

Э. КОТЕЛЬ

ОСНОВЫ ПРОКАТКИ

Перевод с немецкого
инж.-металлурга Ю М ЧИЖИКОВА

*Допущено Главным управлением учебных заведений НКТП СССР
в качестве учебного пособия для металлургических вузов*



ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
ПО ЧЕРНОЙ И ЦВЕТНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

МОСКВА

— ЛЕНИНГРАД

— СВЕРДЛОВСК

— 1933

Die Grundlagen des Walzens

von

Dipl.-Ing. Ernst Cotel

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Предисловие	4
I. Понятие о процессе прокатки	5
II. Область применения и материалы прокатки	7
III. Валки	12
IV. Чертежи валков	15
V. Влияние давления при прокатке	23
VI. Явления, сопровождающие процесс прокатки. Вытяжка и уширение	28
VII. Опережение	37
VIII. Основы калибровки валков	41
A. Истечение металла. Общие законы калибровки	—
B. Основы аналитического и графического методов калибровки	50
C. Наиболее распространенный способ калибровки	52
IX. Построение наиболее ходовых профилей	54
A. Калибровка черновых валков	—
1. Ящичные калибры	—
2. Стрельчатые калибры	55
3. Ромбические калибры	56
4. Система квадрат — овал (вытяжные калибры)	57
B. Калибровка квадратного и круглого железа	—
1. Прокатка квадратного железа вручную	58
2. Прокатка квадратного железа в проводках	—
3. Прокатка круглого железа вручную	59
4. Прокатка круглого железа в проводках	—
C. Калибровка полосового железа	—
D. Калибровка наиболее ходовых фасонных профилей	60
1. Двутавровое железо	—
2. Корытное железо	63
3. Рельсы	66
4. Угловое железо	68
5. Специальные фасонные профили	70
X. Расход работы при прокатке	—

Отв. редактор Е. А. Зильберберг. Техн. редактор Гинзбург.
Подписала к печати Костина.

Метиздат № 28. Индекс МЧ-55-4-2. Тираж 4.000. Сдано в набор 27/III 1933 г. Подп.
в печ. 19/VII 1933 г. Формат бумаги 62 × 94. Печати. л. 5¹/₄ Колич. бум. л. 2³/₄.
Колич. печ. зн. в бум. л. 98.000 б. Заказ № 405. Уполномочен. Главлита В. 58165.
Выход в свет август 1933 г.

3 я тип. Онги им. Бухарина, Ленинград, ул. Мойсеенко, 10.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Эта книга, как указывает и сам автор в предисловии к немецкому изданию, не претендует быть исчерпывающим руководством по прокатному делу.

Цель книги — дать простое и ясное представление об основах процесса прокатки. Она поможет студентам и практикам-прокатчикам ознакомиться и освоить прокатную специальность, до того как они будут иметь возможность изучить более обширные руководства и специальную литературу по прокатке.

Инж. Ю. М. Чижиков.

1. ПОНЯТИЕ О ПРОЦЕССЕ ПРОКАТКИ

Основной целью прокатки является массовое изготовление различных профилей путем деформации пластичных большей частью нагретых металлов и сплавов. Таким образом основная цель прокатки соответствует целямковки и отличается от последней только в отношении производительности. Задачей каждого отдельного пропуска при прокатке помимо постепенного уменьшения сечения является также постепенное изменение формы по мере перехода из калибра в калибр.

В механической технологии по настоящее время не имеется вполне обоснованного определения понятия процесса прокатки. Отсюда становится совершенно понятной та большая разница, которая имеется между промышленным развитием прокатного дела и одновременно незначительным развитием научного исследования процессов прокатки. Промышленное развитие прокатного дела имеет давность более 100 лет, в то время как научное исследование процессов прокатки — не более 40 лет.

Для молодого прокатчика может представлять большой интерес сравнение различных определений процесса прокатки. Эти определения приводятся ниже в порядке их появления в специальной литературе.

П. Марингер в своей книге «Les théories du laminage à chaud», изданной в 1918 г., говорит следующее:

«Прокатка представляет собой рабочий процесс, при котором слитки должны перерабатываться в готовую продукцию, причем это делается таким образом, что нагретую штучку пропускают через вращающиеся валки».

Это определение может быть принято только как упрощенное описание процесса прокатки. Оно указывает на относительно незначительное развитие французской специальной литературы по вопросу прокатки; обстоятельство это было отмечено в предисловии самого труда Марингера, который одновременно указал на многочисленных немецких исследователей в этой области.

Одновременно проф. А. Рейтэ говорит следующее¹:

«Когда для раздавливания применяются вращающиеся валки, то при этом имеет место прокатка. Таким образом прокатка является процессом раздавливания, при котором раздавливающим инструментом являются вращающиеся валки».

¹ А. Rejtő, Mechanische Technologie, II Bd., Budapest 1918. Немецкое издание: Einige Prinzipien der theoretisch mechanischen Technologie der Metalle, VDI-Verlag, Berlin 1927, S. 345—360.

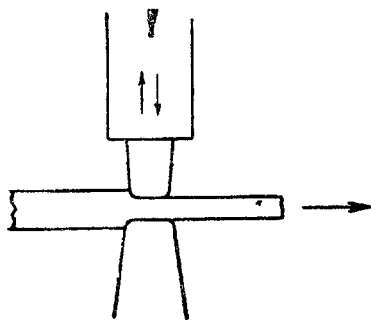
Это определение прокатки ясно, просто и делает процесс вполне наглядным.

В 1920 г. вопросом определения понятия процесса прокатки занимался сам автор² и вывел заключение, что прокатка есть развернутая форма процессаковки, что ясно следует из идентичности процессов и явлений, их сопровождающих. Сущность процесса прокатки так же, как и процессаковки при протяжке, — значительное удлинение и небольшое уширение.

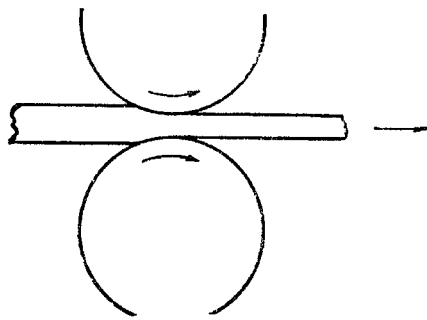
✓Процесс прокатки, таким образом, является не чем иным, как непрерывным действующим процессомковки, выражаясь математически, интегрированным процессомковки. ✓

Неоспоримым доказательством полного равенства сущности обоих видов деформации является тот факт, что выявленные путем травления наружные и внутренние фигуры истечения металла (иначе, фигуры вытеснения) совершенно одинаковы как в прокатанных, так и прокованных полосах (ср. гл. V).

