 m_5 - 18{,}43\, m_3 m_4 - 0{,}0062\, m_3 m_5; \quad (83)$$

б) для профилей с двухсторонними ребрами жесткости

$$\lambda_{об} = L_1/L_0 = 4{,}214 + 0{,}758\, m_1 - 0{,}866\, m_2 - 5{,}488\, m_3 - 23{,}71\, m_4 - 0{,}154\, m_5 + 0{,}084\, m_1 m_2 - 0{,}829\, m_1 m_3 - 3{,}031\, m_1 m_4 - 0{,}008\, m_1 m_5 + 0{,}628\, m_2 m_3 + 1{,}976\, m_2 m_4 + 0{,}026\, m_2 m_5 + 47{,}84\, m_3 m_4 + 0{,}170\, m_3 m_5 + 5{,}530\, m_4 m_5, \quad (84)$$

$$\beta_{об} = B_1/B_2 = 0{,}997 + 0{,}132\, m_1 - 0{,}345\, m_3 - 1{,}318\, m_4 - 0{,}003\, m_1 m_2 - 0{,}101\, m_1 m_3 - 0{,}001\, m_1 m_5 - 0{,}071\, m_2 m_3 + 5{,}530\, m_3 m_4; \quad (85)$$

$$\delta_{об} = H_1/H_0 = 1{,}080 - 0{,}109\, m_1 - 0{,}076\, m_2 + 0{,}007\, m_5 - 0{,}012\, m_1 m_2 + 0{,}154\, m_1 m_3 + 0{,}001\, m_1 m_5 + 0{,}001\, m_2 m_5 - 0{,}029\, m_3 m_5. \quad (86)$$

Средняя ошибка аппроксимации зависимостей (81)–(86) не превышает 2 %.

Анализ темплетов, отобранных по проходам, показал, что внешние грани ребер жесткости перпендикулярны стенке профиля, а внутренние грани имеют ступенчатый уклон вследствие интенсивного уширения стенки профиля и утяжки ребер жесткости по толщине. Следует отметить, что такое заполнение калибров позволяет производить прокатку аналогичных профилей с параллельными наружными гранями

Таблица 14. Параметры прокатки профилей с двухсторонними ребрами жесткости

Параметр	№ прохода	Номер образца 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
h_1	0	16,0	59,5	28,3	35,7	28,3	35,7	17,0	59,5	28,3	35,7	17,0	59,5	17,0	59,5	28,3	35,7
	1	11,7	39,0	19,4	23,7	20,4	24,6	12,3	38,8	20,0	23,0	12,0	38,3	13,0	39,6	20,5	24,1
	2	8,9	28,0	14,5	16,9	16,0	18,6	9,7	28,3	15,7	16,8	9,0	28,0	9,7	28,5	15,3	17,8
	3	7,0	20,3	11,4	11,5	12,8	13,8	7,5	20,0	11,7	11,5	7,0	20,0	7,3	20,9	12,5	12,5
	4	6,0	14,8	10,0	8,9	10,0	9,3	6,0	15,8	10,0	9,2	5,8	14,9	6,0	15,3	10,3	9,5
	5		12,0		7,0		7,2		12,3		7,1		12,0		12,3		7,4
	6		10,0		6,0		6,0		10,0		6,0		10,0		10,0		6,0
H_1	0	17,0	59,5	28,3	35,7	28,3	35,7	17,0	59,5	28,3	35,7	17,0	59,5	17,0	59,5	28,3	35,7
	1	16,7	49,7	24,5	29,5	27,5	34,6	16,0	48,9	27,0	32,7	16,3	44,0	16,0	48,8	24,4	28,9
	2	16,3	44,9	22,5	25,8	26,8	33,7	15,0	43,7	26,0	30,2	15,5	37,4	15,1	43,0	22,0	25,9
	3	16,0	42,3	21,0	24,0	25,45	33,0	14,7	39,6	25,0	29,5	15,0	32,5	14,5	39,4	20,0	22,7
	4	15,7	40,4	20,0	22,4	24,7	31,0	13,4	35,0	24,5	28,3	14,2	29,0	13,9	36,5	18,5	20,2
	5		38,3		21,5		29,9		33,4		27,3		26,8		33,7		18,7
	6		36,8		20,6		28,8		31,0		26,7		25,7		31,0		16,8
B_1	0	74,0	74,0	58,0	58,0	136,0	136,0	104,0	104,0	86,0	86,0	70,0	70,0	116,0	116,0	100,0	100,0
	1	76,5	81,9	62,3	64,5	139,0	141,0	105,3	112,7	90,5	91,7	74,0	80,0	118,9	123,7	102,8	104,5
	2	79,0	88,0	65,1	68,4	140,5	147,5	107,0	117,0	93,5	96,3	75,8	85,4	120,7	129,6	105,1	108,3
	3	82,5	93,9	67,3	72,1	144,5	148,3	108,1	122,3	97,2	102,4	78,5	89,1	123,3	133,5	106,1	110,0
	4	83,8	99,5	68,5	74,9	18,1	156,2	111,0	124,6	99,3	105,9	79,8	93,0	124,5	139,0	107,9	112,0
	5		102,9		77,3		162,2		126,9		109,1		95,3		140,0		113,0
	6		105,7		78,7		163,5		129,3		114,2		96,9		142,3		114,0
λ	1	1,196	1,249	1,258	1,289	1,190	1,246	1,250	1,340	1,223	1,235	1,240	1,323	1,220	1,340	1,307	1,370
	2	1,030	1,204	1,215	1,388	1,131	1,130	1,190	1,254	1,156	1,078	1,220	1,288	1,210	1,258	1,251	1,300
	3	1,135	1,517	1,190	1,274	1,132	1,178	1,210	1,270	1,140	1,207	1,170	1,265	1,130	1,243	1,179	1,268
	4	10	1,170	1,150	1,192	1,116	1,150	1,160	1,206	1,131	1,237	1,170	1,242	1,130	1,218	1,161	1,225
	5		1,148		1,211		1,045		1,080		1,124		1,182		1,153		1,200
	6		1,219		1,150		1,120		1,138		1,094		1,149		1,126		1,161
λ_Σ		1,5	3,73	2,09	3,78	1,7	2,43	2,08	3,46	1,82	2,44	2,07	3,63	2,29	3,31	2,238	3,85
β	1	1,033	1,106	1,074	1,112	1,022	1,036	1,012	1,083	1,052	1,066	1,057	1,142	1,026	1,066	1,028	1,045
	2	1,032	1,074	1,044	1,060	1,010	1,046	1,016	1,038	1,033	1,039	1,024	1,068	1,015	1,048	1,022	1,036
	3	1,044	1,067	1,033	1,054	1,028	1,054	1,010	1,045	1,039	1,064	1,036	1,043	1,022	1,030	1,008	1,016
	4	1,015	1,059	1,017	1,038	1,025	1,053	1,027	1,019	1,022	1,034	1,016	1,044	1,009	1,041	1,018	1,018
	5		1,034		1,032		1,038		1,018		1,037		1,024		1,007		1,013
	6		1,027		1,018		1,008		1,019		1,047		1,017		1,016		1,004
β_Σ		1,12	1,42	1,18	1,35	1,08	1,2	1,07	1,24	1,15	1,32	1,14	1,38	1,07	1,22	1,07	1,14
δ	1	0,982	0,830	0,865	0,826	0,971	0,969	0,941	0,821	0,954	0,915	0,958	0,739	0,941	0,820	0,862	0,809
	2	0,976	0,903	0,918	0,874	0,974	0,975	0,938	0,894	0,963	0,924	0,951	0,850	0,888	0,881	0,902	0,896
	3	0,981	0,942	0,933	0,930	0,950	0,979	0,980	0,906	0,962	0,977	0,968	0,869	0,960	0,916	0,909	0,876
	4	0,981	0,955	0,952	0,933	0,971	0,939	0,912	0,884	0,980	0,959	0,947	0,892	0,959	0,926	0,841	0,879
	5		0,948		0,959		0,965		0,954		0,965		0,924		0,923		0,926
	6		0,961		0,958		0,963		0,928		0,978		0,959		0,919		0,898
δ_Σ		0,92	0,61	0,70	0,57	0,87	0,81	0,78	0,52	0,86	0,74	0,83	0,43	0,81	0,54	0,65	0,47

Таблица 15. Параметры прокатки профилей с односторонними ребрами жесткости

Параметр	№ прохода	Номер образца																
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
h_1	0	17,0	59,5	28,3	35,7	28,3	35,7	17,0	59,5	28,3	35,7	17,0	59,5	17,0	59,5	28,3	35,7	
	1	11,7	39,1	19,5	23,8	20,8	25,1	12,5	40,0	20,0	23,6	12,2	39,1	13,0	39,7	20,2	24,3	
	2	8,8	27,5	14,5	16,7	14,9	18,7	9,2	28,8	14,8	16,6	9,0	27,4	9,3	27,0	15,7	17,0	
	3	7,2	19,6	11,5	12,1	12,5	12,4	7,1	20,7	11,8	12,0	7,0	19,8	7,3	20,9	12,0	12,0	
	4	6,0	14,4	9,9	8,9	10,0	10,0	6,0	15,2	9,9	9,0	5,9	14,5	6,0	15,3	10,0	9,0	
	5		11,5		7,0		8,0		12,1		7,1		12,0		12,3		7,2	
	6		9,6		7,0		6,0		10,0		6,0		10,0		10,0		6,0	
H_1	0	17,0	59,5	28,3	35,7	28,3	35,7	17,0	59,5	28,3	35,7	17,0	59,5	17,0	59,5	28,3	35,7	
	1	15,8	44,85	22,5	26,7	25,8	31,0	15,0	44,5	24,5	29,5	15,1	41,7	15,0	44,0	22,5	27,0	
	2	15,0	37,0	18,8	22,0	23,2	28,5	13,7	35,7	22,3	26,0	13,5	31,9	13,5	35,3	19,0	21,5	
	3	13,8	31,1	16,5	18,2	22,0	26,5	12,5	29,0	20,7	23,4	12,3	25,5	12,6	30,4	16,8	17,8	
	4	13,5	28,0	15,5	16,3	21,3	25,0	11,5	26,5	20,0	21,4	11,6	21,7	12,0	26,0	14,7	15,6	
	5		26,2		15,7		23,5		23,0		20,5		19,7		23,0		13,7	
	6		25,0		14,0		12,1		22,0		19,9		18,3		22,0		13,0	
B_1	0	74,0	74,0	58,0	58,0	136,0	136,0	104,0	104,0	86,0	86,0	70,0	70,0	116,0	116,0	100,0	100,0	
	1	77,6	83,6	63,0	64,5	139,55	140,3	106,0	111,8	90,5	93,0	74,0	80,4	117,0	123,0	103,5	105,0	
	2	30,0	88,6	65,9	68,7	142,5	143,5	106,9	116,0	94,0	98,8	76,1	85,1	120,0	126,9	104,9	108,0	
	3	82,5	93,45	67,2	72,1	145,0	147,1	108,2	119,7	97,0	101,9	78,0	90,0	121,6	131,0	106,5	110,7	
	4	83,5	98,05	68,3	74,6	149,8	151,6	109,4	123,0	97,9	105,3	79,0	92,3	122,6	133,5	107,9	112,0	
	5		101,0		76,1		153,1		124,4		108,1		94,0		135,0		112,5	
	6		104,2		78,8		155,6		125,8		111,0		94,2		137,5		114,0	
λ	1	1,208	1,301	1,311	1,316	1,232	1,269	1,282	1,338	1,273	1,335	1,306	1,337	1,167	1,370	1,341	1,332	
	2	1,193	1,260	1,246	1,290	1,229	1,203	1,276	1,315	1,224	1,253	1,266	1,302	1,281	1,312	1,256	1,360	
	3	1,140	1,248	1,187	1,275	1,106	1,239	1,203	1,283	1,145	1,230	1,131	1,303	1,193	1,274	1,261	1,338	
	4	1,180	1,221	1,151	1,393	1,081	1,122	1,143	1,258	1,119	1,191	1,187	1,284	1,130	1,275	1,182	1,314	
	5		1,143		1,197		1,090		1,194		1,136		1,193		1,178		1,194	
	6		1,125		1,149		1,020		1,149		1,114		1,158		1,152		1,158	
λ_Σ		1,836	3,213	2,231	4,146	1,810	2,549	2,249	3,89	1,996	3,101	2,210	4,020	2,010	3,960	2,510	4,400	
β	1	1,048	1,129	1,086	1,112	1,026	1,031	1,019	1,075	1,052	1,081	1,057	1,148	1,014	1,060	1,035	1,050	
	2	1,031	1,059	1,046	1,065	1,021	1,022	1,008	1,037	1,038	1,062	1,028	1,058	1,019	1,031	1,013	1,028	
	3	1,031	1,054	1,019	1,049	1,017	1,025	1,012	1,032	1,031	1,031	1,024	1,057	1,013	1,032	1,015	1,025	
	4	1,012	1,049	1,016	1,034	1,033	1,031	1,011	1,027	1,009	1,033	1,012	1,025	1,008	1,019	1,013	1,012	
	5		1,030		1,020		1,009		1,011		1,020		1,018		1,011		1,004	
	5		1,031		1,035		1,016		1,011		1,026		1,002		1,018		1,013	
β_Σ		1,120	1,400	1,170	1,320	1,070	1,140	1,050	1,200	1,130	1,290	1,120	1,340	1,050	1,180	1,070	1,140	
δ	1	0,929	0,753	0,795	0,747	0,909	0,868	0,882	0,747	0,865	0,826	0,888	0,700	0,882	0,739	0,795	0,756	
	2	0,949	0,824	0,835	0,824	0,901	0,919	0,913	0,802	0,910	0,881	0,894	0,764	0,900	0,804	0,844	0,796	
	3	0,920	0,841	0,877	0,827	0,948	0,929	0,912	0,812	0,928	0,900	0,911	0,799	0,933	0,861	0,844	0,827	
	4	0,978	0,900	0,939	0,895	0,968	0,943	0,920	0,913	0,966	0,914	0,943	0,851	0,952	0,855	0,875	0,876	
	5		0,935		0,963		0,940		0,867		0,957		0,907		0,884		0,878	
	6		0,954		0,891		0,982		0,956		0,970		0,928		0,956		0,948	
δ_Σ		0,790	0,420	0,540	0,390	0,750	0,640	0,680	0,360	0,700	0,550	0,680	0,300	0,700	0,360	0,510	0,360	

ребер жесткости, а также применять калибры без бокового обжатия внешних граней ребер.

На рис. 201 приведены темплеты после последнего прохода при прокатке профилей с односторонними и двухсторонними ребрами жесткости. Как видно из рис. 201, при прокатке за счет уширения средней части происходит смещение ребер, и в результате наблюдается незаполнение по высоте их внутренней части. Поэтому при проектировании калибровок с ребрами жесткости в целях хорошего заполнения ребер необходимо предусматривать обжатие ребер по ширине (можно сказать, толщине) или увеличение от калибра к калибру межосевого расстояния ребер. Это увеличение межосевого расстояния можно определить на основе расчета уширения обжимаемой средней части.

Высоту гребней и ширину полос можно определить на основании формул (81) –(83) и таблиц 13 и 15 для профилей с односторонними ребрами жесткости и на основании формул (84) и (86) и таблиц 13 и 14 для профилей с двухсторонними ребрами жесткости.

При определении коэффициентов уширения и утяжки в отдельных проходах можно использовать линейную или параболическую зависимость для таблиц 14 и 15. Некоторые неточности могут быть устранены при корректировке калибровки.

При проектировании калибровок с ребрами жесткости (в том числе и тавровых в ребровых калибрах) представляет большой интерес течение металла в закрытых частях калибров. До сих пор еще существуют разноречивые мнения об изменении высоты гребней (его утяжке) при наличии бокового обжатия за счет проволакивания.

Для определения коэффициентов вытяжки, уширения и утяжки в ребровых калибрах с одним гребнем (рис. 206) был выполнен планируемый эксперимент на опытно-промышленном трехклетевом стане 300 отраслевой лаборатории прокатки Днепродзержинского индустриального института. Температура нагрева 1100 °С. Длина образцов 300 мм. Валки бандажированные со средним диаметром 315 мм (330 мм и 300 мм) и длиной бочки 500 мм.

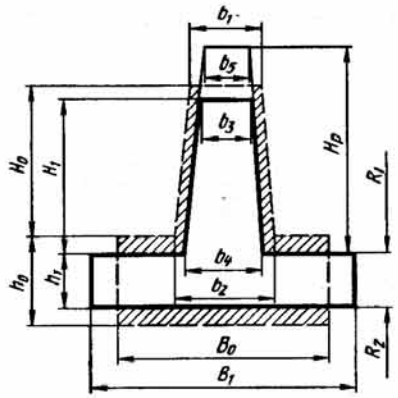
При планировании эксперимента приняты следующие параметры калибра и полосы и их обозначения (рис. 206): R, b_4, b_2, b_1, B_0, H_0, h_0 и h_1.

Приведенная система параметров позволяет с принятой степенью точности описать форму и размеры.

Из параметров калибра и полосы были образованы семь безразмерных переменных (параметров):

$$\left.\begin{aligned} &m_1 = \frac{h_0}{h_1},\ m_2 = \frac{H_0}{h_0},\ m_3 = \frac{B_0}{b_4},\ m_4 = \frac{b_4}{R},\\ &m_5 = \frac{R}{h_1},\ m_6 = \frac{b_2 - b_1}{2H_0}\ (\text{уклон}),\ m_7 = \frac{b_2}{b_4}. \end{aligned}\right\} \qquad (87)$$

Рис. 206. Схема очага деформации при прокатке профиля с ребром жесткости в ребровом калибре



Эти параметры m_i являются варьируемые и определяют собой наиболее широкую область факторного пространства. На основании анализа существующих калибровок подобных профилей, а также в соответствии с конструктивными характеристиками стана 300 и условиями осуществления процесса прокатки значения размерных параметров m_i были ограничены пределами (мм):

$$\left.\begin{aligned} &16{,}0 \leqslant b_2 \leqslant 38{,}0;\quad 9{,}3 \leqslant b_1 \leqslant 32{,}8;\\ &16{,}0 \leqslant b_4 \leqslant 32{,}0;\quad 2{,}5 \leqslant b_5 \leqslant 23{,}0;\\ &40{,}0 \leqslant B_0 \leqslant 96{,}0;\quad 17{,}5 \leqslant H_0 \leqslant 33{,}3;\\ &10{,}0 \leqslant h_0 \leqslant 18{,}0;\quad 8{,}0 \leqslant h_1 \leqslant 12{,}0, \end{aligned}\right\} \qquad (88)$$

$R = 157{,}5$.

В качестве основы плана взят не весь план полного факторного эксперимента для линейной модели (ПФЭ 2^7), а его одна восьмая часть 2^{7-3}.

Количество опытов при проведении эксперимента на основе одной восьмой реплики 2^{7-3} для линейной модели определяется соотношением [11]

$N = 2^{7-3} = 16$.

Из условия (98) находим пределы изменения для варьируемых параметров

$$\begin{aligned} &1{,}25 \leqslant m_1 \leqslant 1{,}50;\quad 1{,}75 \leqslant m_2 \leqslant 1{,}85;\\ &2{,}5 \leqslant m_3 \leqslant 3{,}0;\quad 0{,}1 \leqslant m_4 \leqslant 0{,}2;\\ &13{,}1 \leqslant m_5 \leqslant 19{,}7;\quad 10\,\% \leqslant m_6 \leqslant 15\,\%;\\ &1{,}0 \leqslant m_7 \leqslant 1{,}2. \end{aligned} \qquad (89)$$

Формулы преобразования для перехода к кодированным переменным

$x_1 = 8\,m_1 - 11,\ x_2 = 20\,m_2 - 36,$

$x_3 = 4\,m_3 - 11,\ x_4 = 20\,m_4 - 3,$

$x_5 = 0{,}3\, m_5 - 4{,}97,\ x_6 = 40\, m_6 - 5,$

$x_7 = 10\, m_7 - 11.$

При проводимом исследовании прокатки профилей полосового типа с ребром жесткости главной целью являлось определение зависимостей коэффициентов вытяжки, уширения и утяжки от обжатия полосы и бокового обжатия стенки (ребра), а также от остальных параметров полосы и калибра.

После прокатки проведена обработка полученных данных: измерение темплетов и подсчет коэффициентов вытяжки λ.

На основании измерения темплетов определены коэффициенты уширения $\beta = B_1/B_0$ и утяжки $\delta = (H_1 + h_1)/(H_0 + h_0)$, где B_0 – ширина полосы до прокатки; B_1 – ширина полосы после прокатки; $H_0 + h_0$ – начальная высота полосы; $H_1 + h_1$ – высота полосы после прокатки.

После обработки результатов по стандартной программе на ЭВМ ЕС-1022, отбрасывания незначимых слагаемых и перехода от переменных x_i к m_i имеем окончательно

$$\lambda = -2{,}9 + 3{,}12\, m_1 + 1{,}62\, m_2 - 0{,}020\, m_3 - 3{,}49\, m_4 + 0{,}0015\, m_5 + 0{,}594\, m_7 - 1{,}50\, m_1 m_2 - 1{,}10\, m_1 m_4 + 2{,}25\, m_2 m_4 + 0{,}550\, m_3 m_4 - 0{,}0337\, m_4 m_5,\quad \epsilon = 0{,}8\,\%. \tag{90}$$

$$\beta = 3{,}04 - 1{,}08\, m_1 - 1{,}24\, m_2 - 0{,}0825\, m_3 + 1{,}26\, m_4 - 0{,}0143\, m_5 + 0{,}119\, m_7 + 0{,}900\, m_1 m_2 - 1{,}70\, m_1 m_4 + 0{,}0337\, m_4 m_5,\quad \epsilon = 0{,}5\,\%. \tag{91}$$

$$\delta = 1{,}7 - 0{,}114\, m_1 + 0{,}108\, m_2 + 0{,}035\, m_3 - 2{,}38\, m_4 + 0{,}0012\, m_5 - 0{,}937\, m_7 - 0{,}420\, m_3 m_4 + 0{,}0217\, m_4 m_5 + 3{,}32\, m_4 m_7,\quad \epsilon = 0{,}1\,\%. \tag{92}$$

3. Прокатка и калибровка профилей с ребрами жесткости

На рис. 207 изображена по Тринксу железнодорожная подкладка с одним средним ребром, на рис. 208 – с двумя средними ребрами. Эти профили прокатываются подобно швеллерам и не нуждаются в детальном объяснении. Для профиля на рис. 207 среднее ребро не может получить ни прямого, ни бокового давления. После третьего прохода полоса кантуется на 180°. Следует обратить внимание на большую высоту (100 мм) исходного сечения по сравнению с высотой готового профиля (23,4 мм). Отсюда видно, что в данной калибровке имеет место значительная утяжка полок и ребер.

На рис. 208 приведены первые семь калибров при прокатке подкладки с двумя средними ребрами за 9 фасонных проходов. Измерение площадей на рис. 208 показывает, что обжатие в первых двух проходах равно около 20 % в каждом, а в последующих пяти – около 30 % в каждом. При этом из чертежа видно, что уклон внутренних

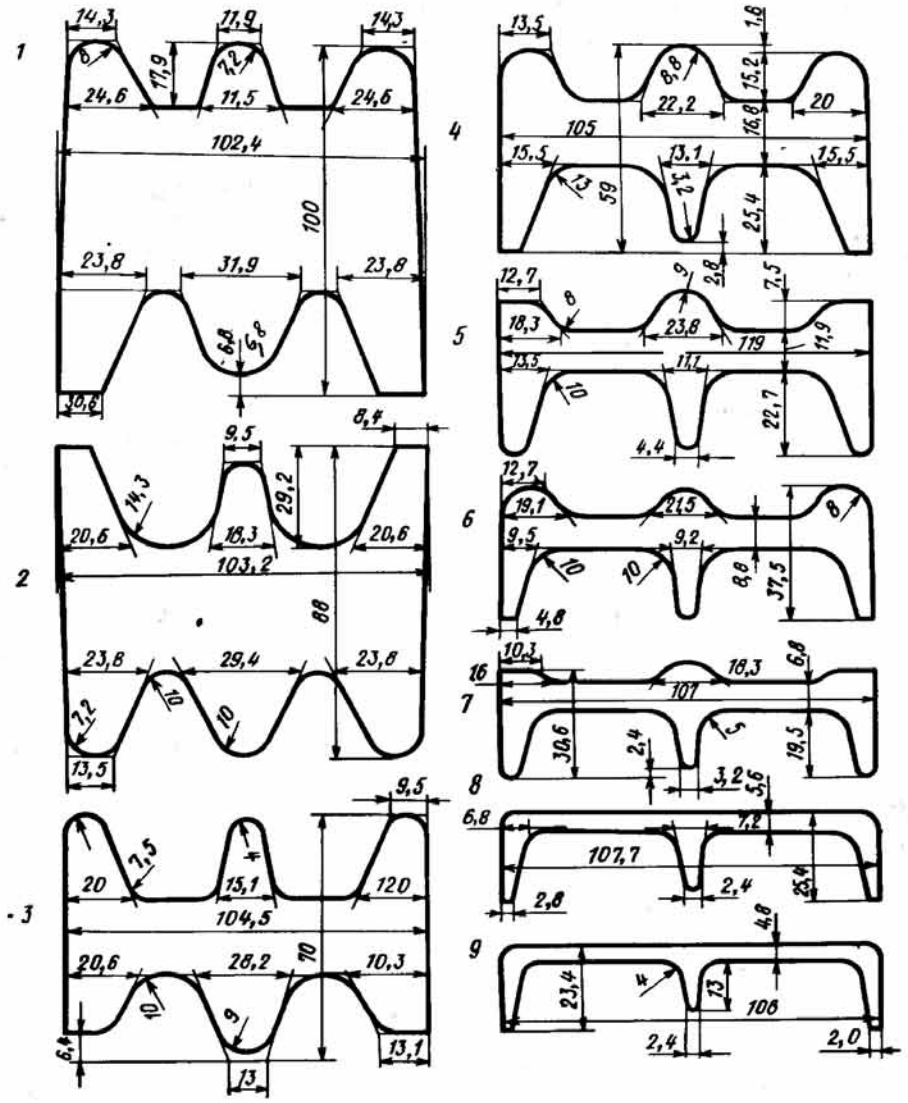


Рис. 207. Калибровка профиля железнодорожной подкладки с одним средним ребром

граней полок почти постоянен в последних четырех проходах (калибры 3÷7). Уклон полок профиля по рис. 208 больше, чем в нормальных швеллерах и поэтому здесь возможны значительные обжатия.

При прокатке профиля ОМ 20-2 для выдвижных частей призабойных металлических стоек шахтного крепления (основным требованием к профилю является его симметричность) схемой калибровки (рис. 209, *а*) предусматривалось 11 проходов со следующим распределением

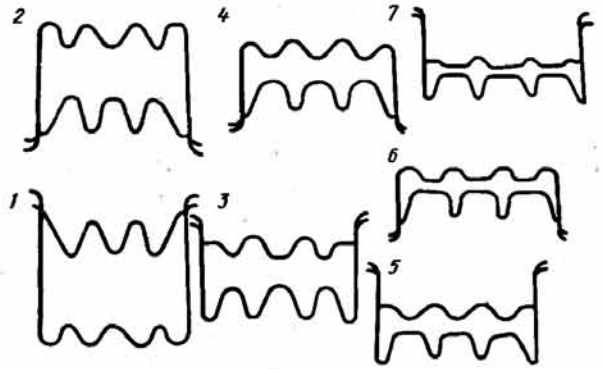


Рис. 208. Схема прокатки железнодорожной подкладки с двумя средними ребрами

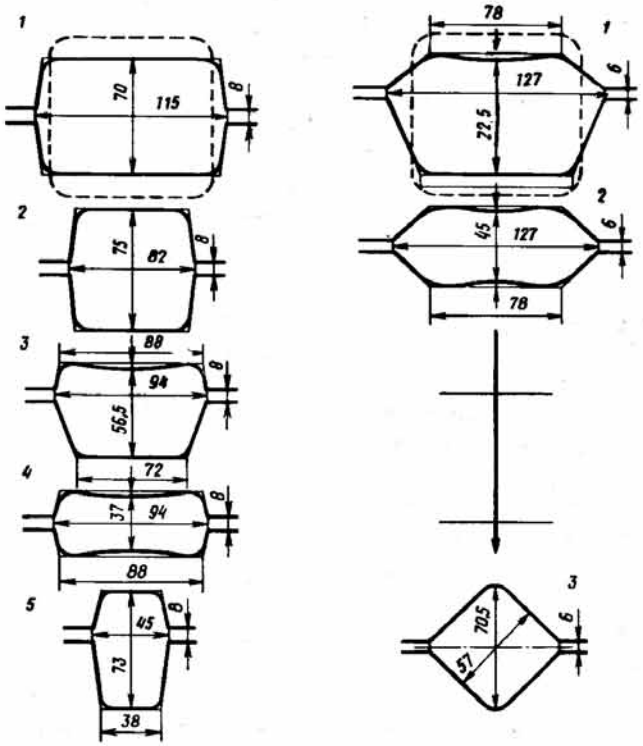
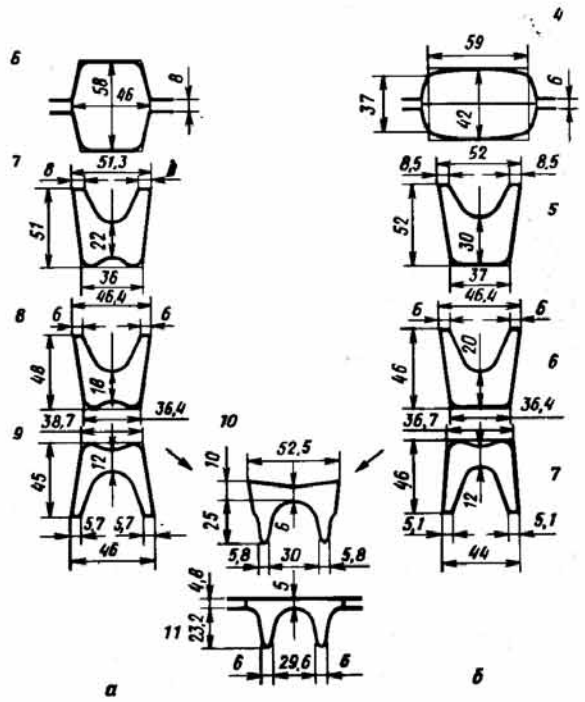


Рис. 209. Калибровка профиля ОМ 20-2 на линейном стане 450 (исходная заготовка 100×100 мм)



Продолжение рис. 209

по клетям: шесть – два – два – один. Заготовки сечением 100×100 мм.

Данная калибровка имела существенные недостатки:

увеличение продолжительности перевалок из-за большого количества вводной и выводной валковой арматуры в клети *I*; сильный износ стенок калибров, особенно ребровых; наличие "ложных" фланцев в калибрах *7, 8* и *9*, что затрудняло изготовление и подгонку проводок; защемление металла в калибре *7* вследствие глубокой разрезки; неустойчивое положение полосы в калибре *9* и вследствие этого несимметрия при контроле стоек по высоте в калибре *10*.

При изменении калибровки (рис. 209, *б*) в клети *I* приняли систему "шестигранник – квадрат", что позволило сократить число проходов, механизировать кантовку полос и передачу их из калибра в калибр с передней стороны клети *I*. Калибры *5* и *6* были выполнены с гладким дном, величина разрезки в разрезном калибре уменьшена с 36 мм до 29 мм. Уменьшена также до 36,7 мм ширина по дну в калибре, предшествующем калибру *10*, что улучшило устойчивость и обеспечило симметрию.

В результате изменения калибровки производительность увеличилась с 9,5 до 12 т/ч.

Применяемая ранее схема прокатки (рис. 210, *а*) профиля клинча-

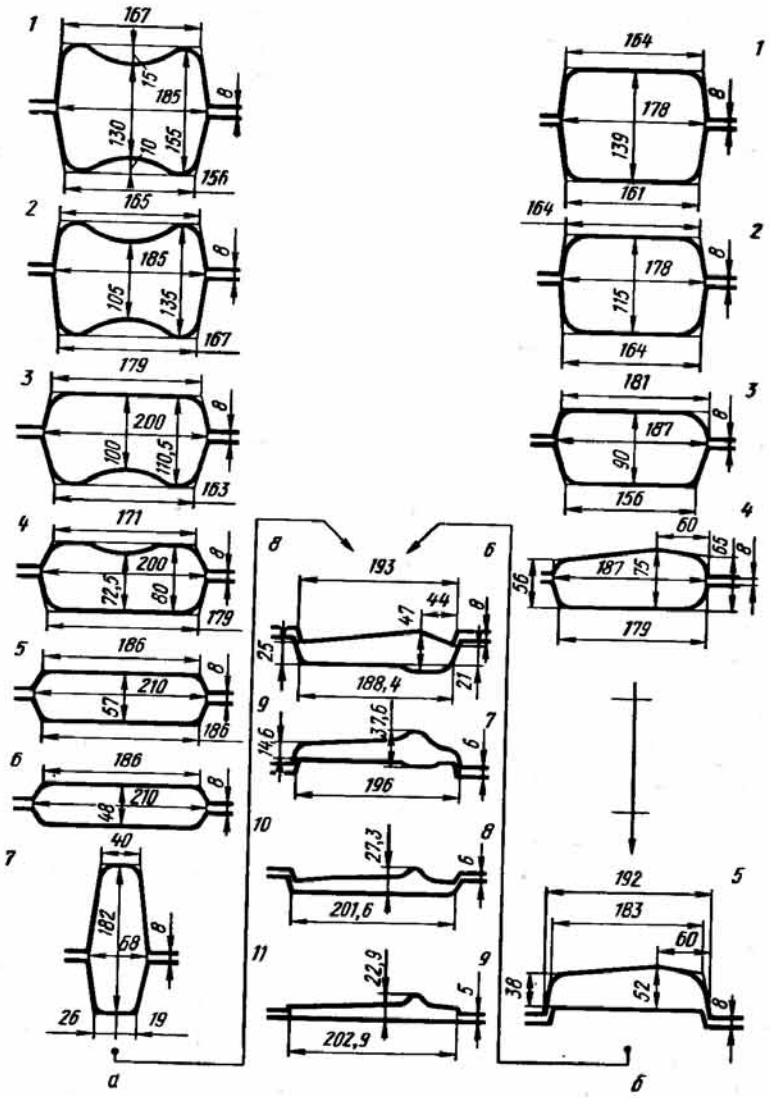


Рис. 210. Калибровка профиля клинчатой подкладки на линейном стане 450 до (*а*) и после усовершенствования (*б*)

той подкладки (рис. 211) имела существенные недостатки: низкая производительность стана при наличии шести проходов в клети *I*; применение ручного труда при передаче полос из калибра в калибр с передней стороны клети *I*, а также для кантовки полос при их задаче в ребровой калибр клети *II* и после реброваго калибра; поломки прокатных валков из-за глубоких врезов ребровых калибров в валки.

Для устранения указанных недостатков калибровку усовершенст-

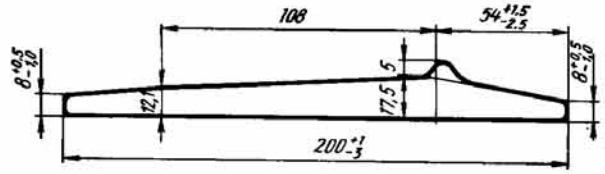


Рис. 211. Профиль клинчатой подкладки костыльного скрепления к железнодорожным рельсам типа Р-24 узкой колеи

вовали (рис. 210, *б*): обжатие от заготовки сечением 160×160 мм до первого фасонного калибра, исходя из условий захвата и опыта работы стана, распределили на пять проходов (рис. 210, *б*), в среднем по 22 мм в каждом; отказались от "разгонных" калибров; в калибрах *3* и *4* со стороны "реборды" применили большие радиусы закругления – 30 мм и 35 мм, способствующие уменьшению ширины; калибр *4* проектировали подготовительным, что обеспечило получение устойчивой ширины полосы 184 мм. Это дало возможность вместо ребрового калибра в клети *II* применить закрытый пластовый калибр *5*, регулировкой которого по высоте и обеспечивается получение ширины готового профиля. Для более надежного захвата на валках клети *I* предусмотрена двухрядная насечка.

Первоначально при опробовании новой схемы на выходе из калибра *5* полоса имела большую серповидность (по ходу прокатки в сторону клети *I*).

Для обеспечения прямого выхода полосы скорректировали режим обжатий. При коэффициентах обжатия 1,47; 1,44; 1,44 (ранее было 1,7; 1,36 и 1,44) по элементам калибра *5*, т.е. изменения обжатия левой части по месту будущей реборды и правой части, серпение значительно уменьшилось. Для предотвращения сколов кромок открытых частей калибров на валках клетей *II* и *III* разъемы калибров за их пределами выполнены с уклоном 30° к вертикали.

Профиль для подрельсовых подкладок метрополитена представляет собой клиновидную полосу (рис. 212) шириной 310 мм с двумя высокими ребордами (54 и 37 мм). Калибровка профиля применительно к рельсобалочному стану 800 металлургического завода им. Петровского выполнена по принципу выдавливания металла в закрытые ручьи верхнего валка путем интенсивного обжатия стенки раскатов в семи закрытых фасонных калибрах. Для повышения устойчивости расстояния между центрами гребней во всех калибрах приняты одинаковыми (153,5 мм).