Полное сходство напряжений в прокатанных и прокованных полосах видно из фиг. 1 и 2.



Фиг. 1. Схема ковки.



Фиг. 2. Схема прокатки.

Исключительно поучительным является то обстоятельство, что проф. Тафель изменил определение процесса прокатки в двух последующих изданиях его известной книги. В первом издании «Прокатка и калибровка валков»³ Тафель пишет (стр. 12): «прокатка есть совокупность процессов прессования, волочения и, когда рабочие валки имеют разные диаметры, размалывания материала».

Это определение во втором издании⁴ было изменено, и на стр. 15 описывается следующими словами: «Еще Финк указывал на существенное отличие процесса прокатки от волочения».

Тафель подверг критике свою первоначальную установку в связи с тем, что он в это время ознакомился с классическим трудом Финка, написанным 50 лет назад⁵. Тафель при этом указывает, что по вопросу о процессе прокатки Финком написано «самое важное,

самое глубокое из того, что известно по сущности процесса прокатки».

Сравнивая прокатку с волочением, можно указать следующие отличия между ними:

1) способы деформации и применяемые инструменты при прокатке и волочении в корне отличаются друг от друга;

2) при прокатке имеет место уплотнение материала, при волочении, наоборот, — уменьшение плотности;

3) частички металла в прокатываемой полосе скользят одни по другим, что при волочении не может иметь места, в связи с чем и получается уменьшение плотности в протянутом материале;

4) структура материала полос изменяется в зависимости от вида деформации; форма частиц материала при прокатке остается неизменной, при волочении же они большей частью вытягиваются.

Раньше прокатку сравнивали также с процессом прессования, хотя прессование ничего общего с прокаткой не имеет. Основанием для такого сравнения служило то предположение, что будто выступающая часть в калибре одного вала впрессовывает пластичный материал в углубление другого вала, что в действительности не имеет места.

Коренное отличие между процессами прокатки и прессования заключается в том, что частицы материала при прессовании свободно раздаются во всех направлениях, а при прокатке при незначительном уширении двигаются только по длине прокатываемой полосы.

Несмотря на совершенно неверное сравнение процессов прокатки и прессования, еще и сейчас называют валки с выступающими частями патричными, а с углубленными калибрами — матричными. Хотя эти наименования совместно работающей пары валков общепотребительны, следует признать коренное отличие между прокаткой и прессованием.

II. ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ И МАТЕРИАЛЫ ПРОКАТКИ

Прокатке могут быть подвергнуты все черные и цветные металлы и сплавы, которые в температурных пределах прокатки находятся в состоянии ковкости.

Не все «теоретически» ковкие стали, в частности не все сорта сталей, содержащие больше 1,7% С могут являться материалом, годным для прокатки, так как условиям действительной ковкости соответствуют только стали с содержанием С ниже 1,7%.

В прокатных цехах прокатываются только те стали, которые обладают большой пластичностью при нагреве⁶. Максимальное содержание С в стали, при котором еще возможна легкая и беспрепятственная прокатка, — это 0,95, округленно 1%. Это означает, что сложные профили можно прокатывать только из такой стали, в которой при любой температуре деформации, а также в случае охлаждения этой стали до эвтектической линии, не будет иметь места образование цементита.

² E. Cotel, Ueber die Grundsätze der neuzeitlichen Walztechnik, „Montan. Rundschau“, Wien 1920, № 20.

³ Wilh. Ruhfus, Walzen und Walzkalibrieren, Dortmund. 1921.

⁴ W. Ruhfus, Walzen und Walzkalibrieren, Dortmund. 1923.

⁵ Karl Fink, Theorie der Walzarbeit, „Zeitschr. f. d. Berg-, Hütten- u. Salinenwesen“, Berlin 1874.

⁶ E. Cotel, Der Siemens-Martin-Ofen, Otto Spamer Verlag, Leipzig 1927, S. 129.

Таким образом свободно прокатываться могут только те стали, которые содержат количество С как максимум, соответствующее структуре перлита⁷.

В действительности при соответствующих условиях и предосторожностях можно прокатывать также стали, содержащие больше 1% С. Необходимо подчеркнуть, что более или менее удовлетворительно прокатываются стали с содержанием С не выше 1,3%.

Способность коваться и прокатываться находится также в зависимости от влияния ряда других элементов. Стали, легированные W и главным образом Ni, показывают, например, повышенную пластичность при нагреве и меньшее сопротивление горячей деформации. Элементы S, O, As и Cu, наоборот, ухудшают условия деформации и могут в некоторых случаях сделать сталь красноточкой, что ведет к полной утере способности прокатываться⁸.

Так как сопротивление материала деформации возрастает с повышением скорости процесса деформации, то поэтому необходимо более твердые, высокоуглеродистые стали с повышенным сопротивлением и пониженным удлинением катать при небольших обжатиях и небольшой скорости прокатки.

На основании вышесказанного и данных практики следует, что в прокатном деле наиболее распространенным материалом для прокатки является сталь с содержанием менее 1% С. Стали с содержанием 1—1,3% С, как выше было упомянуто, прокатываются при особых условиях для специальных целей (лезвия для безопасных бритв и др.).

В справочнике «Hütte»⁹ имеется сводка наиболее употребительных изделий прокатки, имеющих промышленно-техническое значение, из которой видно, что даже наиболее твердые изделия изготовлены из стали с содержанием С меньше 1% (табл. 1).

Эта таблица ниже приводится в сильно сокращенном виде.

Из этой таблицы мы видим, что верхняя граница содержания С в хорошо прокатываемых сталях не превышает 0,8%, а необходимость в прокатке сталей с содержанием больше 0,8% С чрезвычайно редка.

Что касается нижнего предела содержания С, то здесь не имеется никаких ограничений; чем мягче сталь, т. е. чем беднее она углеродом, а главным образом, примесями, тем легче она прокатывается.

Наиболее распространенный сименс-мартеновский способ плавки дает сталь с минимальным содержанием С 0,05%.