По разработанной технологии профиль прокатывали из прямоугольной заготовки 240×220 мм из стали марки Ст3кп по схеме: три прохода в черновой и четыре в чистовой двухвалковых клетях.

При первой опытной прокатке профиль не был получен из-за невыполнения высоты большого гребня. Расшифровка осциллограмм пока-

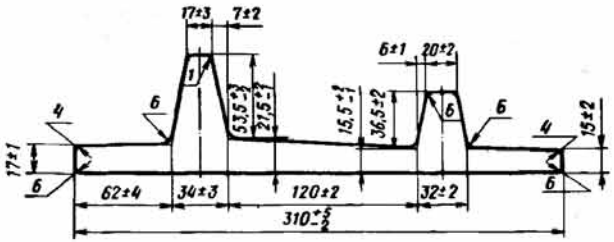


Рис. 212. Профиль для подрельсовых подкладок метрополитена

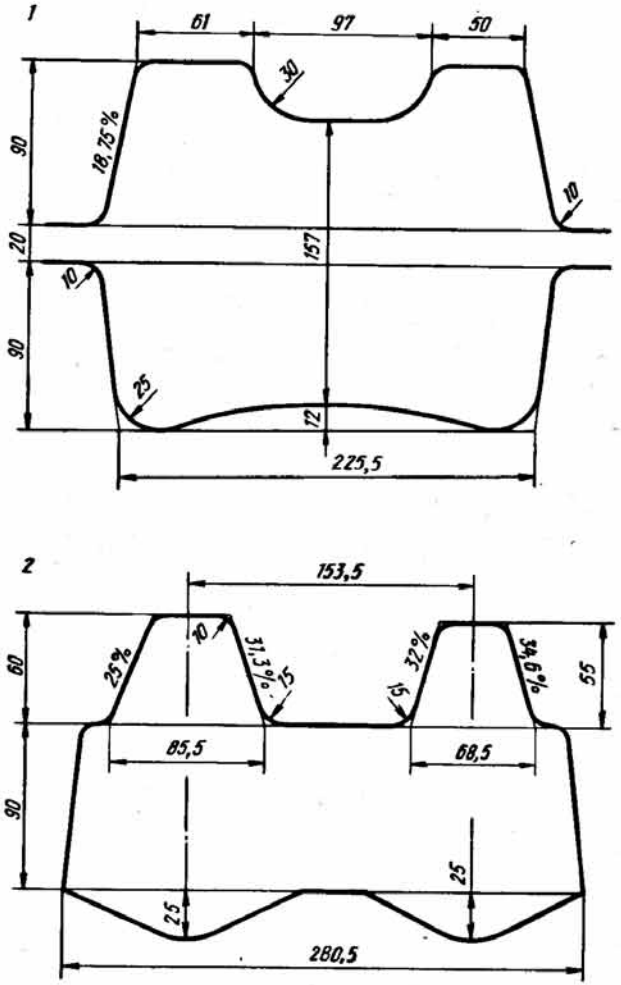
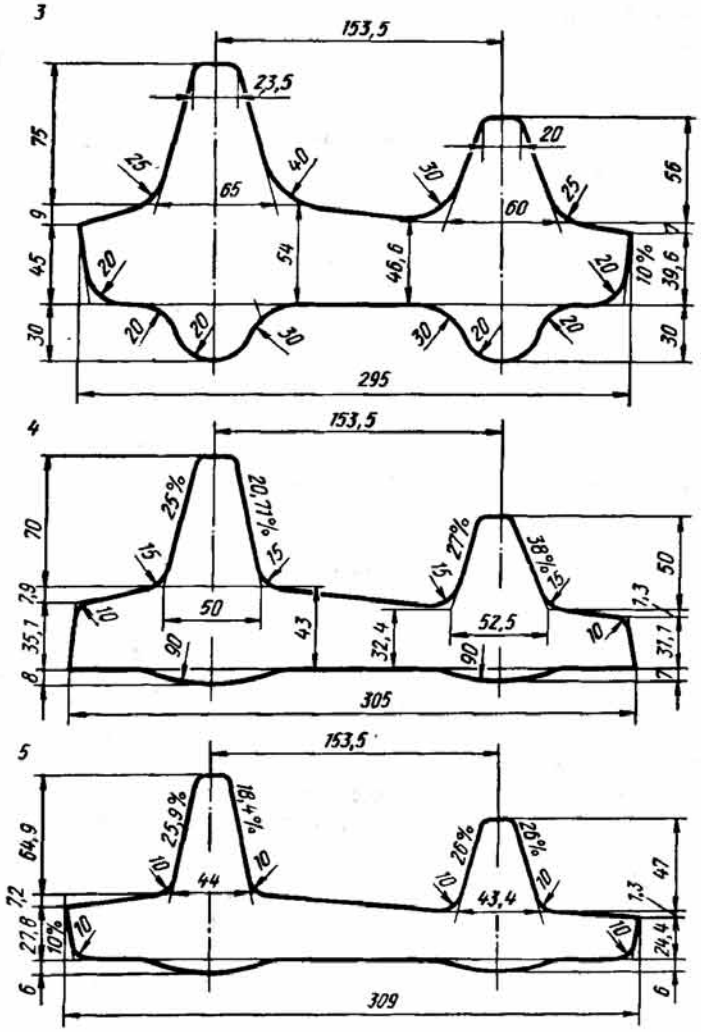


Рис. 213. Фасонный калибр блюминга и скорректированные калибры для прокатки профиля подрельсовых подкладок на рельсобалочном стане 800



Продолжение рис. 213

зала, что по генератору двигателя черновой клети токовые перегрузки по первым трем проходам составили соответственно 116–118; 110–114,9 и 110–115 % номинальных.

При корректировке калибровки (рис. 213) для исключения перегрузок двигателей черновой и чистовой клетей во втором разрезном калибре увеличили толщину стенки до 90 мм вместо 63 мм, уменьшили ложные гребни до 25 мм вместо 45 мм, повысили уклоны гребней. Увеличили ширину калибра до 280,5 мм вместо 278,5 мм и уменьшили высоту гребней (левого до 60 мм вместо 70 мм, правого до 55 мм вместо 65 мм).

В калибре *3* увеличили высоту первого гребня до 75 мм вместо 70 мм, уменьшили ложные гребни до 30 мм вместо 35 мм, увеличили ширину калибра до 295 мм вместо 291,1 мм.

В калибре *4* повысили толщину стенки до 43 мм вместо 38,9 мм и ширину калибра до 305 мм вместо 301,5 мм, а также уклоны внешних граней до 10 вместо 5 %.

В калибре *5* увеличили ширину до 309 мм вместо 305 мм, уменьшили основание левого гребня до 44 мм вместо 44,8 мм, повысили ширину правой части стенки до 54 мм вместо 50 мм.

По скорректированной калибровке получен профиль в соответствии с техническими условиями. Токовые нагрузки генератора двигателя черновой клети по трем проходам составили соответственно 94,93 и 92 % номинальных.

В ПНР для сложных эксплуатационных условий горных выработок в шахтах разработан двухгребневой профиль перекладной балки шириной 100 мм с увеличенной высотой гребней до 58 мм вместо 49 мм. Однако уже при прокатке профиля с высотой гребней 49 мм с использованием четырех традиционных швеллерных и пяти предчистовых и одного чистового двухгребневых калибров столкнулись с рядом трудностей. В процессе разрезки узкой и высокой заготовки в швеллерных калибрах происходила интенсивная утяжка фланцев, которая увеличивалась при дальнейшем формировании гребней в закрытых ручьях двухгребневых калибров. Кроме того, формирование профиля происходило с несимметричными по высоте гребнями и с различной шириной внешних частей полотна.

Поэтому для прокатки профиля сечением 100×58 мм разработали новую калибровку (рис. 214), в которой использовали ящичный калибр *3* для уменьшения ширины фланцевого раската. Это позволило увеличить толщину исходного сечения с 55 мм до 70 мм и уменьшить утяжку полок (фланцев). Для уменьшения утяжки полок в швеллерных калибрах *1, 2, 4* и *5* применили интенсивное обжатие концов открытых полок по толщине с коэффициентами деформации 1,33–1,38. В двухгребневых калибрах *6–9* среднее значение коэффициентов деформации у основания гребней равно 1,15, а на концах – 0,95 – 0,98. При прокатке профиля по новой технологии получены положительные результаты. Профиль имеет гребни одинаковой высоты с хорошо проработанными кромками. Асимметрии выступов полотна не наблюдалось.

Для снижения трудоемкости изготовления и повышения эксплуатационных качеств гусениц УкрНИИметом совместно с Ковровским экскаваторным заводом проведены исследования по замене литых башмаков прокатанными.

Технологию прокатки нового профиля отрабатывали на полупромышленном одноклетевом стане 550. Калибровка выполнена по способу прокатки полосотавровых профилей в шести закрытых фасонных калибрах с чередованием разъемов валков. Для упрощения расчета

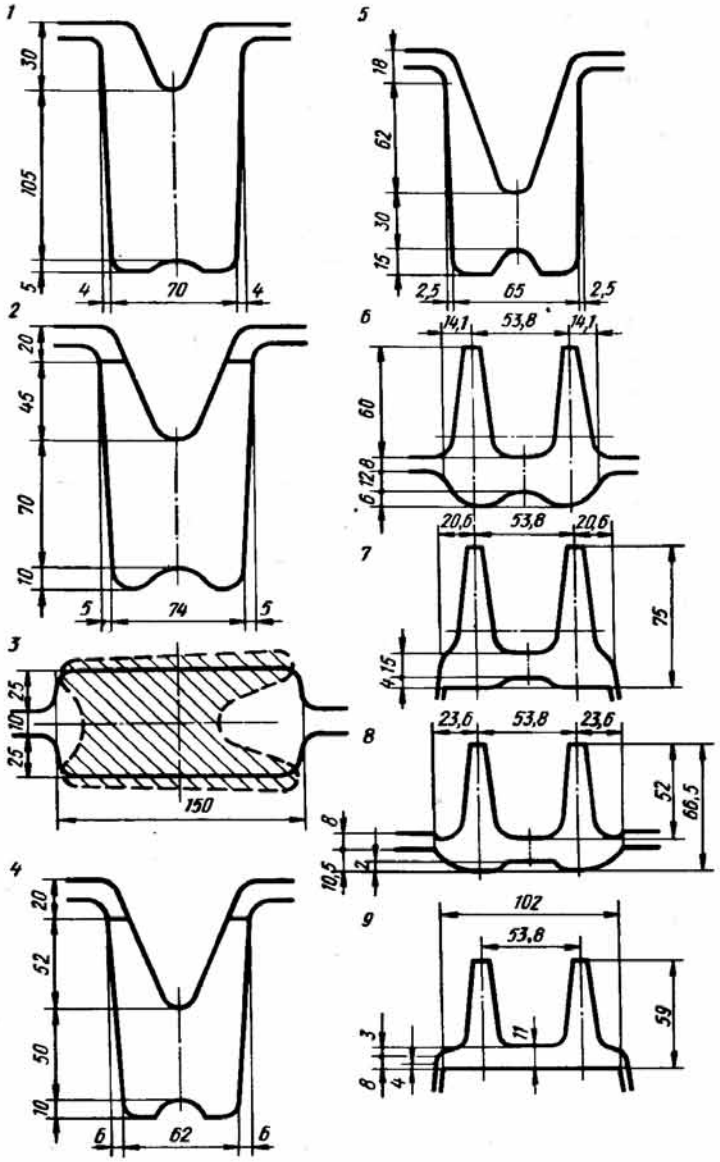


Рис. 214. Калибровка двухгребневого профиля перекладной балки 100×58 мм для горных выработок (исходное сечение 148×70 мм)

калибровки профиль условно разделили на ряд простейших элементов. При распределении коэффициентов деформации по сечению учитывали возможную утяжку гребней в закрытых ручьях, а также условие свободного входа раската в последующий калибр.

Размеры чистового калибра определяли с учетом коэффициента термического расширения металла и минусовых допусков на размеры

готового профиля, предчистового – с учетом коэффициентов обжатий по полотну (1,25), по основанию гребней и их вершинам (1,08 и 1,0) при уклоне 18°; для третьего против хода прокатки и последующих калибров коэффициенты деформации приняли соответственно 1,4–1,6; 1,13–1,18; 1,05–1,1; уклон их боковых плоскостей составил 15–20°. Во всех калибрах были предусмотрены ложные фланцы. В предчистовом и чистовом калибрах относительное обжатие гребней принято несколько большим, чем полотна, что способствует правильному их формированию. Из-за несимметричной формы калибров положение раската при прокатке оказывается неустойчивым. Для повышения устойчивости расстояние между центрами гребней во всех калибрах приняли одинаковыми; это обеспечивает равномерное боковое обжатие гребней и центрирование раската в калибрах.

Неравномерность деформации предусматривалась в первых трех калибрах по ходу прокатки, в последующих – равенство коэффициентов вытяжек по всем элементам профиля; во всех калибрах (кроме хвостовой части чистового) принято стесненное уширение.

Анализ отобранных темплетов позволил сделать следующие выводы:

– в первых двух калибрах по ходу прокатки, когда боковые грани полосы еще не полностью пришли в соприкосновение с боковыми стенками калибров, наблюдается некоторое незаполнение их отдельных участков;

– в калибрах *3* и *4* возникает частичное переполнение левого гребня из-за предусмотренного в калибре *2* ложного фланца. В процессе прокатки этот дефект был устранен за счет перекрытия линейками калибра в месте переполнения, но это отрицательно сказалось на работе валковой арматуры;

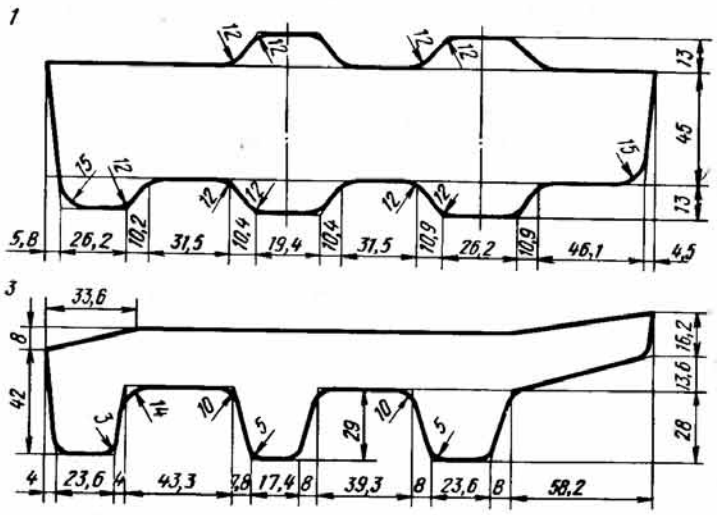
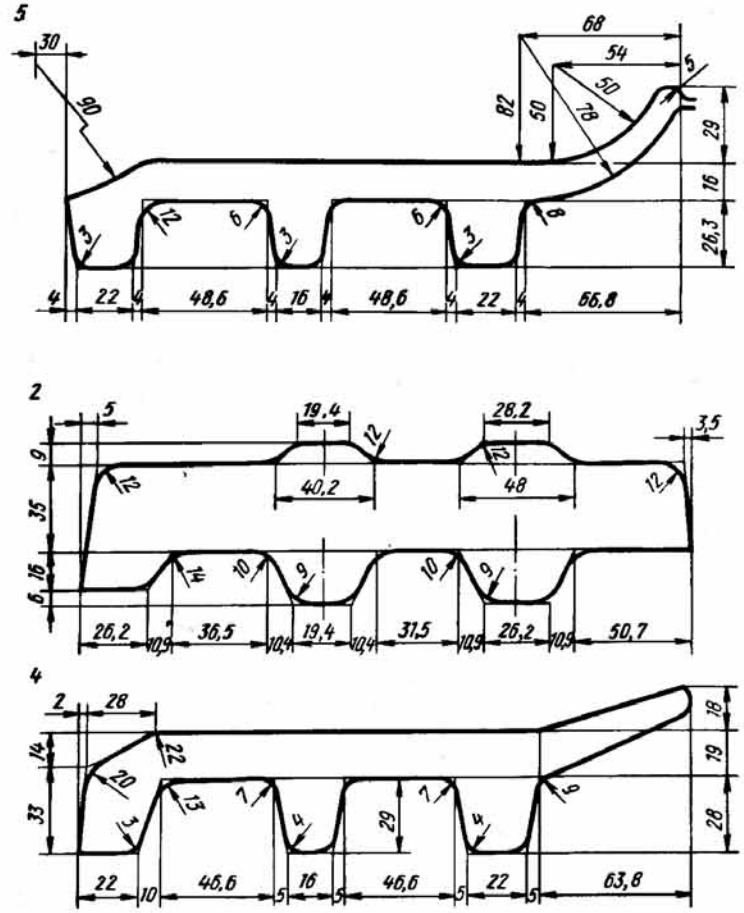


Рис. 215. Калибровка унифицированного профиля для башмаков гусениц экскаваторов на линейном стане 585 (исходное сечение 229×71 мм)



Продолжение рис. 215

– во всех калибрах коэффициент бокового обжатия гребней у основания больше, чем при вершине, исключение составляет лишь чистовой калибр, в котором боковое обжатие по всей высоте гребней равномерно;

– во всех калибрах имеется приращение высоты гребней, за исключением предчистового и чистового, в которых осуществляется осадка гребня по высоте, что положительно сказывается на их формировании.

Промышленные испытания экспериментальных экскаваторов с прокатанными башмаками подтвердили перспективность проведенных исследований. Поэтому в содружестве с экскаваторными заводами был разработан сортамент унифицированных профилей, которые могут

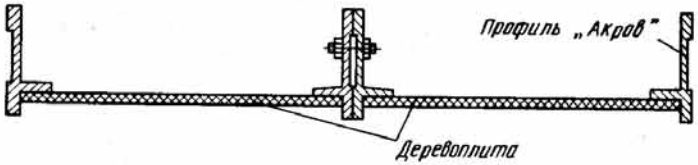


Рис. 216. Мелкоразмерная опалубка, изготовленная с помощью профиля "Акров"

быть прокатаны в одних и тех же калибрах. Калибровка унифицированного профиля для башмаков гусениц была испытана на полупромышленном стане 550.

Опытные партии унифицированных профилей успешно выдержали испытания. Была разработана калибровка (рис. 215) для линейного трехклетевого стана 585 Константиновского метзавода. Профили получены с первой опытной прокатки и поставлены потребителям в объеме 500 т.

Благодаря повышению срока службы гусениц в 2,5 раза, экономии металла и сокращению трудовых затрат экономический эффект от внедрения должен составить более 4,2 млн.руб.

В Польской народной республике для производства мелкоразмерной опалубки, применяемой при изготовлении строительных конструкций из бетона, разработали сложный профиль с ребром жесткости "Акров". Преимуществом такой опалубки (рис. 216) по сравнению с деревянной является возможность ее многократного использования (200–400 раз вместо 1–2 раз при обычной конструкции).

Первоначальный вариант калибровки профиля "Акров" предусматривал формирование профиля из заготовки квадратного сечения за 9 проходов. Для контроля ширины профиля применяли ребровой предчистовой калибр. Однако из-за интенсивного скручивания раскатов, обусловленного неравномерным обжатием гребня (стенки) и кромок полотна, предчистовой ребровой калибр заменили пластовым. Опытное опробование второго варианта калибровки показало, что скручивание раскатов наблюдалось в чистовом калибре вследствие разницы в обжатии левой и правой частей профиля.

В окончательном варианте (рис. 217) вместо пластового калибра применили калибр, имеющий промежуточную форму между ребровым и пластовым калибрами.

Это позволило улучшить качество профиля благодаря более равномерной деформации раската. Опыт ПНР в производстве профиля "Акров" рекомендован для распространения в странах -- членах СЭВ.

Промежуточные рельсовые скрепления делятся на нераздельные, раздельные и смешанные. Для нераздельных и смешанных скреплений используют подкладки со сравнительно низкими (около 10 мм) ребордами. Подкладки раздельных скреплений отличаются более высокими (до 40 мм) и массивными ребордами.

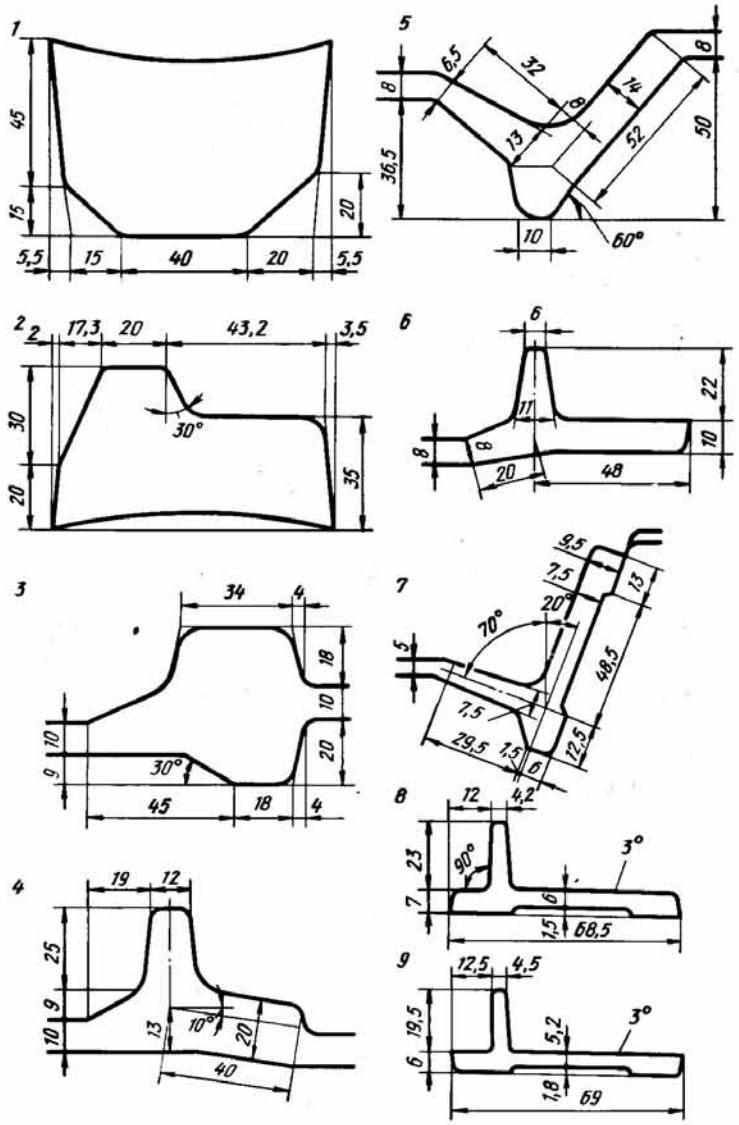


Рис. 217. Калибровка профиля "Акров" для мелкоразмерной опалубки

Производство подкладок сосредоточено на крупносортных и рельсобалочных станах металлургических комбинатов "Азовсталь", КМК, Макеевском и Салдинском металлургическом заводе.

Профили подкладок прокатывают в 8–10 фасонных калибрах из заготовок прямоугольного и квадратного сечения. Наличие у подкладок двух реборд исключает возможность применения ребровых калибров для уменьшения толщины и увеличения высоты реборд. Для хо-

рошего выполнения реборд высота исходной заготовки должна в 3,3–4 раза превышать высоту готового профиля. Квадратные заготовки задают по диагонали. Преимущество этой схемы прокатки заключается в том, что реборды и полки, являющиеся наиболее ответственными элементами подкладок, формируются из угловых частей заготовки, менее всего пораженных поверхностными дефектами.

Профили подкладок прокатывают в закрытых калибрах. В первом фасонном калибре формируются реборды и противореборды, способствующие лучшему затеканию металла в закрытые элементы калибров. В следующих по ходу прокатки калибрах наряду с уменьшением толщины профиля производится небольшое боковое и высотное обжатие реборд. Последнее выбирается несколько большим, чем величина высотной утяжки реборд, и принимается равным 2,5–5,0 мм в черновых калибрах и 1,5–3,0 мм в чистовых. Для улучшения заполнения металлом закрытых элементов калибров осуществляется интенсивная высотная деформация противореборд (3–14 мм).

При анализе действующих калибровок профиль подкладки условно делили на 5 элементов: две крайние полки, две реборды и среднюю межребордную часть (рис. 218).

По найденным значениям коэффициентов строили графики распределения λ и $1/\eta$ по калибрам.

Анализ графиков позволил выявить следующие общие закономерности в построении калибровки.

1. Коэффициенты деформации $1/\eta_i$ плавно уменьшаются от черновых к чистовому калибру.

Коэффициент деформации у основания реборды больше, чем на конце, в черновых калибрах – на 5–18 %, в чистовых – на 1,6–5,5 %. Коэффициенты высотной деформации противореборд плавно увеличиваются от черновых к чистовым калибрам.

2. Частные вытяжки изменяются по более сложному закону, чем коэффициенты деформации. Коэффициенты вытяжки реборд обычно плавно уменьшаются от черновых к чистовому калибру, а коэффициенты вытяжки крайних полок и средней части профиля в первых двух-трех калибрах сначала увеличиваются, затем уменьшаются. Однако во всех случаях коэффициенты вытяжки реборд больше коэффициентов вытяжки полок и средней межребордной части профиля.

Анализ уширения металла при прокатке профиля подкладок показывает

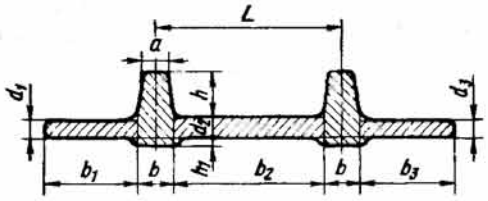


Рис. 218. Разбивка профиля подкладки на элементы

$$\Sigma\Delta b/\Sigma\Delta h_{ср} = 0{,}35 - 0{,}55.$$

Причем отношение уширения к средней величине обжатия для черновых калибров находится в пределах 0,26–0,76, а для чистовых – 0,47–1,43.

Профили подкладок имеют малые уклоны внутренних боковых поверхностей реборд. При прокатке в месте сопряжения реборды со средней межребордной частью профиля возможно образование заката.

Поэтому размеры реборд и межребордные расстояния в калибрах выбираются такими, чтобы обеспечивалось самоцентрирование раската при входе в калибр. На комбинате "Азовсталь" при прокатке подкладки К2-65 с целью устранения закатов принимается постоянным для всех калибров расстояние между концами реборд. В некоторых случаях, например, при прокатке подкладок на КМК принимается постоянным расстояние между осями реборд.

Анализ действующих калибровок показал, что профили подкладок прокатывают на металлургических заводах без особых затруднений и что применяемые калибровки обеспечивают получение подкладок с высотой реборд до 40 мм.

Однако в последние годы появилась потребность в освоении новых типов железнодорожных подкладок с тонкими и высокими (до 55 мм) ребордами. Существующими способами прокатки, основанными на прямом выдавливании реборд, получить такие реборды невозможно из-за осаживающего действия боковых стенок закрытых элементов калибров. Только балочный способ обеспечивает получение подкладок практически с любым соотношением высоты и толщины реборд.

Новая башмачная полоса для тракторов мощностью 330 и 500 л.с. должна обеспечить работу гусеничной ленты в условиях скальных грунтов в течение 2000 ч. Для удовлетворения этим требованиям на новом профиле оказалось необходимым увеличить толщину полок на 11 %, толщину и высоту почвозацепа (шпоры) соответственно на 12,5 и 14,3 % и ширину длинной полки на 26 % по сравнению с существующими размерами башмачной полосы для 250-сильных тракторов. Общая ширина профиля достигла при этом 272 мм, а высота 100 мм, что значительно превышает габариты ранее освоенных профилей. Для экономии металла на нерабочей плоскости нового профиля против основания шпоры предусмотрели пережим размером 3×30 мм. Кроме того, вместо стали 45 использовали износостойкую, но труднодеформируемую сталь 40Г.

Основные затруднения при прокатке башмачных полос связаны с несимметричностью профиля и сложностью получения шпоры, деформируемой на последней стадии прокатки последовательно в закрытых ручьях пластовых калибров: чем больше высота шпоры и разность ширины длинной и короткой полок, тем сложнее обеспечить стабильность основных размеров профиля.

Новый профиль Т-330 имеет наибольшую асимметричность ширины

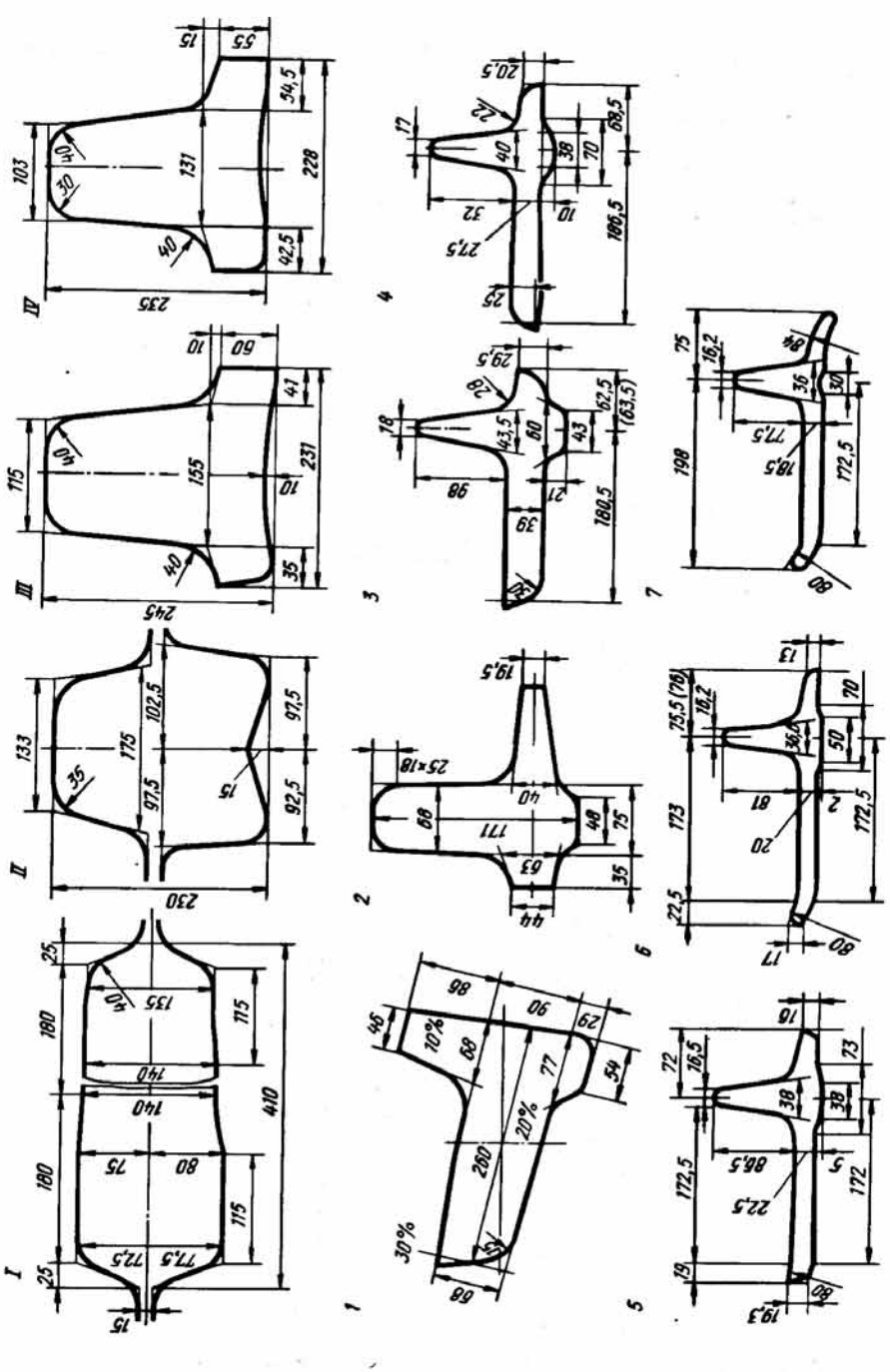


Рис. 219. Калибровка для прокатки башмачной полосы Т-330 (в скобках размеры после корректировки калибровки)

полок и максимальную высоту шпоры по сравнению с прежними однотипными профилями.

При разработке калибровки профиля Т-330 за основу приняли принципиальную схему прокатки, применяемую для тракторного башмака типа ДЭТ-250, предусматривающую использование девяти фасонных калибров, в том числе двух трапецеидальных *II* и *III*, одного промежуточного наклонного *1*, реброваго *2* для разгона высоты шпоры и пяти башмачных *3–7* (рис. 219).

Опыт прокатки башмачной полосы ДЭТ-250 показал, что для такой компоновки калибров предельная высота шпоры составляет 70 мм. Новый профиль Т-330 имеет шпору высотой 80 мм, что и обусловило особенности его калибровки.

Для получения профиля со стабильной высотой шпоры на чистовой линии потребовался дополнительный разгонный ребровой калибр типа калибра *2*. Однако использование такого калибра снизило бы технологичность прокатки из-за трудностей, связанных с дополнительной кантовкой длинного и недостаточно жесткого раската.

Поэтому решили выполнить дополнительный разгон высоты шпоры не на чистовой, а на обжимной линии, для чего предусмотрели третий трапецеидальный калибр *IV*, для прокатки в котором не требуется дополнительной кантовки.

Кроме того, для обеспечения лучшего заполнения калибра *II* ящичный калибр *I* сделали несимметричным относительно вертикальной и горизонтальной осей.

На стане 500 линейного типа освоена прокатка нового экономичного фасонного профиля из высокопрочной стали. Отличительные особенности его – асимметрия относительно обеих осей и большая разница в длине полок и ножки (113 и 18 мм). Ножка профиля, угол наклона боковых граней которой 6°, смещена от середины на 29,5 мм. Заготовка – полоса сечением 73×110 мм.

Схема прокатки профиля (рис. 220) предусматривает его формирование в шести фасонных калибрах с двумя кантовками на 90°. Первый калибр *1* с нижним разъемом предназначен для образования на полосе двух элементов; ребровой калибр *2* с разъемом посередине, несимметричный относительно обеих осей, регулирует степень заполнения следующих за ним калибров; полузакрытый калибр *3* образует на полосе два элемента и формирует ножку профиля; в контрольном калибре *4*, выполненном с разъемом сверху, формируются четыре элемента; в предчистовом калибре *5* полузакрытом формируется ножка профиля и выступ на его полке (окончательно). Отделочный калибр *6* открытый. По принятой схеме элементы профиля формируются за счет высотной деформации во всех калибрах, кроме реброваго, в котором направление деформации меняется.

В соответствии с назначением калибров средние коэффициенты вытяжки приняты следующими: 1,1; 1,2; 1,13; 1,11; 1,33; 1,13 (по ходу прокатки). Для калибров *2* и *5* выбраны более высокие коэффициенты деформации, что обусловлено значительным изменением в них кон-

фигурации профиля (образованием ножки). В остальных принятые коэффициенты вытяжки обеспечивают надежный захват металла валками и не требуют больших затрат энергии на его деформацию.

В калибре *6* вытяжка элементов профиля равна 1,13–1,14. Равномерная деформация полосы по ширине в нем необходима для получения профиля без серповидности и скручивания. Кроме того, она препятствует перетеканию металла между элементами и уменьшает опасность утяжки ножки профиля. В предчистовом калибре *5* вытяжка элементов по ширине полосы также равномерна, отклонение от среднего значения не превышает 2,2 %. В контрольном калибре *4* распределение коэффициентов вытяжки по элементам неравномерно, но почти симметрично. Вытяжка центральных элементов больше вытяжки крайних. Это создает благоприятные условия для формирования ножки профиля.

Коэффициент высотной деформации распределяется равномерно только в чистовом калибре. В калибрах *1* и *3* для элемента *I* коэффициент высотной деформации соответственно 1,04 и 1,19, а для элемента *II* 1,26 и 1,64. Такая разница в деформации приводит к утяжке элемента *I* в калибре *1* и к вынужденному уширению элемента *II* в калибре *3*. В результате коэффициенты вытяжки полосы при прокатке в этих калибрах выравниваются. Как показали анализ конфигурации темплетов и расчет деформации, коэффициенты вытяжки элементов для калибра *1* оказались равными, а для калибра *3* отличались на ~2 %. Верхний ручей реброваого калибра со стороны элемента *II* выполнен несимметричным, что создает дополнительный простор на уширение в калибре *3* и препятствует появлению заусенца в его разъеме.

Запас простора на уширение рассчитывали с учетом вынужденного уширения элемента *II* и ограничивающего действия стенки калибра. Коэффициент смещения этого элемента (отношение площади смещаемой по ширине, к площади, смещаемой по высоте) был принят 0,25. При расчете уширения в калибрах *4*, *5* и *6* исходили из условия, что общее уширение полосы зависит от уширения крайних элементов, которое рассчитывалось по формуле для прокатки на гладкой бочке. При конструировании калибров *4* и *5* простор на уширение выбрали равным расчетному уширению крайних элементов. В случае превышения фактического значения над расчетным полоса прокатывается со стесненным уширением.