Как видно из табл. 1 определенному процентному содержанию С соответствует определенное сопротивление. Так как величина сопротивления зависит также от содержания примесей Mn, S и P в стали, то не всегда определенному содержанию С соответствуют величины сопротивления и удлинения, приведенные в таблице. Эта

ТАБЛИЦА 1

Сводка наиболее ходовых прокатных изделий на углеродистой стали

Содержание углерода в %	Сопротивление в кг/мм ²	Удлинение в %	Применение
0,06	34—35	30—34	Проволока, тонколистовое железо и листы для прессования, трубы, заклепочное железо, цепи
0,09	35—37	30—32	Листы, полосовое железо, проволока, оброчное железо, проволочные гвозди
0,12	38—40	28—30	Как в предыдущей строчке. Кроме того: строительная сталь, торговое железо, котельные листы
0,16	40—42	28	Подкладочные плиты, винты, котельные листы, железо для лопаток
0,20	47	26	Шпалы, оси, поковки, вилы
0,25	52	24	Оси, бандаж, рудничные рельсы
0,35	60	20	Рельсы, бандаж, лемеха
0,45	70	16	Рельсы, молотки, крюки, ножи для ножниц, пружины, косы
0,55	78	12	Трамвайные рельсы, резцы для холодной резки, косы, канатная проволока
0,65	87	9	Снаряды, ружейные стволы, листы для пил, бурава по камням
0,75	96	6	Снаряды, самозакаливающийся инструмент, напильники, резцы, шары для шаровых мельниц
0,8	100—105	1—5	Проволока для зонтиков

разница, однако, практически незначительна, и поэтому эта таблица для условий производства вполне достаточна.

Определение величин временного сопротивления и удлинения для сталей с промежуточным содержанием С довольно просто. Значения этих величин могут быть получены без специального подсчета из графиков временного сопротивления и удлинения, представленных на фиг. 3, составленных автором на основе более чем 600 разрывных проб. Эти графики, начиная с 1915 г., постоянно оправдывают свое назначение.

В связи с тем, что сталелитейные цеха не дают и не могут дать вполне точных анализов, прокатные цеха вынуждены заказывать себе металл с определенными допусками по углероду. В практике принято заказывать мягкие стали с допуском до 0,05% С, твердые стали до 0,1%. При заказе на металл, таким образом, всегда должны быть обусловлены допуски или по С, округленно 0,1%, или по сопротивлению на разрыв в 10 кг/мм².

Эти допуски были приняты всеми сталепрокатывающими предприятиями до 1914 г.

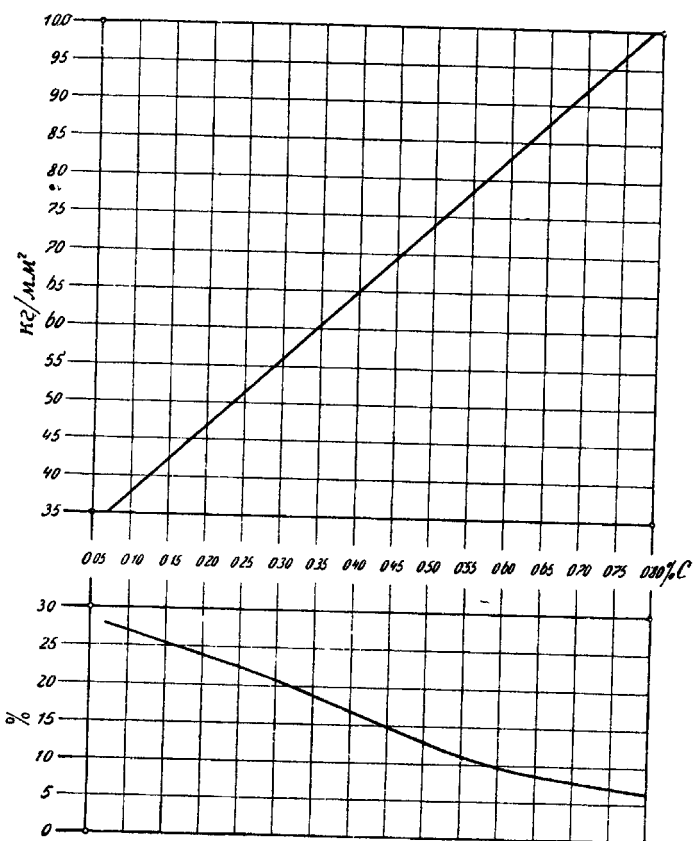
Если какой-либо машиностроительный завод заказывает прокатную заготовку, например с содержанием 0,35% С, или с сопротивлением 60 кг/мм², то должны быть оговорены пределы по С от 0,3 до 0,4% и по временному сопротивлению от 55 до 65 кг/мм².

⁷ E. Cotel, Die Grenze der Warmbildsamkeit des Stahles, „Zeitschr. f. d. Berg-, Hütten- u. Salinenwesen“, Berlin 1925, Bd. 73, ferner E. Cotel, Limite de la malléabilité à chaud de l'acier, „Revue Univ. d. Mines“, Bruxelles 1926, N. 1.

⁸ Werkstoffhandbuch „Stahl und Eisen“, 1927, E. J. 2.

⁹ Hütte, Taschenbuch für Eisenhüttenleute, IV. Auflage, S. 735.

Всякая сталь подвергается прокатке в нагретом состоянии. Поэтому необходимо учитывать также ее физические свойства. Прокатка производится в пределах температур от 1300 до 900°. По возможности прокатку надо начинать при максимально высокой, допустимой для данного материала температуре. При температуре ниже 900° прокатка ведется в исключительных случаях.



Фиг. 3. График сопротивления и удлинения прокатанной стали.

Высокая температура в конце прокатки необходима не только потому, что с понижением температуры уменьшается пластичность металла, но особенно потому, что, во-первых, прокатка при низкой температуре требует значительно большего расхода энергии, во-вторых, остывший металл быстрее вырабатывает калибры и, наконец, также потому, что в металле, прокатанном при низкой температуре (ниже 900°), обычно возникают сильные внутренние напряжения.

По Жезу и Риделю величина временного сопротивления нагретой стали колеблется в пределах от 2,0 до 10 кг/мм. В табл. 2 эти величины представлены для различных температур через каждые 50°¹⁰.

Из табл. 2 видно, что сопротивление истечению нагретой стали при температуре конца прокатки примерно в пять раз больше, чем при температуре начала прокатки, откуда следует, как выше и было указано, необходимость добиваться возможно высокой температуры конца прокатки.

ТАБЛИЦА 2

Величины сопротивления нагретой стали

Температура в °C	Сопротивление разрыву в кг/мм²	Давление истечения в кг/мм²
800	—	10,3
850	8,50—11,25	—
900	7,94—10,50	8,1
950	6,96—9,20	—
1000	5,75—7,60	6,1
1050	4,45—5,95	—
1100	3,30—4,40	4,4
1150	2,30—3,10	—
1200	1,55—2,08	3,0
выше 1200	—	2,0

Быстро увеличивающееся давление истечения, увеличивающийся расход энергии с понижением температуры при прокатке железа, а также уменьшающаяся пластичность являются основанием и одновременно объяснением основного закона прокатки, заключающегося в том, что обжатия (уменьшения сечения) от прохода к проходу должны постепенно и соответственно уменьшаться.

Катаются все те «профиля», сечения которых могут быть вырезаны в совместно работающей паре валков, причем полоса при проходе через калибр должна точно его выполнять без образования заусенцев или, наоборот, невыполнения калибра.

Все которые ясно себе представляют два совместно работающих валка и врезанные в них калибры, могут также легко себе представить, какие профили не поддаются прокатке. Само собой разумеется, что никакой профиль (вернее, калибр), который поддается прокатке, не должен иметь никаких углублений в линиях, вертикально или почти вертикально ограничивающих калибр, так как выполнение таких сечений при прокатке совершенно невозможно. Примером может служить прокатка желобчатых трамвайных рельс «Феникс», при которой для образования канавки применяется вспомогательный ролик, вращающийся на вертикальной оси.

Кроме этих чисто технических причин возможности прокатки немаловажную роль играет вопрос экономичности процесса. Выгодно включать в программу прокатки только такие профили, при которых стоимость установки (валки, проводки и т. д.) быстро окупается, что возможно, если эти профили в больших или меньших количествах, но постоянно, имеют спрос. Имеется очень много профилей, поддающихся прокатке, которые вместе с тем экономически себя не окупают.

Основной продукцией прокатных цехов является производство балок, строительных профилей, рудничных и железнодорожных

¹⁰ Hütte, Taschenbuch für Eisenhüttenleute, III. Auflage, S. 732.

рельс, шпал и торгового пруткового железа. Если какой-либо прокатный цех имеет возможность производить экономично кроме этих профилей также отдельные современные профили, то это указывает на искусство руководителей производства. Не подлежит никакому сомнению, что выгодность того или иного прокатного производства зависит от того, должно ли оно производить многочисленные профили в малых количествах или имеется возможность производить малое число профилей в больших количествах. В последнем случае получается экономия не только от сокращения количества перевалок и перестроек, но также за счет усовершенствования различных приемов прокатки.

III. ВАЛКИ

Описание оборудования прокатных цехов входит в область металлургического машиностроения, в связи с чем по этому вопросу в этой книге сказано очень мало. На этом основании можно было также не говорить о валках, но в данном случае имеет смысл остановиться несколько подробнее на этой важнейшей детали прокатного производства.

В одних случаях в прокатном деле применяются только стальные валки, в других — чугунные. Имеется целый ряд прокатных изделий, которые в равной степени хорошо прокатываются в чугунных и стальных валках. Валки для тяжелой прокатки, черновые валки при больших давлениях, валки с глубокими врезками и для крупных сечений обычно изготавливаются из литой стали, во всех других случаях прокатки — из чугуна. Объясняется это тем, что стальные валки, вследствие их большой прочности, особенно их большой упругости и вязкости, способны выдерживать большие давления, в то время как чугунные валки таким высоким требованиям прочности не отвечают. С другой стороны, литые стальные валки могут применяться только для черновой прокатки, так как в случае прокатки немного остывшей полосы последняя оставляет на стальных валках отпечатки. Кроме того при прокатке горячих полос наблюдается явление прилипания, что приводит к навариванию на калибр частичек металла. В том и другом случаях поверхность прокатываемых изделий выходит сильно шероховатой.

Валки в отношении материала и способа их изготовления могут быть разбиты на следующие группы:

- 1) чугунные валки:
 - а) обычные из серого чугуна,
 - б) полутвердые,
 - в) из закаленного чугуна;
- 2) стальные валки:
 - а) литые стальные,
 - б) кованые стальные.
 - в) из закаленного чугуна;

Большая часть торговых и легких профилей, как правило, прокатывается в чугунных валках, более тяжелые профили на одних заводах катаются в чугунных валках, на других — в стальных.

Черновые и обжимные валки изготавливаются исключительно из стали.

На основании вышесказанного не представляет никаких трудностей решить для каждого отдельного случая, из какого материала должны быть изготовлены те или иные валки.

Вопрос о материале валков должен уметь решать каждый, имеющий дело с валками, так как этот вопрос, если исходить из необходимости получать хорошую, чистую продукцию, есть вопрос большой производственной важности. Нередко можно наблюдать на некоторых заводах применение для определенной цели стальных валков, дающих в работе безупречные технические и экономические результаты, и в то же время на других заводах применяются для той же цели чугунные валки также с хорошими результатами.

Таким образом выбор материала для валков иногда в большей степени зависит от чисто местных условий, чем от основных положений. Большей частью это находится в зависимости от того, какие валки, чугунные или стальные, лучшего качества и наиболее выгодно сможет приобрести прокатный цех. Прокатные цеха по целому ряду причин охотнее всего применяют валки, изготовленные на своем заводе. Именно поэтому необходимо быть особенно осторожным в данном вопросе. Если качество валков, отлитых на своем заводе, недостаточно хорошее, то хотя они стоят дешевле, чем изготовленные на стороне, все же конкурировать с последними, более дорогими, но зато лучшего качества, они не могут.

Применение валков наилучшего качества нужно рекомендовать, потому что плохое качество их ведет не только к повышению расходов на них, а сказывается также и на качестве прокатываемой продукции.

Что касается химического состава материала валков, то здесь не удастся вывести каких-либо определенных законов; при этом все-таки желательно не переходить известные границы.

Как материал обыкновенных чугунных валков себя оправдал чугун следующего состава:

C	2,6—2,85%
Mn	0,7—0,90%
Si	0,5—0,90%
P	меньше 0,5%

Очень важно иметь содержание Si по возможности низким с тем, чтобы поверхность обработанных валков была достаточно твердой и гладкой и этим самым обеспечить чистую поверхность готовой продукции.

При низком содержании Si, гладкой и плотной поверхности износ валков значительно меньше. Наилучшие валки, как правило, отливаются из отражательных (пламенных) печей¹¹.

Полутвердые валки отливаются в металлические формы (кокили), изнутри вымазанные глиной, и применяются, главным образом, для прокатки профильного железа в отделочных клетях.

Валки из закаленного чугуна применяются для чистовых валков при прокатке полосового железа и особенно для

¹¹ В. Оганн. Lehrbuch d. Eiser- u. Stahlgießerei, 5. Auflage, W. Engelmann, Leipzig 1922, S. 160.

прокатки листов. Материал стальных валков для отделочных валков содержит, как правило, 0,6—0,8% С. Содержание С в обжимных валках не должно превышать 0,45—0,5%, так как стальные валки с более высоким содержанием С более подвержены образованию трещин под влиянием воздействия охлаждающей воды или воздуха.

Стальные кованые валки применяются в особых случаях, в частности тогда, когда соотношение между давлением прокатки и диаметром валков особо неблагоприятно. Закаленные стальные валки применяются для холодной прокатки.