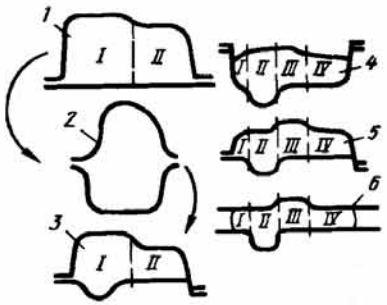


Рис. 220. Схема прокатки профиля с разбивкой калибров на элементы

Калибровки профилей с ребрами жесткости приведены на рис. 221–233.

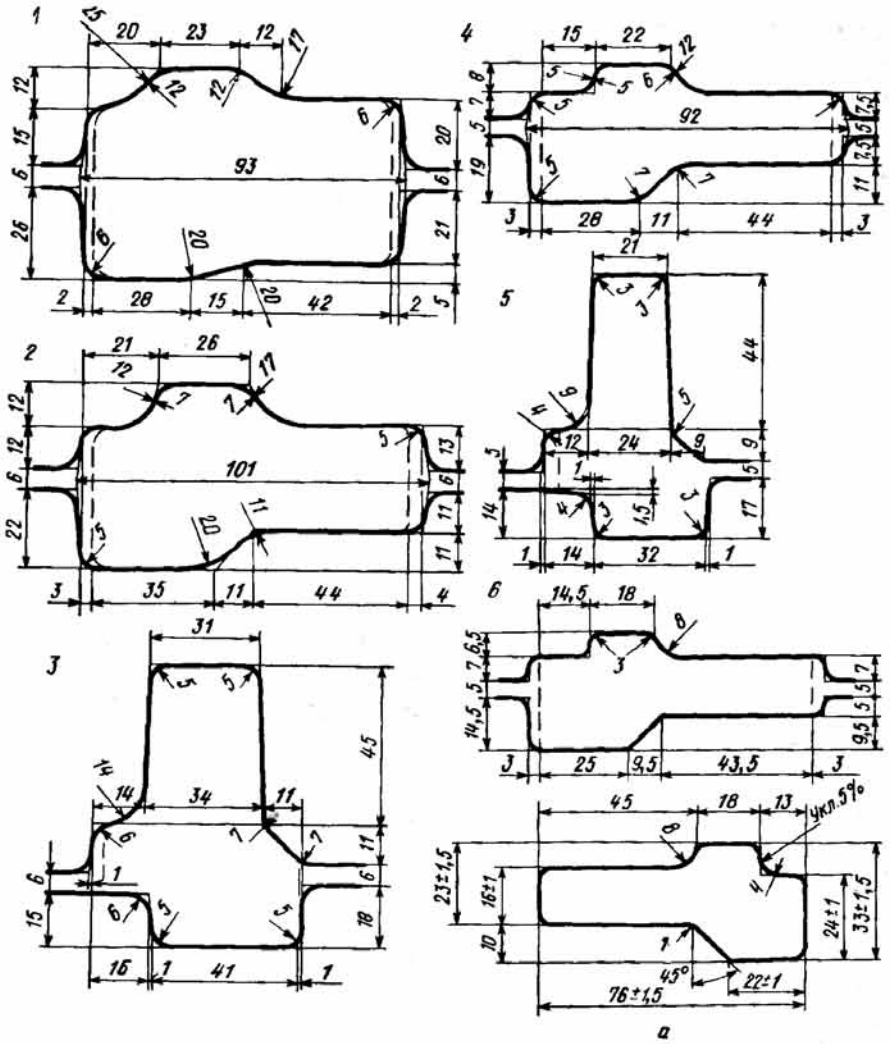


Рис. 221. Калибровка профиля для колец иллюминаторов на линейном стане 500 (исходное сечение 75×75 мм; *а* – готовый профиль)

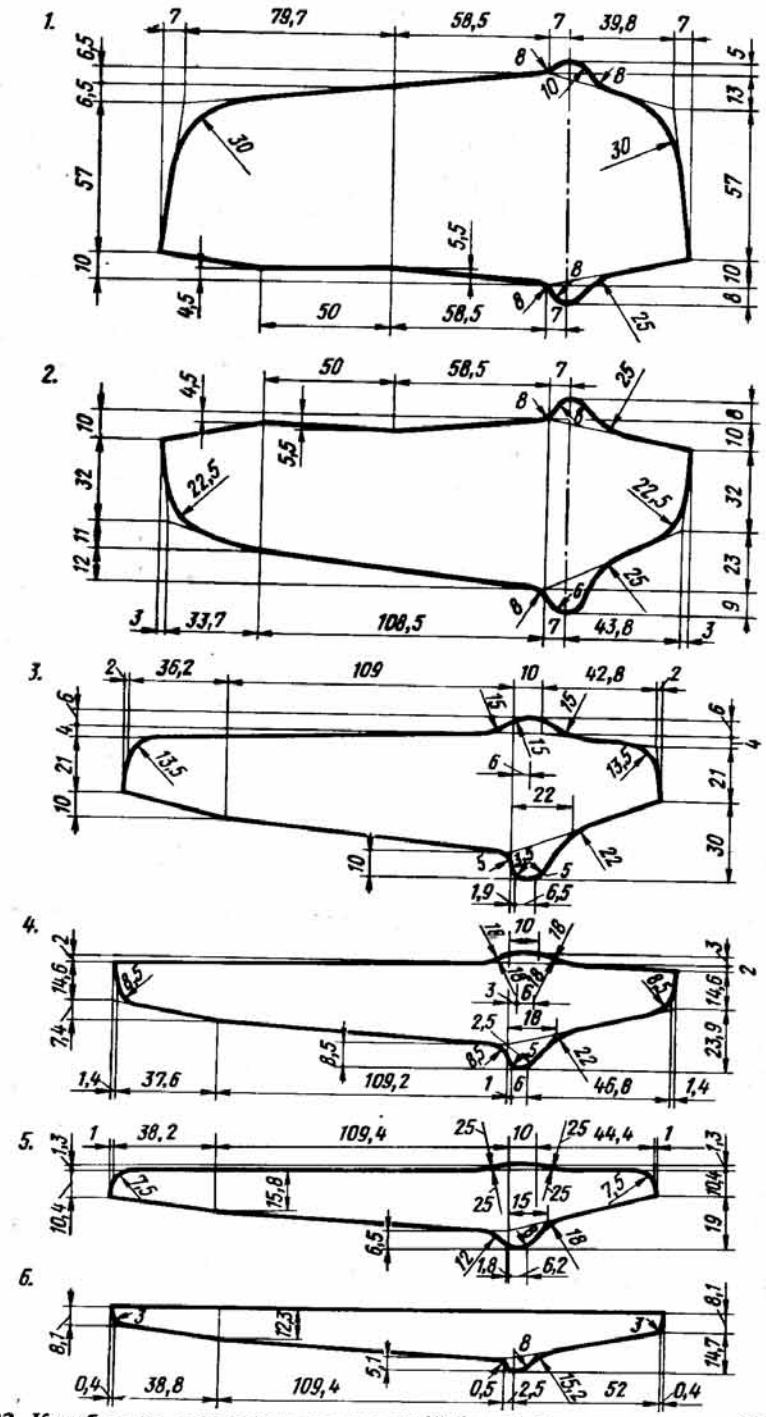


Рис. 222. Калибровка подкладки клинчатой № 4 и № 5 к рельсам типа Р18 и Р24 на линейном стане 600 (исходное сечение 185×93 мм)

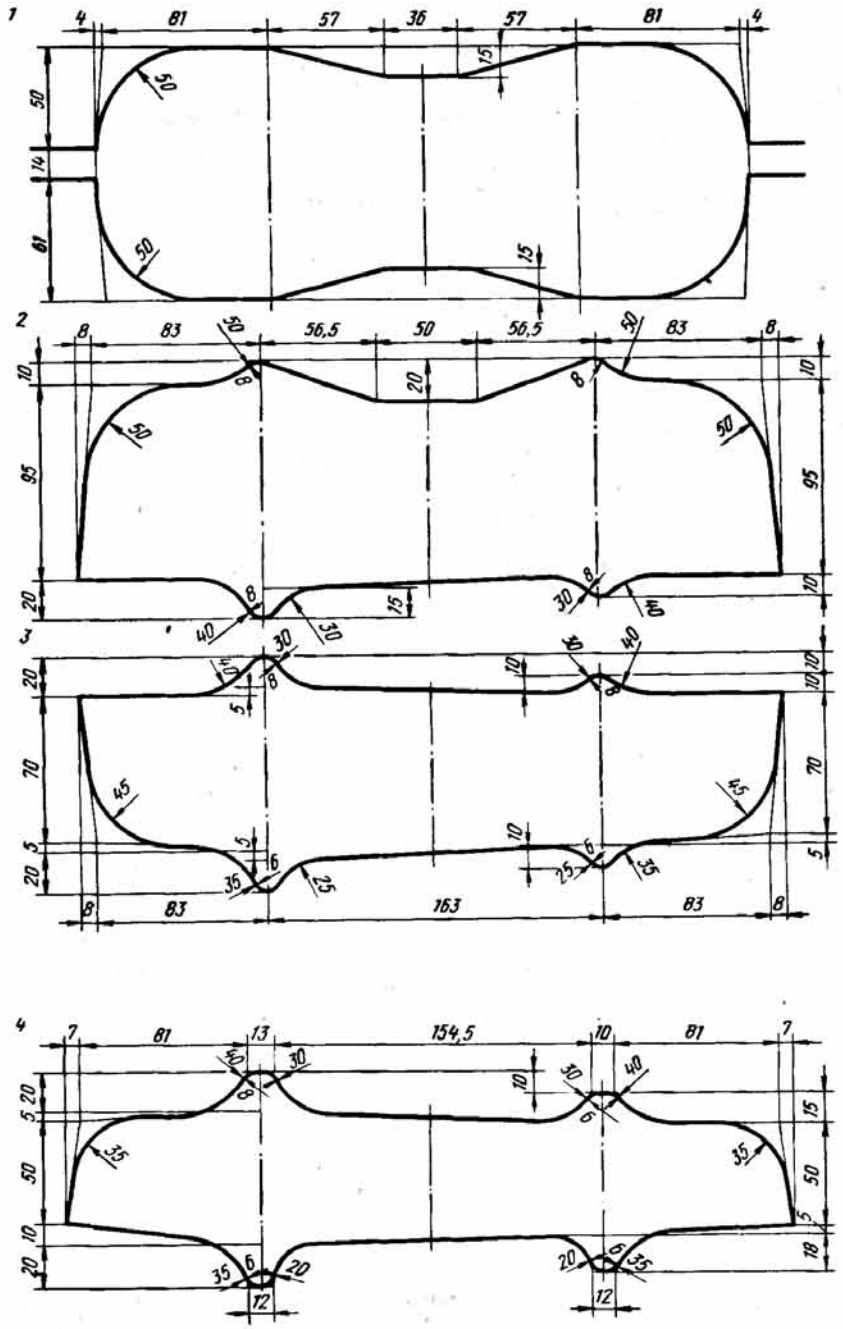
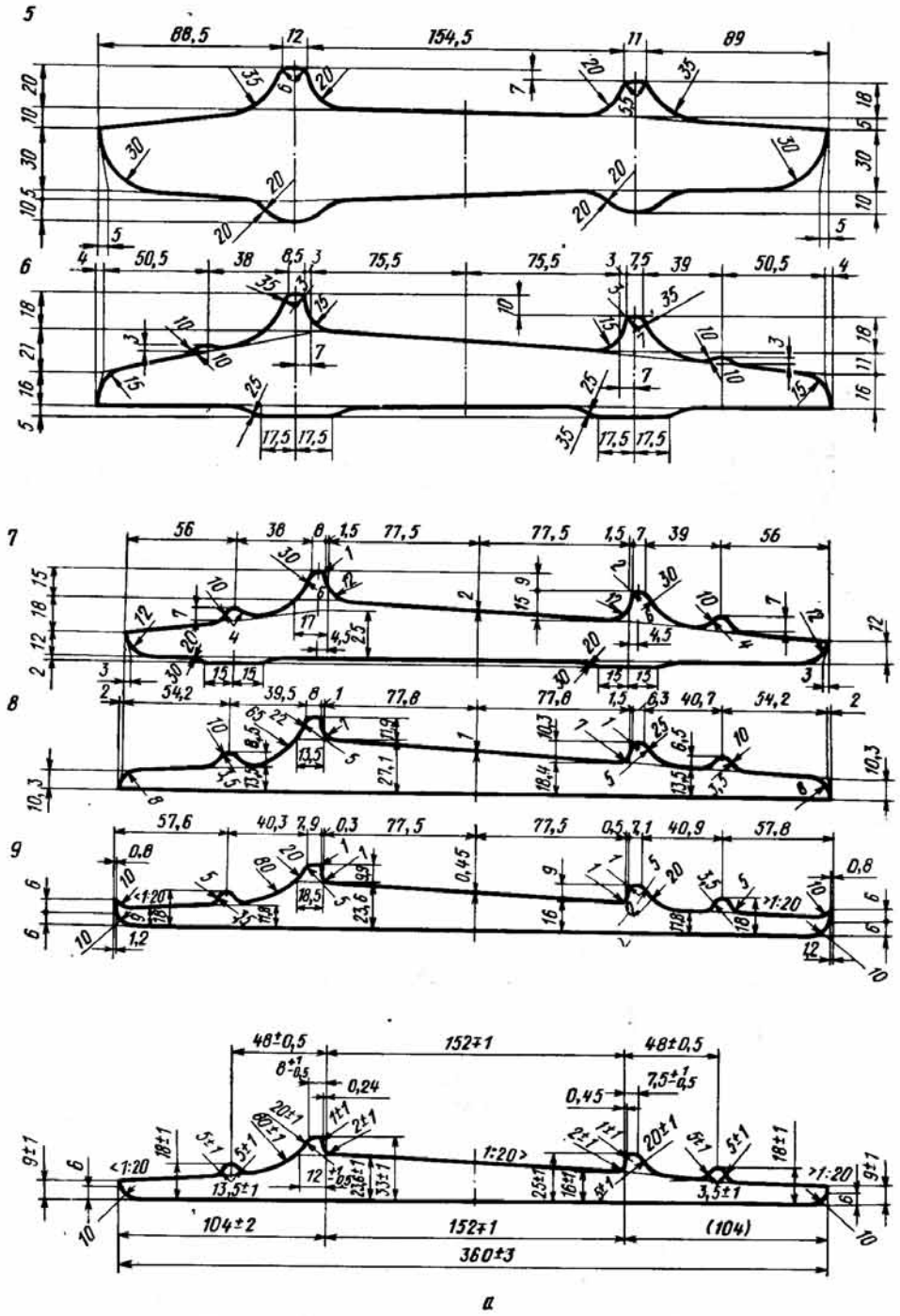


Рис. 223. Калибровка профиля подкладки типа Д-65 на линейном стане 850 (исходное сечение 320/312×125/88 мм; *а* – готовый профиль)



Продолжение рис. 223

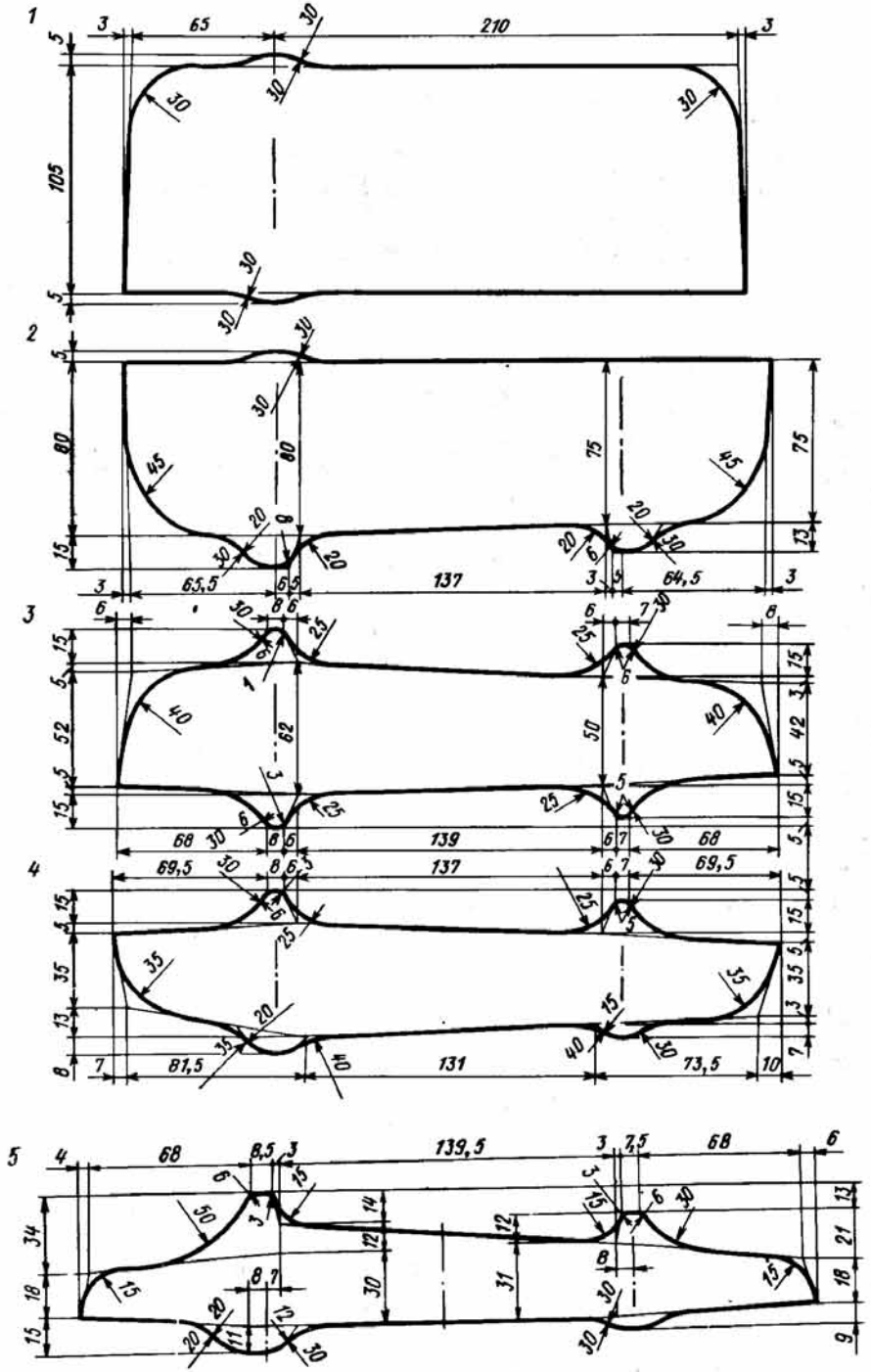
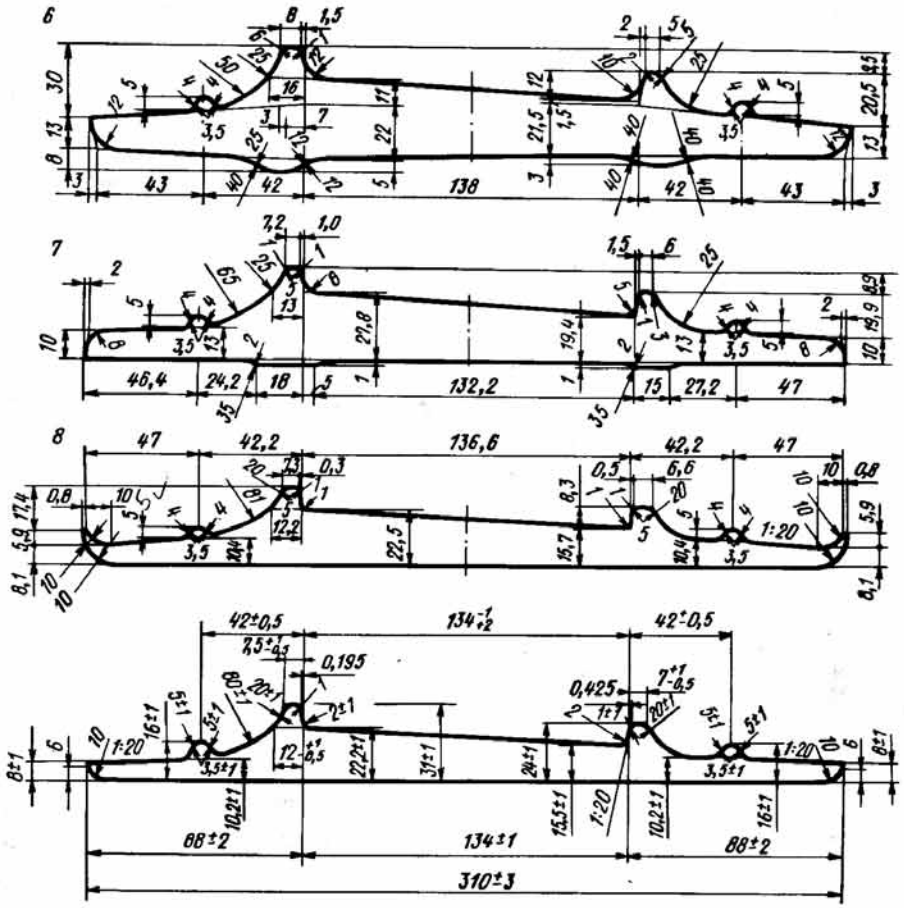