Редко приходится отмечать, что инженер-прокатчик ведет специальную книгу валков всех станов или всего склада валков. При ведении такой книги каждый валок имеет свой «родословный лист» (паспорт). Разделы такого листа могут быть примерно следующими:

- 1) название литейной, отливающей валки;
- 2) химический анализ материала валков;
- 3) диаметр валков, всегда измеряемый в одном и том же калибре;
- 4) вес прокатанной на этом валке продукции в промежутке между двумя обточками;
- 5) время и причины поломки шеек, время и способ сварки шеек и т. д.

Для книги валков можно применять форму, показанную на табл. 3. Каждый руководитель прокатного цеха может на основе этой книги иметь представление относительно пригодности валков из материала данного состава, а также о качестве работы литейной. Эта книга валков показывает также, при каком размере диаметра появляется необходимость в смене того или иного валка.

таблица 3
Паспорт валка

Название валка
Материал валка
Вес валка

Чертеж валка	Фирма, отливающая валки	Химический анализ в %				Диаметр калибра в мм	При последней пере-валке прокатано в т	Примечание
		С	Мп	С	Р			

Естественно, что наилучшими валками будут те, которые прокатали наибольшее количество годного металла при нечастых обточках, следовательно, при малом уменьшении диаметра. Этому требованию отвечают валки, изготовленные из плотного по возможности беспористого металла с гладкой поверхностью и однородной структурой, что было уже указано выше.

Регулярная переточка валков является важной задачей в прокатном деле; именно поэтому совершенно неправильно вальцетокарные мастерские выделять в самостоятельные единицы. Если по местным условиям при отсутствии свободной площади нет возможности иметь вальцетокарную в прокатном цехе, то при этом по меньшей мере она должна быть подчинена администрации прокатного цеха. Недопустимо перевозить на большие расстояния от их клеток тяжелые валки для переточки или шлифовки, и поэтому нужно стремиться сближать вальцетокарные станки с прокатными станами.

таблица 4
Испытанные размеры валков различных прокатных станов в мм

Стан	Наименование валков	Длина бочки	Диаметр бочки	Длина шеек	Диаметр шеек	Длина трфров	Диаметр трфров
Крупносортовый	Обжимные	2500	900	450	480	290	450
	Реверсивно отделочные	2000	770	400	400	250	380
Среднесортный	Трио черновые	1800	600	310—360	340	200	320
	Гладкие	600	470	250	250	170	235
	Отделочные	1100					
		1200	470	250	250	170	235
Мелкосортный		1250					
		1400					
	Трио черновые I	1300	530	250—310	265	200	235
	Трио черновые II	1150	400		220	130	
	Гладкие	500	280	170	156	120	192
	Отделочные	500	280	170	156	120	150
		800					150

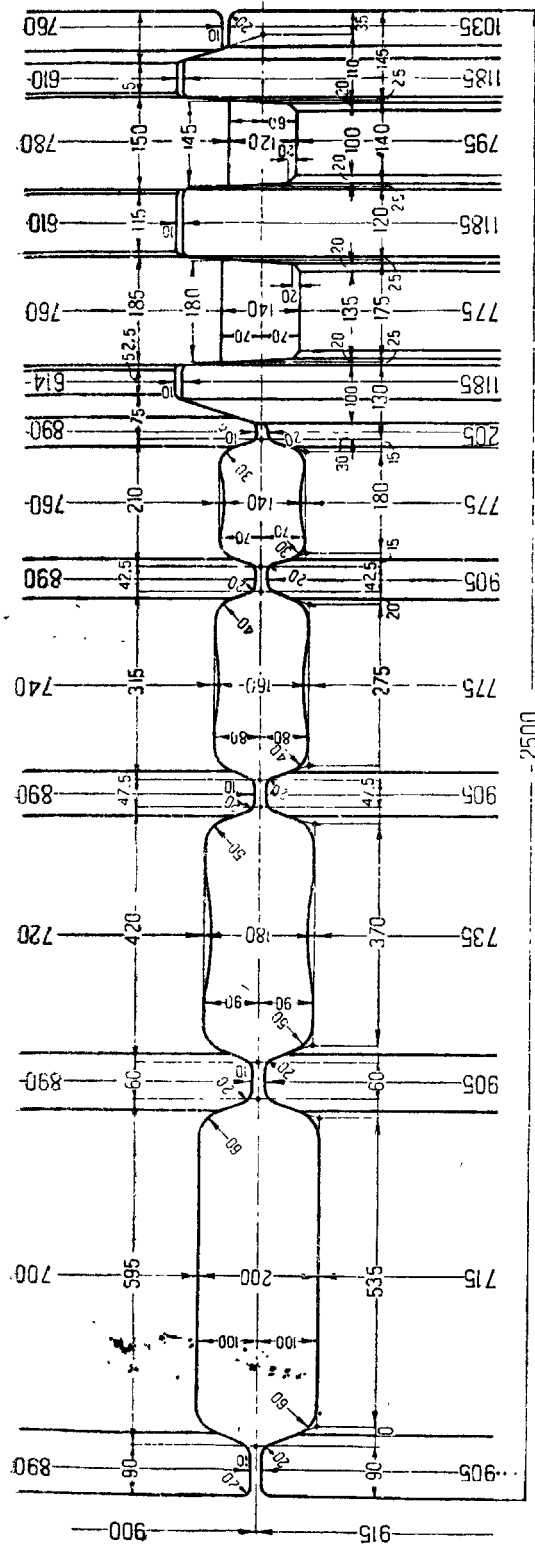
Склад валков должен быть так расположен, чтобы валки были доступны осмотру и возможно было их безопасно и без затруднений доставать. Что касается размеров валков, то можно указать на данные справочника «Hütte для металлургов» (стр. 625, т. IV). В табл. 4 показаны хорошо проверенные на практике основные размеры валков различных прокатных станов.

IV. ЧЕРТЕЖИ ВАЛКОВ

Чертеж валков представляет собой рабочий вид совместно работающих в одной клети валков.

Чертеж валков, таким образом, показывает при стане дуо — два валка, при стане трио — три и при стане допель-дуо — четыре валка.

Чертеж валков предназначается, с одной стороны, для литейной, изготовляющей валки, а с другой стороны, специально для вальцетокарной, обтачивающей валки. Чертеж валков показывает различные диаметры бочки валка, сечения и размеры буртов и соответствующие им углубления, а также очертания калибров, вернее, частей калибров в каждом валке. Так как в данном случае мы имеем дело с телом цилиндрической формы, вполне достаточным явля-



Фиг. 4. Калибровка обжимных валков.

ется представление чер-
тежей валков в одном
рабочем виде с нане-
сением на них всех не-
обходимых размеров;
при этом на чертеже
показываются валки
без шеек. Размеры и
сечения шеек и тремов
для всех валков одно-
го стана одинаковы и
всегда остаются без
изменения, так что эти
размеры всегда изве-
стны как в вальцели-
тейной, так и вальце-
токарной.

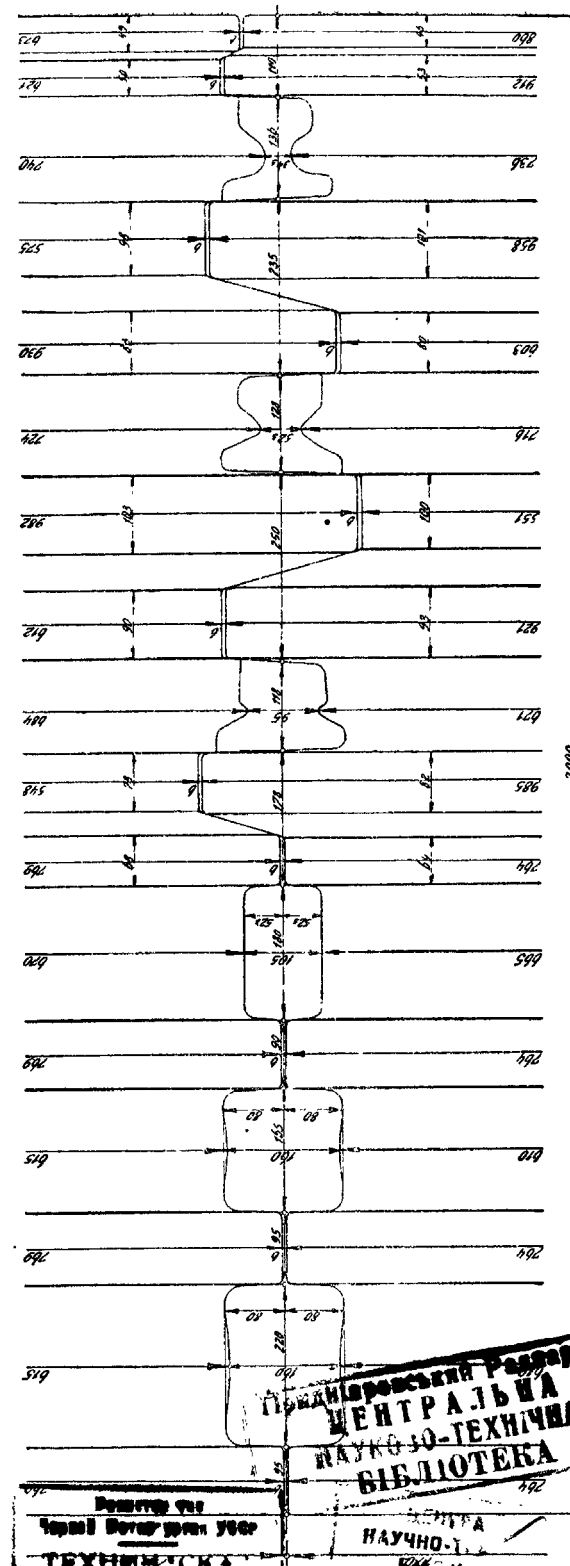
На фиг. 4—9 пока-
заны чертежи различ-
ных черновых и отде-
лочных валков. Они
могут служить общим
руководством при из-
готовлении чертежей
валков. По ним видно,
что диаметры частей
валков, находящихся
между двумя соседни-
ми калибрами, в одном
случае больше, в дру-
гом меньше чем диа-
метры рядом находя-
щихся частей калиб-
ров.

Для предотвраще-
ния горизонтального
смещения валков край-
ние бурты валков де-
лаются ступенчатыми.
Фиг. 4—6 показывают,
что такие уступообраз-
ные бурты делаются не
только по краям вал-
ков, но и в середине,
особенно при прокатке
фасонных профилей.

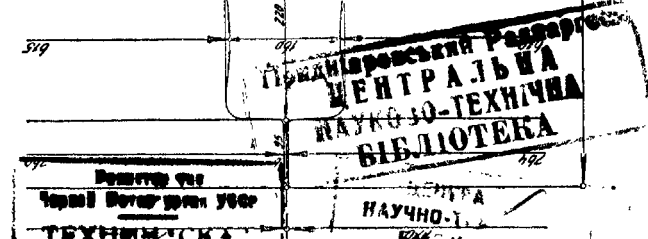
При изготовлении
чертежа валков нужно
иметь в виду, что чи-
сло буртов всегда на
один больше, чем чи-
сло калибров. Бурты
на валках служат, во-
первых, для отделения

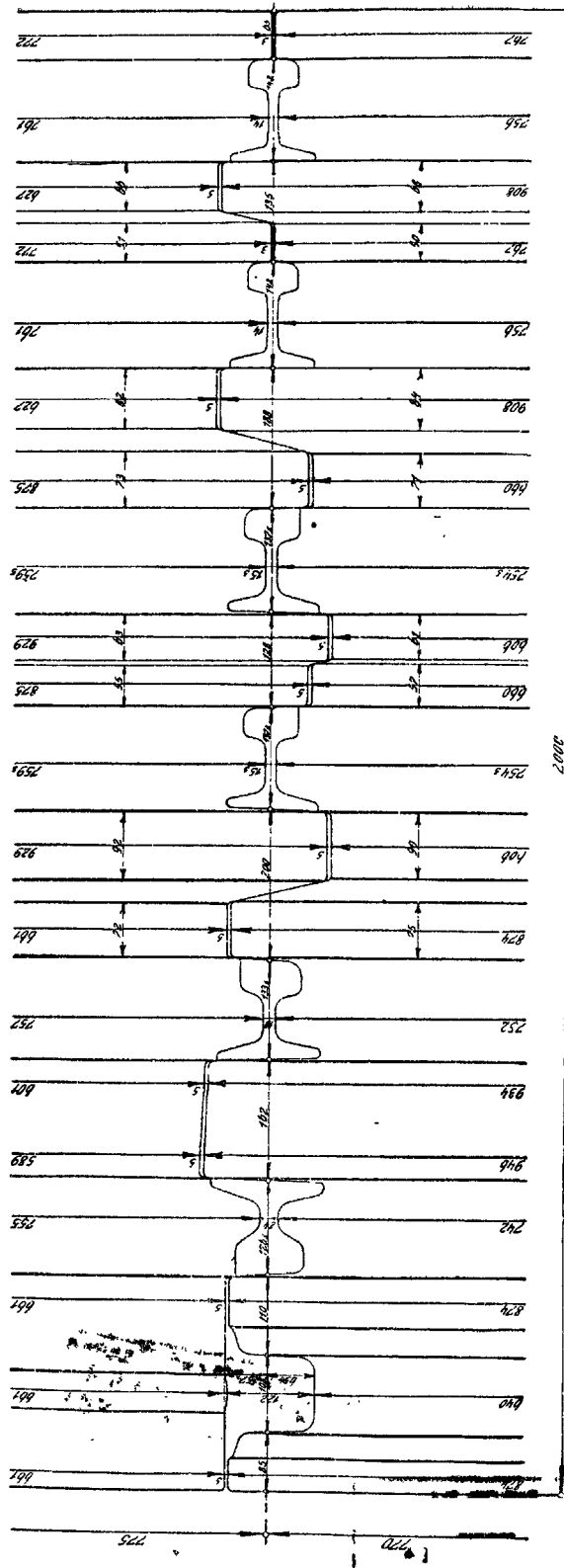
калибра от калибра
и во вторых, они
должны восприни-
мать имеющее место
во время прокатки
боковое давление.
Размеры буртов
определяются не по
величине бокового
давления, так как по-
следнее чрезвычайно
трудно поддается
подсчету, а по ста-
рому испытанному
правилу: ширина бур-
та в чугунных вал-
ках минимум равна
высоте наибольшего
углубления в сосед-
нем калибре, иными
словами, $s_{\min} = m + z$
(фиг. 10).