Рис. 224



а

Рис. 224. Калибровка профиля подкладки типа Д-50 на линейном стане 850 (исходное сечение 280/272×125/115 мм; *а* – готовый профиль)

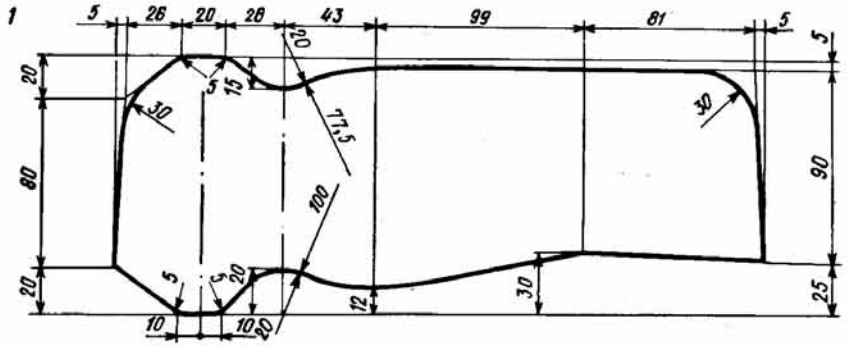
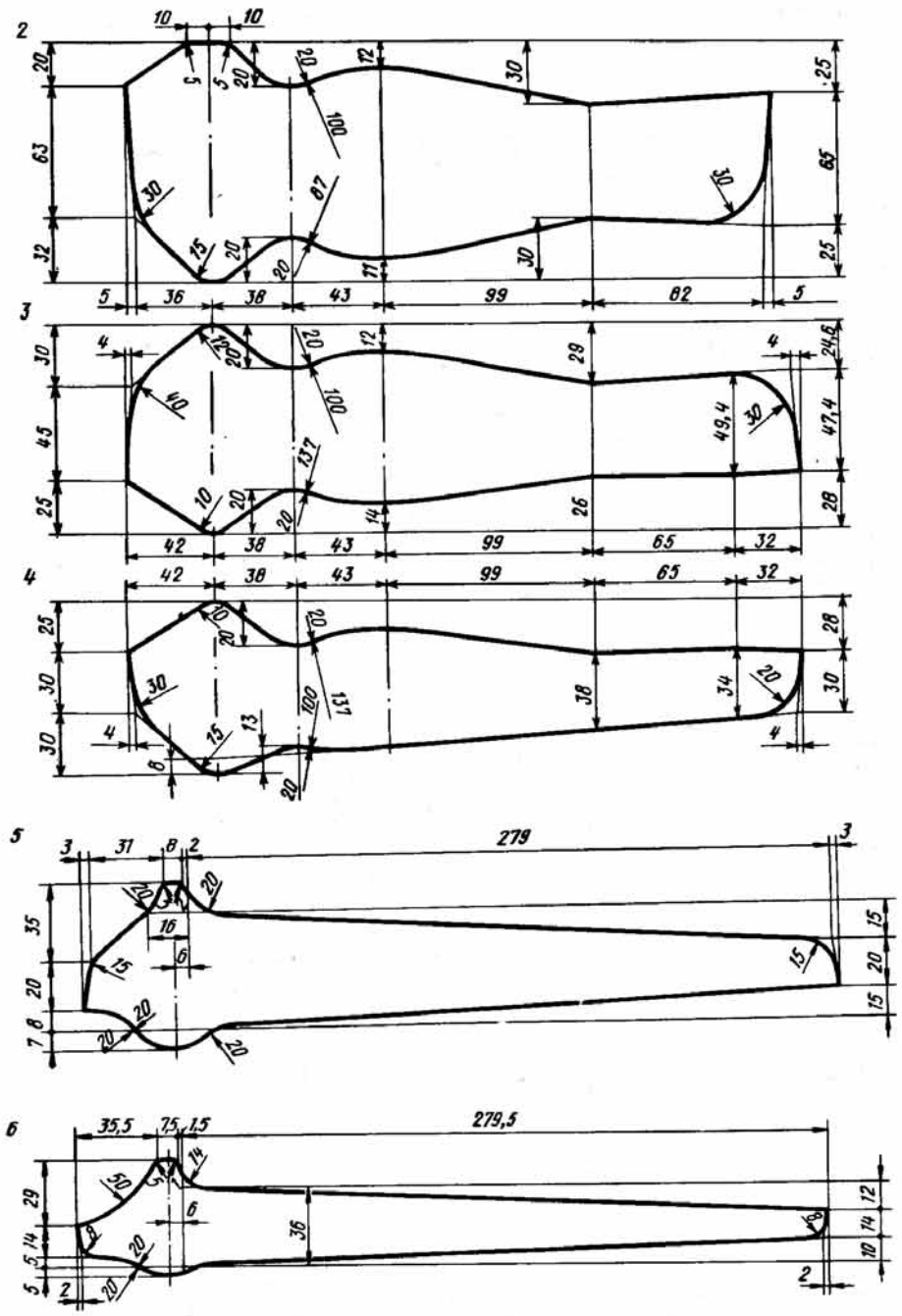


Рис. 225. Калибровка профиля подкладки изолирующего стыка на линейном стане 850 (исходное сечение 280/272×125/115 мм, калибры *1* и *2,3* и *4* – сопряженные; *а* – готовый профиль)



Продолжение рис. 225

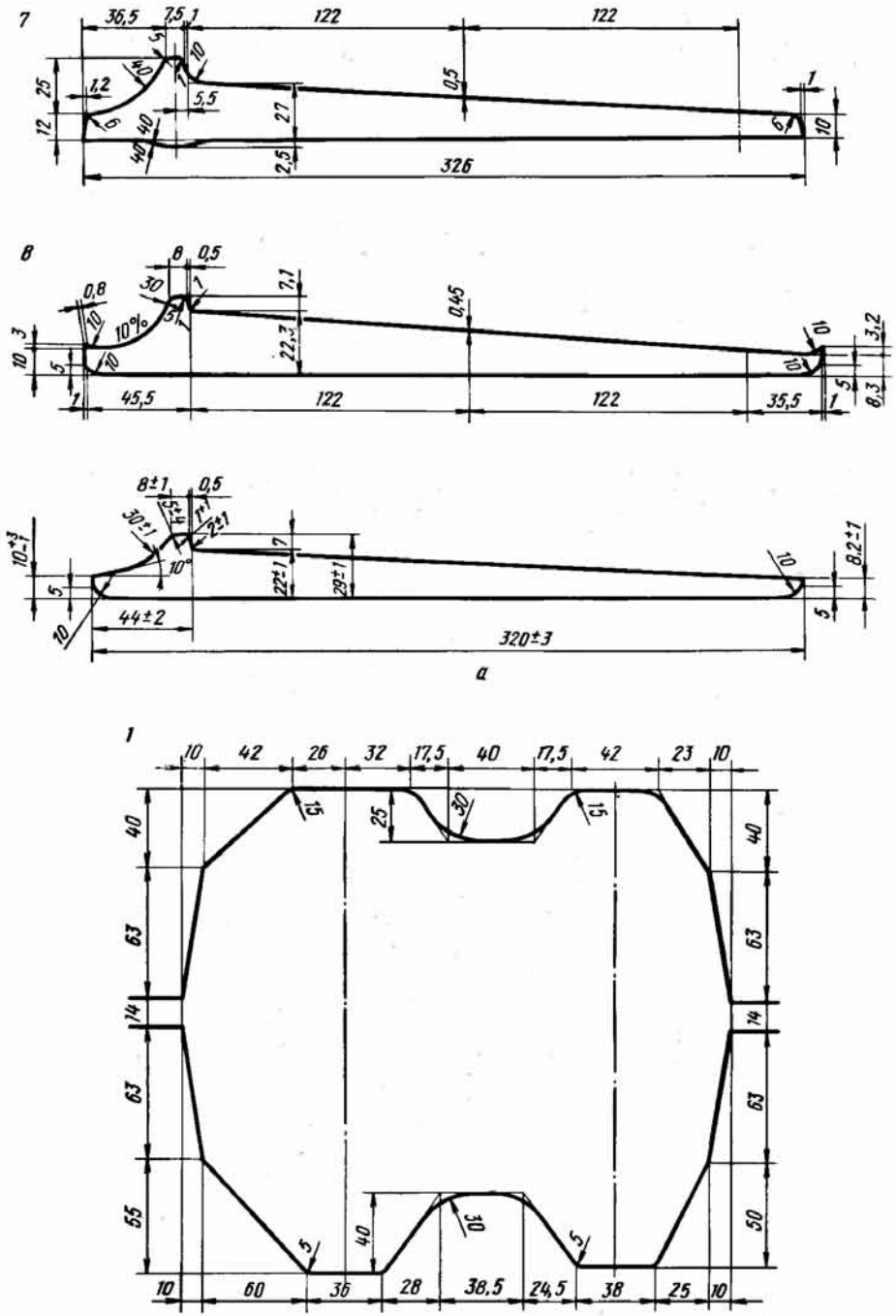
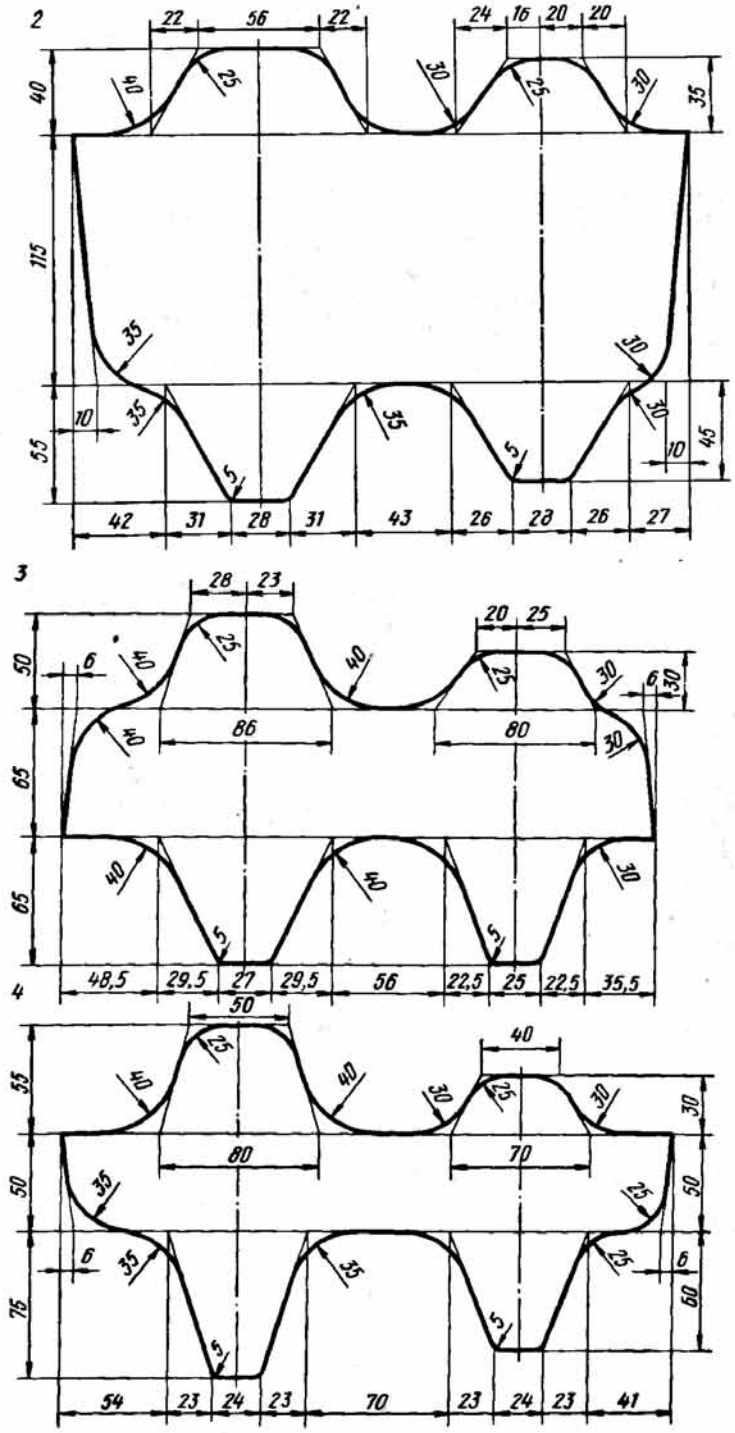
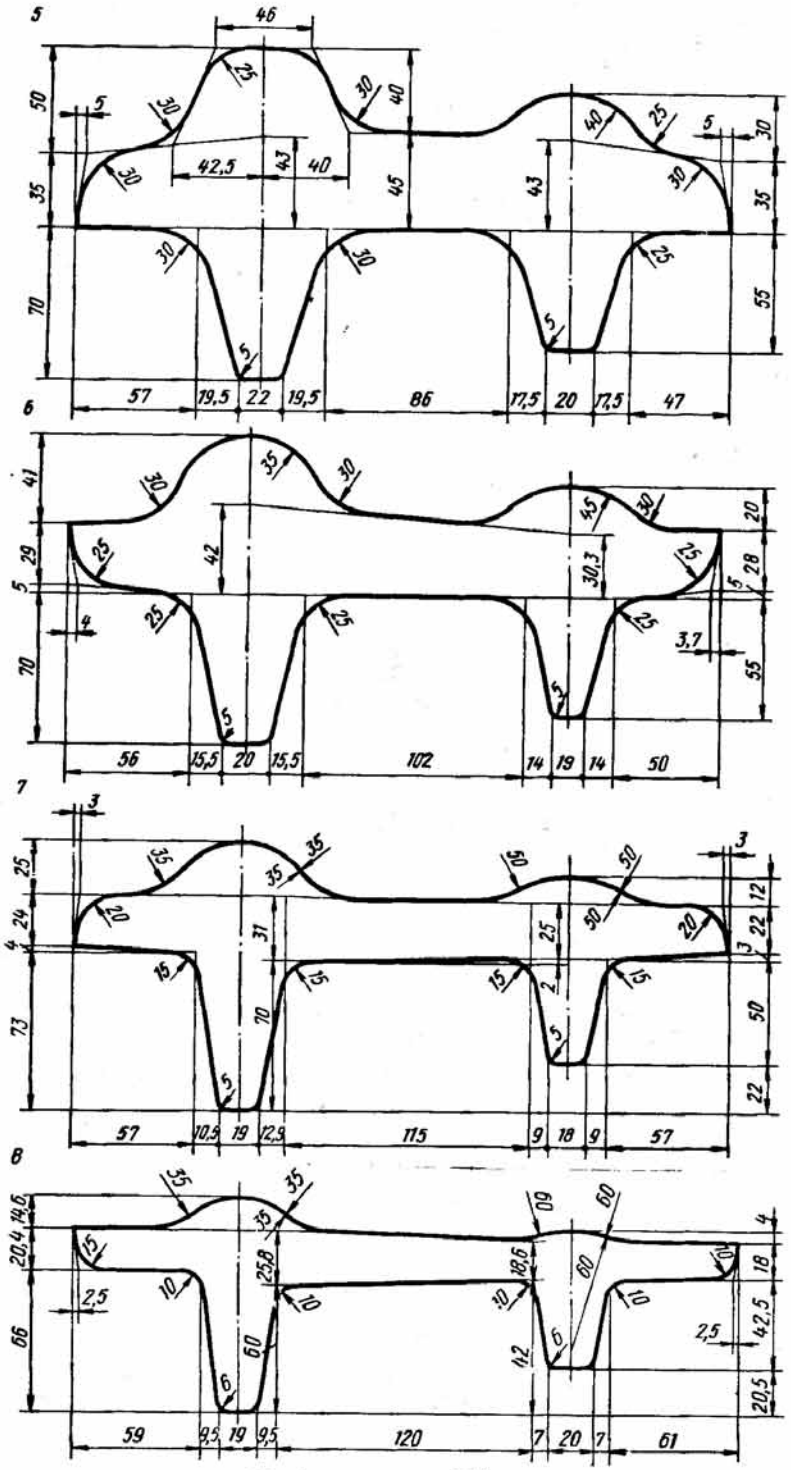