Так как ширина
буртов связана с
длиной бочки вал-
ка, то для возмож-
ности более полного
использования этой
длины эта зависи-
мость не всегда точ-
но соблюдается. Так,
например, ширину
буртов можно де-
лать меньше суммы
 $m + z$ во всех слу-
чаях калибровки про-
стых сечений, а глав-
ным образом, там,
где бурты имеют
большой выпуск или
где угол соседнего
калибра может быть
соответствующим
образом скошен или
закруглен. При этом
не следует забывать,
что чрезмерная эконо-
мия на ширине
буртов может пове-
сти к их преждевре-
менной поломке и
вследствие этого к
выходу из строя
всего валка. Для



Фиг. 5. Калибровка валков для релс — черновые валки крупносортового стана.



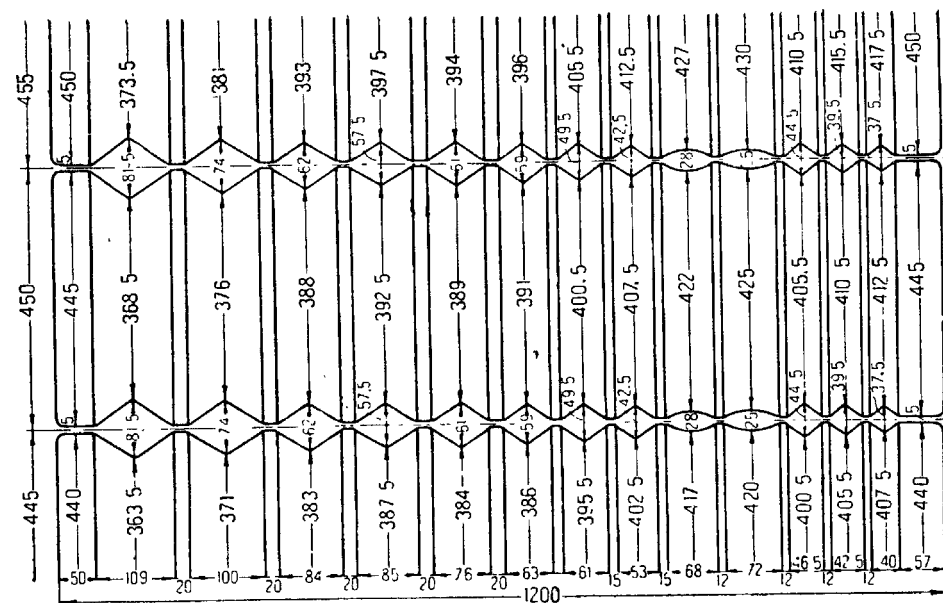


Фиг. 6. Калибровка валков для рельс — чистовые валки крупнорельсового стана.

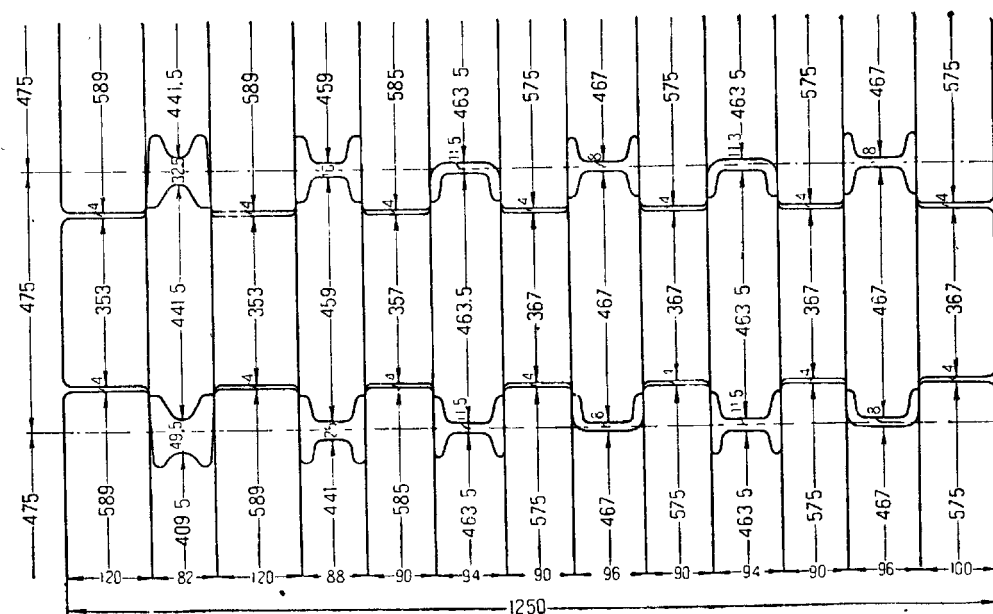
валков из литой стали, как более прочных, достаточно брать ширину буртов равной $\frac{2}{3}$ от глубины вырезов. Кроме всего вышесказанного в чертежах валков должны быть обязательно указаны зазор, величина выпуска калибров, высота и ширина калибров.

Зазор представляет собой свободную щель между буртами валков, наличие которой предохраняет валки от соприкосновения между собой и кроме того облегчает настройку и установку калибров по высоте.