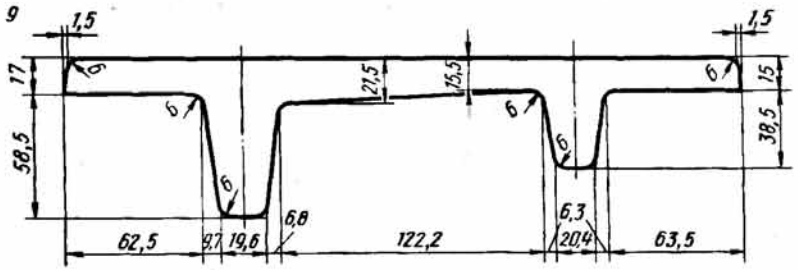
Рис. 226. Калибровка профиля подкладки раздельного типа "Метро" на линейном стане 850 (исходное сечение 257/247×245 мм)



Продолжение рис. 226



Продолжение рис. 226



Продолжение рис. 226

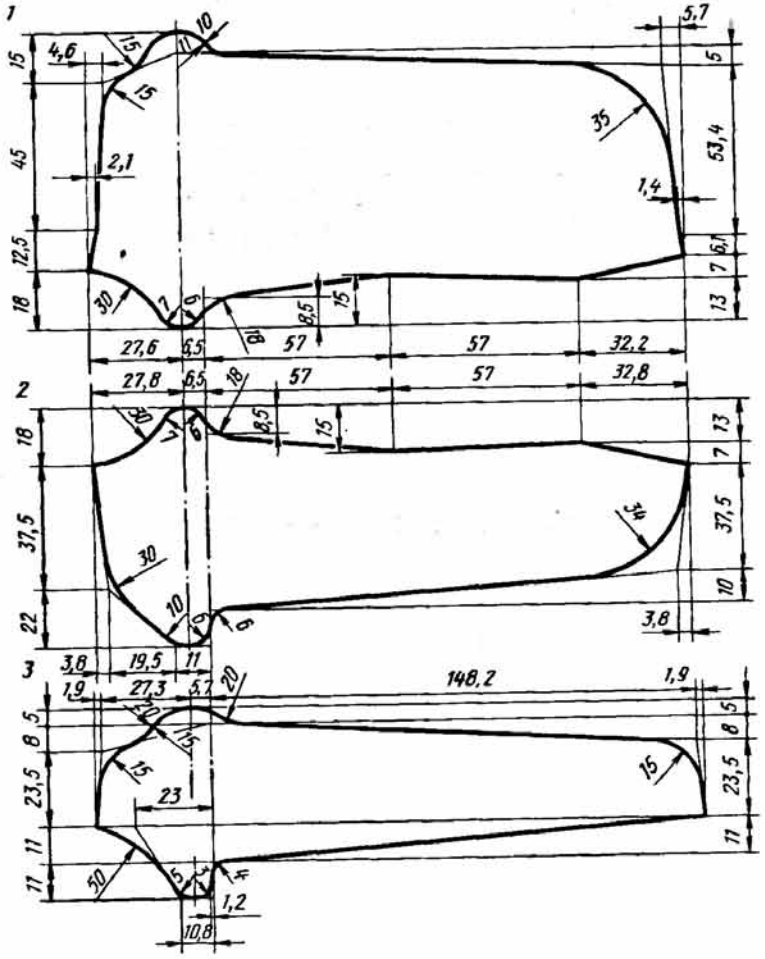
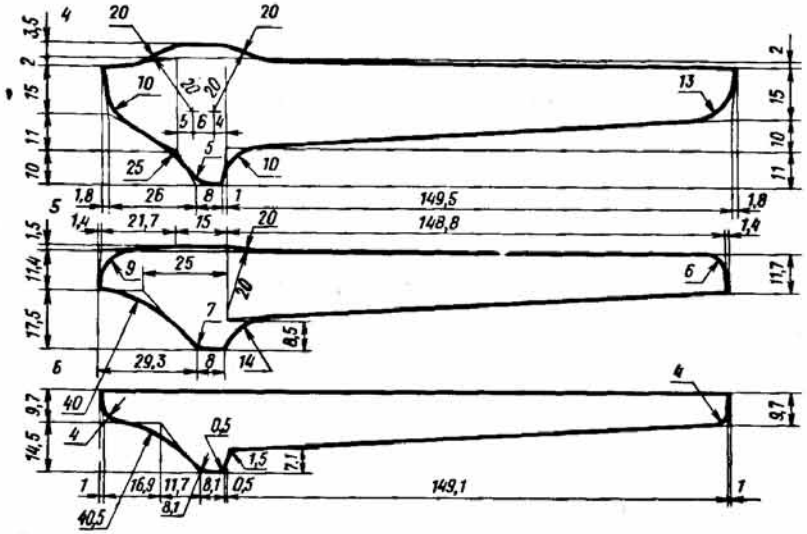


Рис. 227. Калибровка профиля подкладки к рельсам типа Р-33 на линейном стане 600 (исходное сечение 160×93 мм, калибры *1* и *2* сопряженные)



Продолжение рис. 227

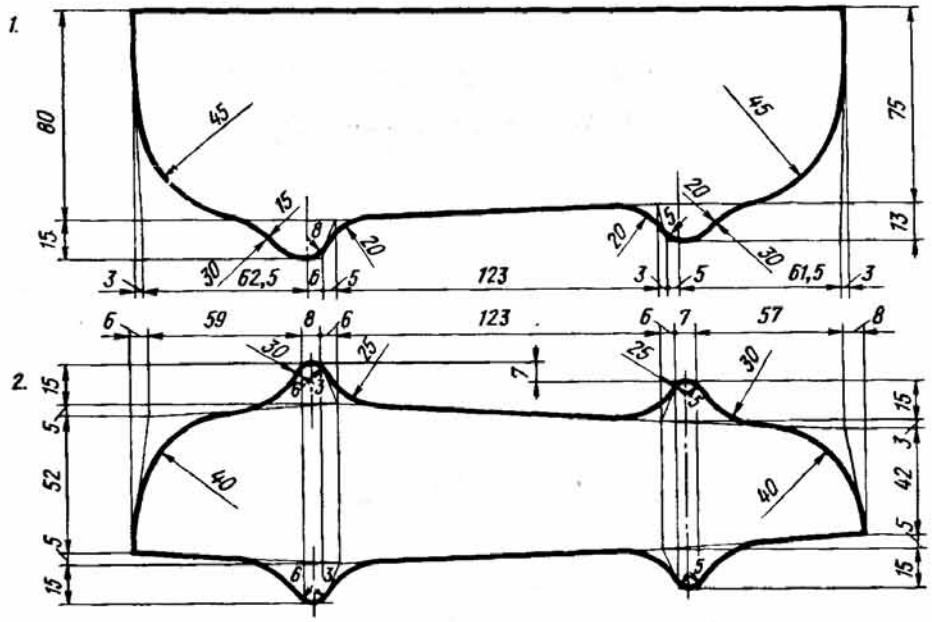
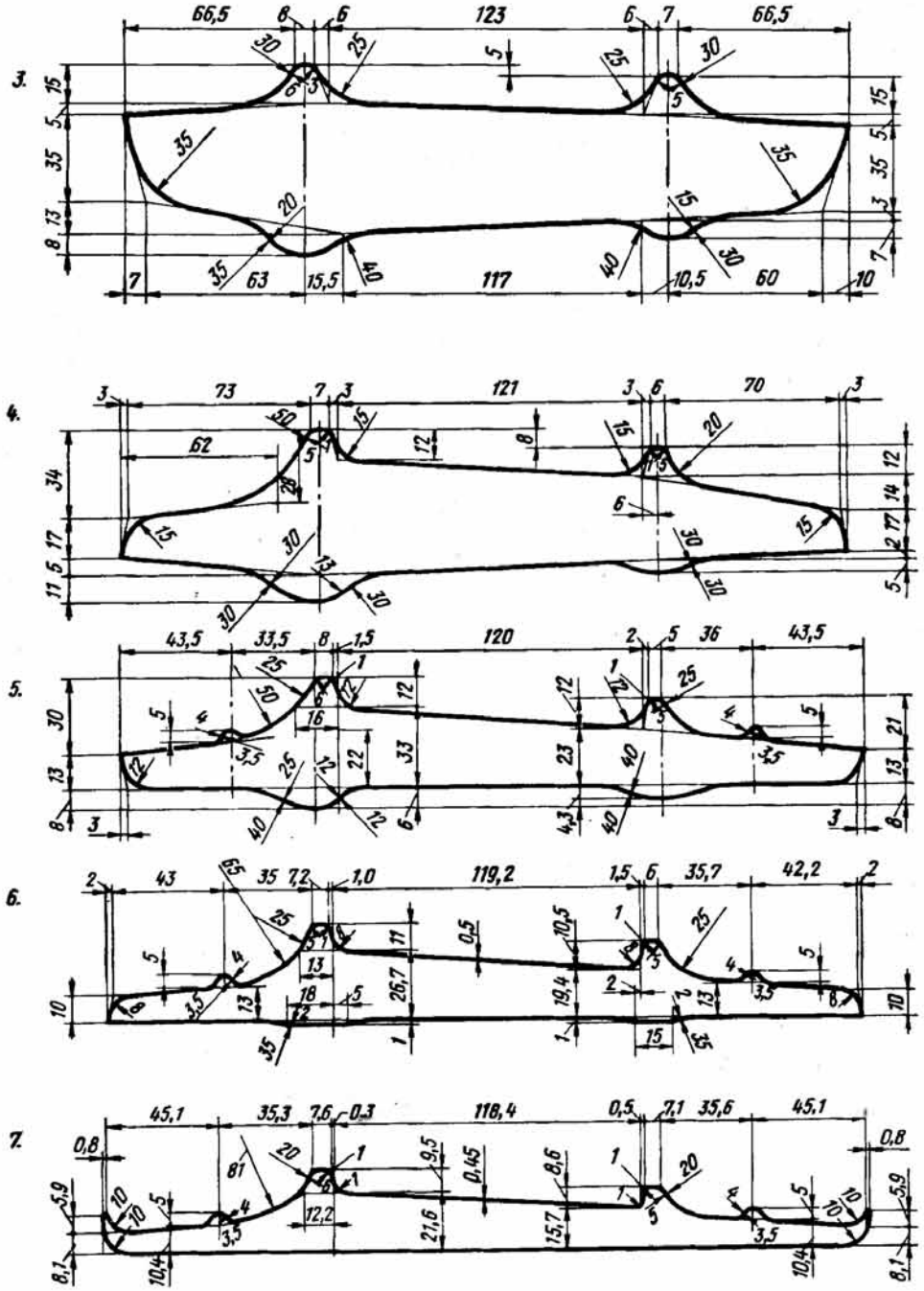


Рис. 228. Калибровка профиля подкладки костыльного скрепления к рельсам типа Р-43 на линейном стане 850 (исходное сечение 255,5×150 мм, калибры *2* и *3* – сопряженные)



Продолжение рис. 228

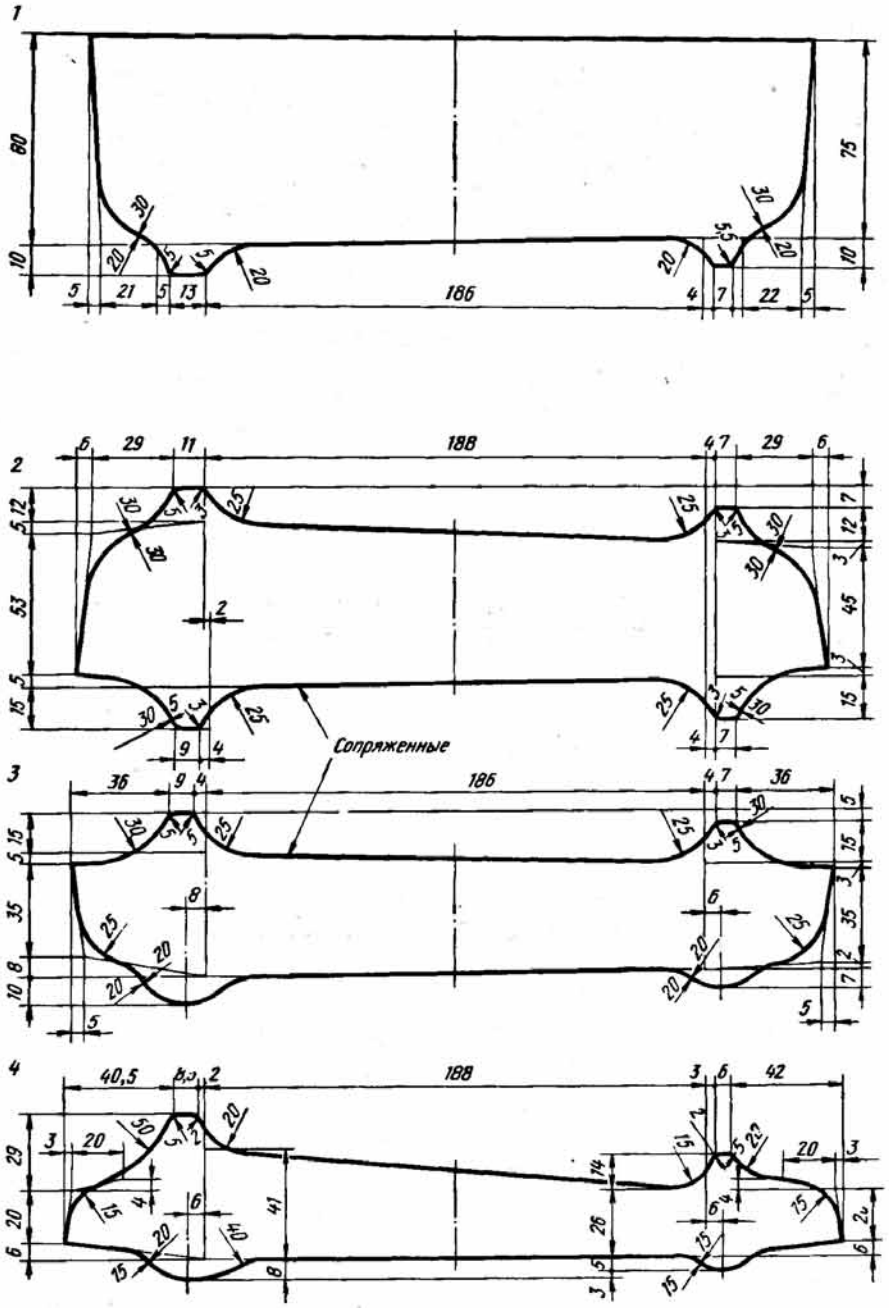
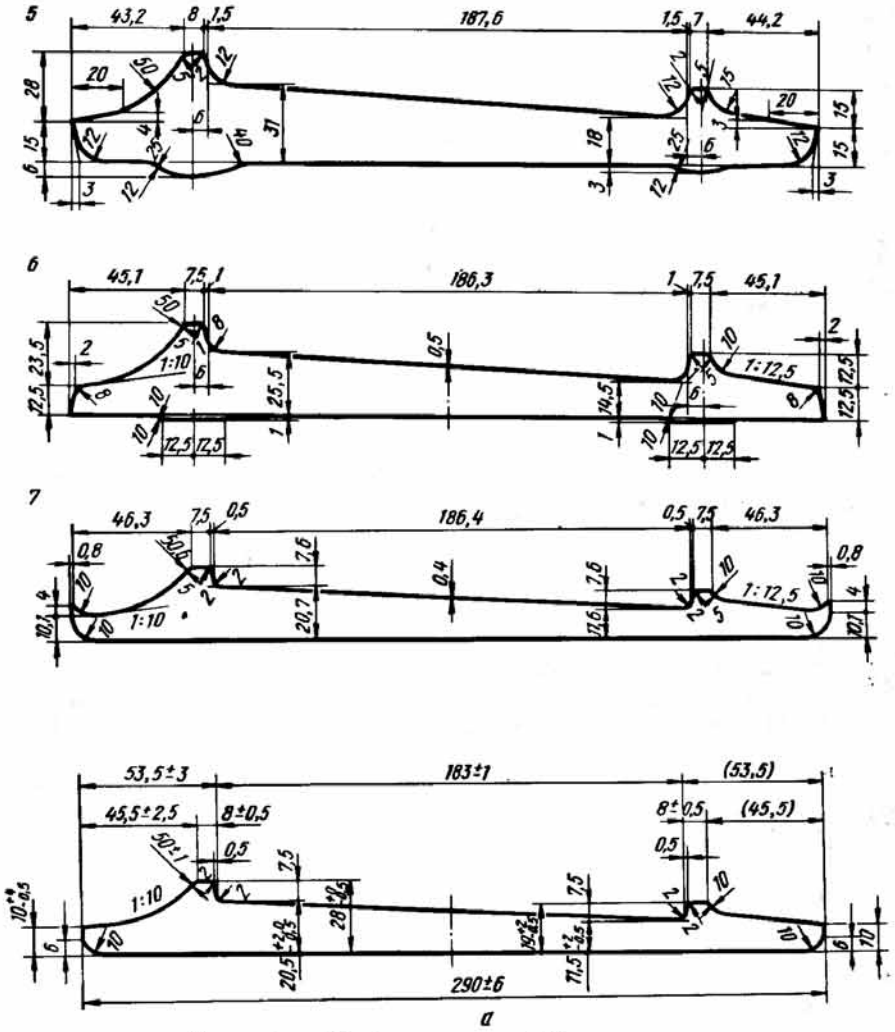


Рис. 229. Калибровка профиля трамвайной подкладки на линейном стане 850 (исходное сечение 270/260×110 мм, калибры *2* и *3* – сопряженные; *а* – готовый профиль)



1 *Продолжение рис. 229*

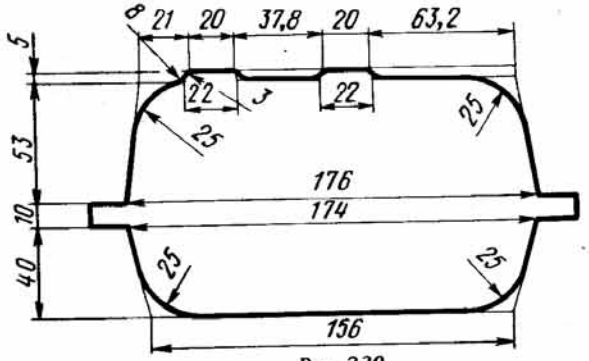


Рис. 230

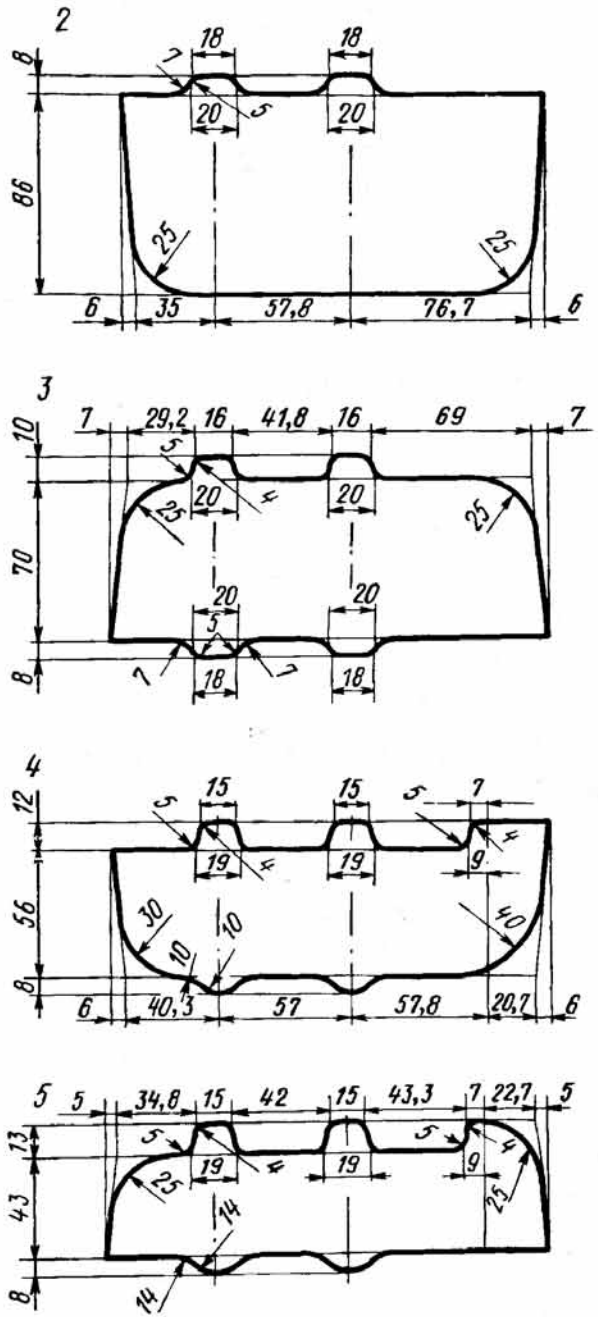
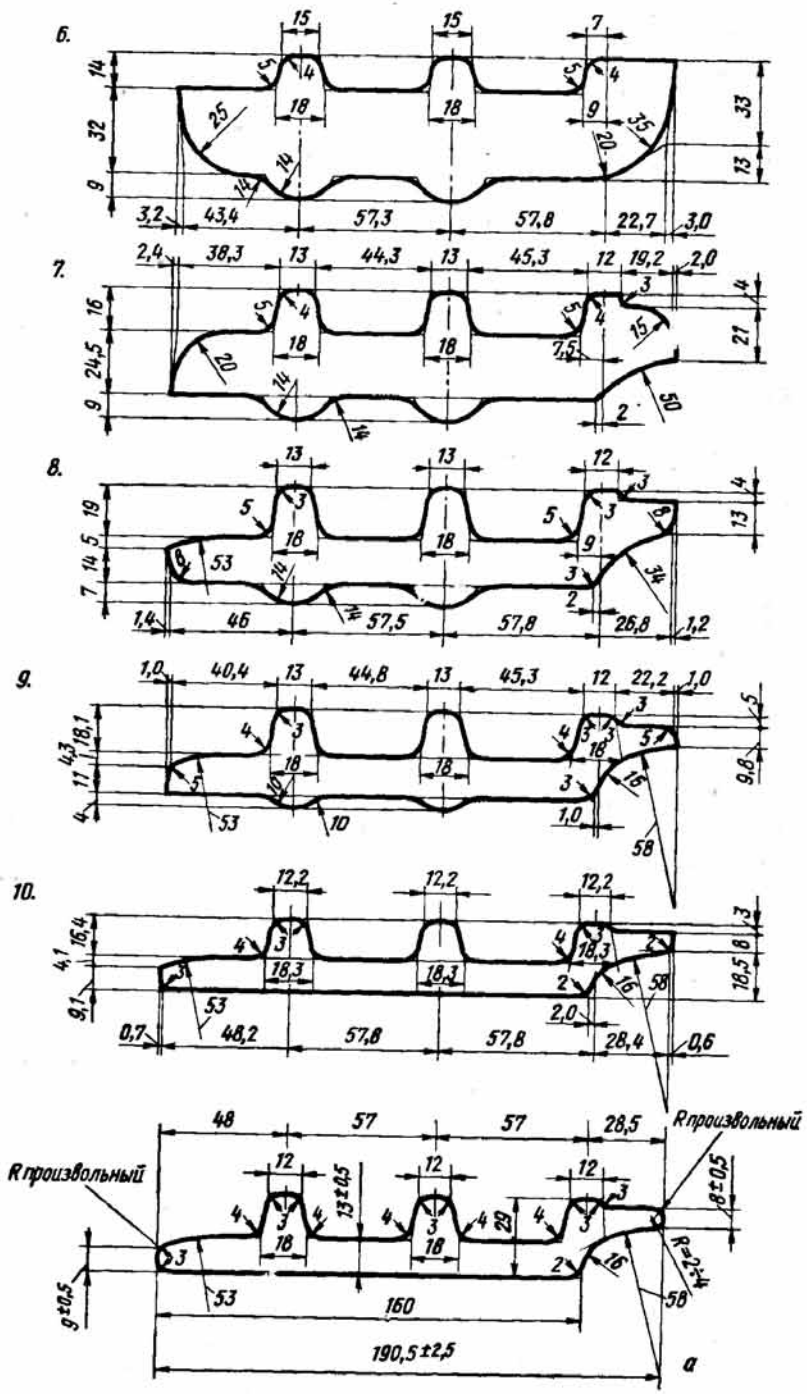


Рис. 230. Калибровка профиля пластины гусеничного полотна на линейном стане 550 (исходное сечение 164×120 мм; *а* – готовый профиль)



Продолжение рис. 230

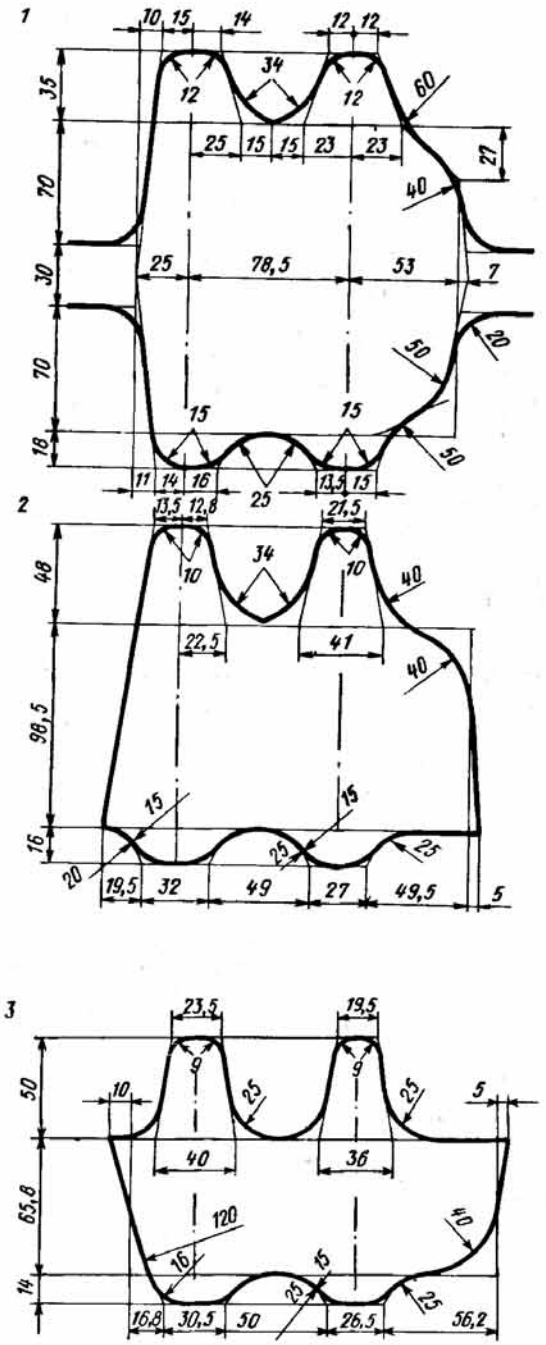
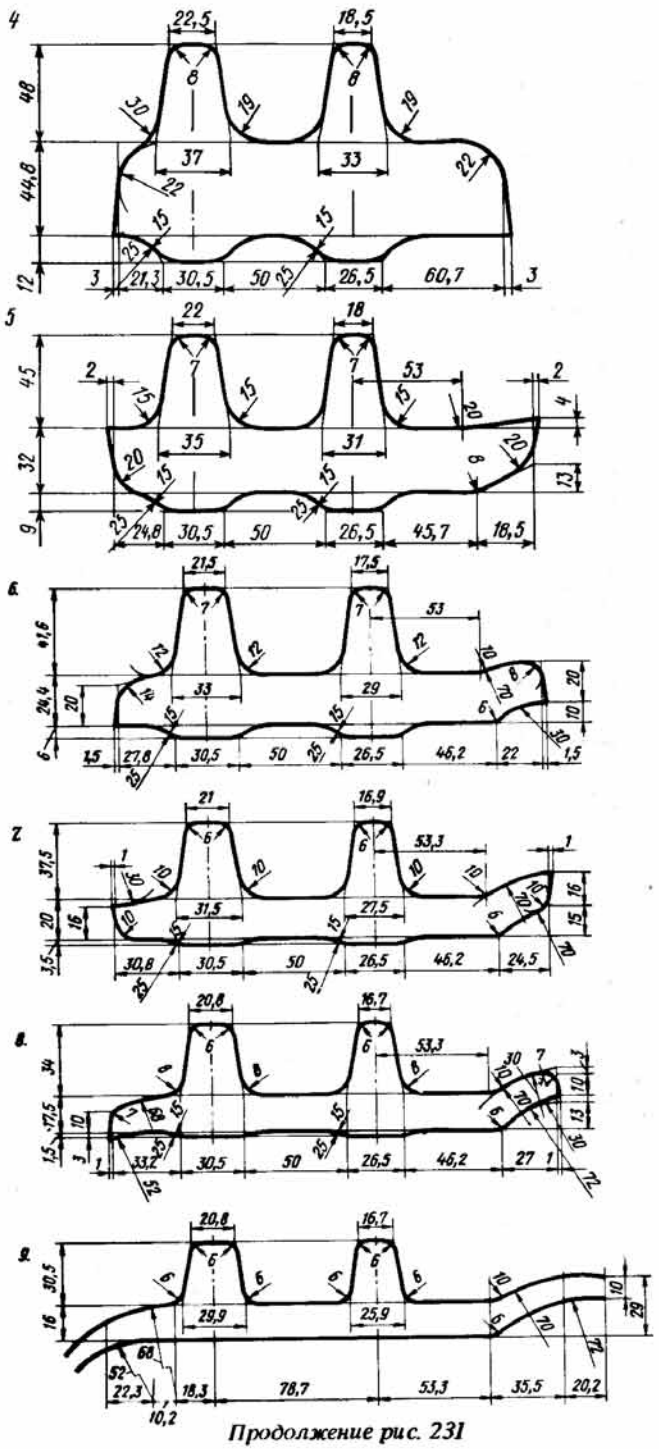


Рис. 231. Калибровка профиля № 2 для башмака гусениц на рельсобалочном стане 750



Продолжение рис. 231

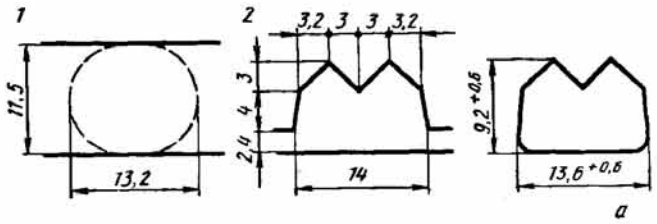


Рис. 232. Калибровка специального зубчатого профиля 13,6×9.2 мм на линейном стане 180 (исходное сечение круг 13 мм; *а* – готовый профиль)

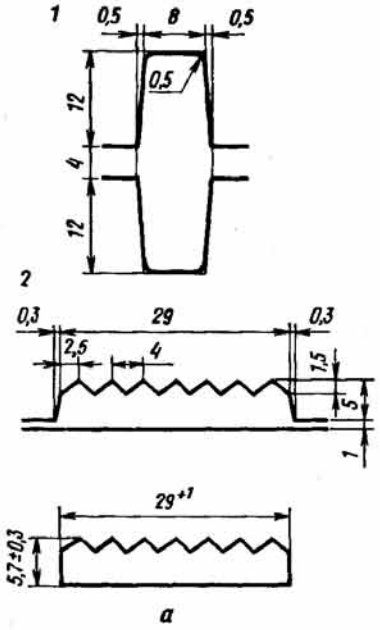


Рис. 233. Калибровка специального зубчатого профиля 29×5,7 мм на линейном стане 180 (исходное сечение 28×8 мм; *а* – готовый профиль)

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Скороходов Н.Е., Илюкович Б.М., Шулаев И.П., Есипов В.Д., Капелюшный В.П.* Калибровка сложных профилей: Справочник. – М.: Металлургия, 1979. – 232 с.
2. *Илюкович Б.М., Шулаев И.П., Есипов В.Д., Меркурьев С.Е.* Прокатка фасонных профилей для машиностроения. – М.: Металлургия, 1983. – 200 с.
3. *Жадан В.Т., Стефанов В.Е.* Эффективный способ прокатки фасонных профилей. – М.: Металлургия, 1970. – 216 с.
4. *Грицук Н.Ф., Сапрыгин Х.М., Гунин И.В.* и др. Производство сортового проката в широком сортаменте. – М.: Металлургия, 1973. – 272 с.
5. *Есипов В.Д., Илюкович Б.М., Чернобривенко Ю.С., Киреев И.Н.* Прокатка специальных профилей сложной формы. – Киев: Техніка, 1985. – 192 с.
6. *Северденко В.П., Бахтинов Ю.Б., Бахтинов В.Б.* Валки для профильного проката. – М.: Металлургия, 1979. – 224 с.
7. *Хензель А., Шпиттель Т.* Расчет энергосиловых параметров в процессах обработки металлов давлением: Справ. изд./Пер. с нем. – М.: Металлургия, 1982. – 360 с.
8. *Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В.* Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М.: Наука, 1976. – 280 с.
9. *Скороходов А.Н., Полухин П.И., Илюкович Б.М., Хайкин Б.Е., Скороходов Н.Е.* Оптимизация прокатного производства. – М.: Металлургия, 1983. – 432 с.
10. *Берковский В.С., Жадан В.Т., Шишко В.Б.* Эффективность совершенствования калибровок валков сортовых прокатных станов. – Сталь, 1979, № 6. С. 432–433.
11. *Болтянский В.Г.* Математические методы оптимального управления. – М.: Наука, 1966. – 308 с.
12. *Смирнов В.К., Шилов В.А., Инатович Ю.В.* Калибровка прокатных валков: Учебное пособие для вузов. – М.: Металлургия, 1987. – 368 с.
13. *Хартман К., Лецкий Э., Шефер В.* и др. Планирование эксперимента в исследованиях технологических процессов. – М.: Мир: 1977. – 552 с.

Справочное издание

Будимир Михайлович Илюкович
Василий Тимофеевич Жадан
Иван Петрович Шулаев
Николай Евгеньевич Нехаев

ПРОКАТКА И КАЛИБРОВКА ФАСОННЫХ ПРОФИЛЕЙ

Редактор издательства Т.А.Дьяконова
Художественный редактор А.А.Якубенко
Технические редакторы О.Б.Маркова, Л.С. Гладкова
Корректор Л.М.Зинченко

ИБ № 3356
Подписано в печать 23.08.89 Т–14250
Формат бумаги 60X88 1/16 Бумага офсетная № 2
Печать офсетная Усл.печ.л. 19,11 Усл.кр.-отт. 19,11 Уч.-изд.л. 21,34
Тираж 2400 экз. Зак. № 1661. Цена 1 р. 40 к. Изд. № 1636

Набрано в издательстве "Металлургия"
на НПТ оператором Г.В.Красюк

Ордена Трудового Красного Знамени
издательство "Металлургия", 119857, ГСП, Москва, Г-34,
2-й Обыденский пер., д. 14

Московская типография № 8
Государственного комитета СССР по печати
101898, Москва, Центр, Хохловский пер., 7

В 1990 г. В ИЗДАТЕЛЬСТВЕ "МЕТАЛЛУРГИЯ" ВЫЙДУТ СЛЕДУЮЩИЕ ИЗДАНИЯ:

Дефекты стальных прессованных труб и профилей: Справ. изд./ ВАСЮЧЕНКО В.Е., ПРИТОМАНОВ А.Е., РЕЗОЛЬ А.И. и др.; Под ред. МАНЕГИНА Ю.В. – М.: Металлургия, 1990 (II кв.). – 10 л. – ISBN 5-229-00504-1: 60 к. (№ 44)

Систематизированы и обобщены сведения, раскрывающие виды и причины образования дефектов при прессовании труб и прутков из литых и предварительно деформированных сталей и сплавов, при прессовании стальных фасонных профилей, а также прутков из порошковых материалов. Рассмотрены дефекты пресс-изделий, обусловленные свойствами порошков слитков или исходной катаной заготовки. Дан всесторонний анализ дефектов, образовавшихся в процессе прессования.

Новые вещества, материалы и изделия из них как объекты изобретений: Справ. изд./БЛИННИКОВ В.И., ДЖЕРМАКЯН В.Ю., СОБОЛЕва Н.Г. и др. – М.: Металлургия, 1990 (III кв.). – 25 л. – ISBN 5-229-00528-9 (в пер.): 1 р. 90 к. (№ 67)

Рассмотрены актуальные теоретические и практические вопросы правовой охраны наиболее прогрессивных материалов, которые находят широкое применение практически во всех областях народного хозяйства – металлов и их сплавов, неорганических моно- и поликристаллических материалов, керамики и огнеупоров, стекла, бетонов, полимерных и текстильных материалов и изделий из них.

Стреловые самоходные краны и строповка грузов: Справ. изд./ ТКАЧ Л.И., СЛЕПЧУК Н.А., НОСКОВ А.И. и др. – М.: Металлургия, 1990 (I кв.). – 50 л. – ISBN 5-229-00534-3 (в пер.): 3 р. (№ 72).

Приведены сведения о стреловых самоходных кранах. Описаны конструкции и представлен перечень сменного стрелового оборудования, поставляемого предприятиями-изготовителями. Даны характеристики кранов и показана зависимость высоты подъема груза от его массы и габарита. Систематизированы материалы о реконструкции кранов. Рассмотрены способы строповки грузов.