Величина зазора колеблется в пределах от 1 до 5 мм и находится примерно в прямой зависимости от диаметра валков. Под выпуском подразумевается такой вид очертания калибров, при котором боковые ограничивающие калибр стороны (правая и левая) сходятся или, что то же, расходятся. Выпуск, таким образом, представляет собой взаимоположенный наклон, вернее, величину наклона боковых линий калибра. Выпуск в калибре имеет целью облегчить как „задачу“, так и выход прокатываемого металла из валков. Кроме того выпуск дает

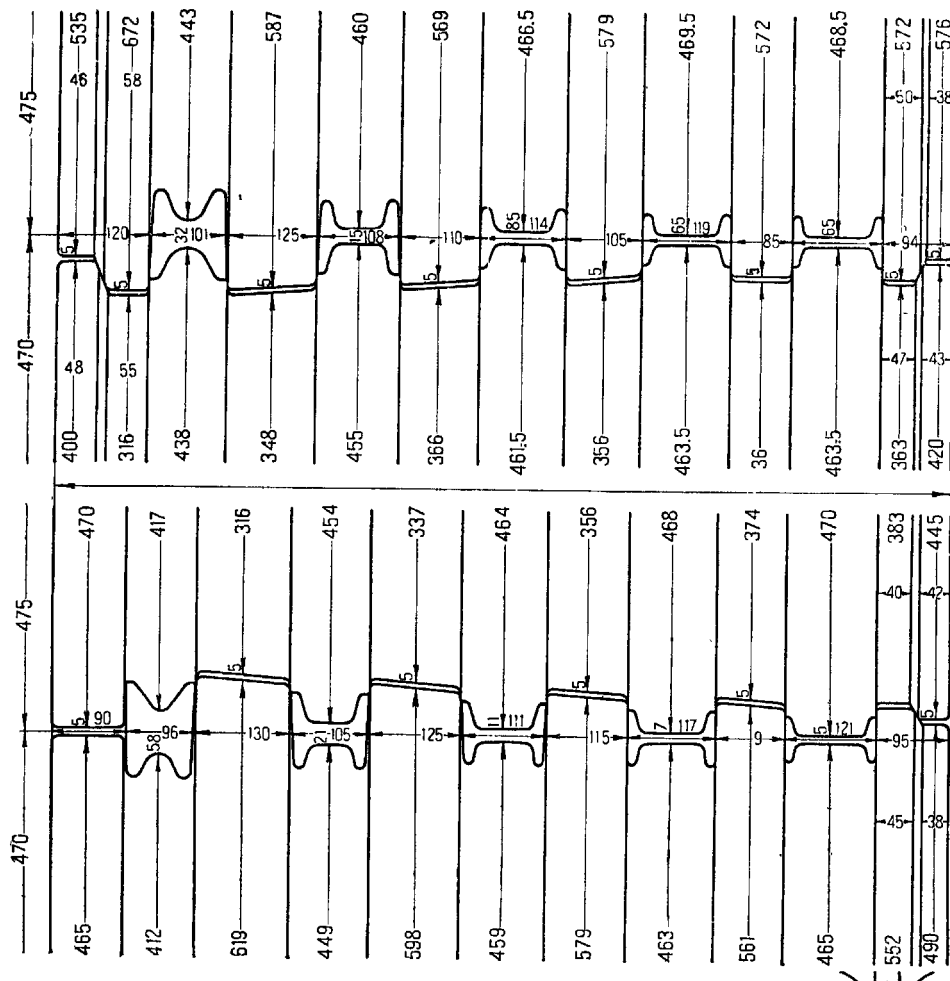


Фиг. 7. Чертеж валков черного стана трио.



Фиг. 8. Калибровка черновых валков стана трио для балок.

возможность путем незначительной переточки восстановить сработанные калибры в их первоначальном виде, что при отсутствии выпуска невозможно. Вместе с тем не подлежит сомнению, что применение выпуска в чистовых или предчистовых калибрах может идти за счет совершенства сечения, особенно в тех случаях, когда наружные боковые линии параллельны между собой, т. е. обра-



Фиг. 9. Калибровка чистовых валков стана допель-дуо для балок.

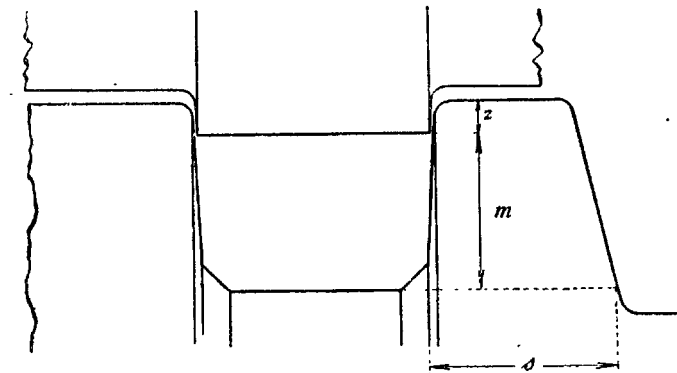
зуют с горизонтальными сторонами прямой угол. Именно поэтому безусловно необходимо по мере прокатки, т. е. по мере приближения к чистовым калибрам, постепенно уменьшать выпуск. На этом основании выпуск в черновых калибрах обыкновенно составляет 3—10%, а в чистовых калибрах 2—3%. В больших разделенных по горизонтальной оси открытых калибрах выпуск делается большим, чем в так называемых закрытых калибрах, у которых откры-

тие имеется только у верхних или нижних углов; равным образом выпуск меньше у тонких профилей, чем у толстых.

Проставление размеров высоты и ширины калибров на чертежах валков едва ли нуждается в более близком рассмотрении. В тех случаях когда имеются точно изготовленные шаблоны калибров, на чертежах валков наносятся только основные размеры, указывающие на величины обжатий.

Под линией прокатки (нейтральная линия) подразумевается прямая линия, лежащая в плоскости чертежа, являющаяся линией соприкосновения двух идеальных, совместно работающих цилиндрических валков. Положение этой нейтральной линии имеет большое значение при изготовлении чертежа валков, в связи с чем ее необходимо уметь определять.

На основе вышеизложенного становится ясным, что изготовление чертежа валков должно начинаться с определения диаметров



Фиг. 10. Соотношение размеров буртов.

валков, вернее, с нанесения нейтральной линии. Далее ясно, что для стана дуо необходимо иметь одну нейтральную линию, для станова трио или допель-дуо — две. После нанесения нейтральной линии на ней распределяются калибры, согласно изготовленным шаблонам, и на основе уже известных правил определяются форма и размеры буртов; этим, собственно говоря, заканчивается конструкторская работа по изготовлению чертежа валков. Чертеж валков затем дополняется правильно вычисленными размерами диаметров и ширин, которые наносятся на нем на соответствующих местах (фиг. 4—9).

Положение нейтральной линии устанавливается по верхнему или нижнему давлению. Под верхним или нижним давлением подразумевается больший диаметр одного из валков, находящихся под или над нейтральной линией. Разница в размерах диаметров, выраженная в миллиметрах, является численным выражением верхнего или нижнего давления. Верхнее или нижнее давление в отношении диаметра валков определяется в 5—35 мм. Как правило, однако, верхнее или нижнее давление, за исключением обжимных валков, не превышает 10 мм. Применение верхнего или нижнего давления диктуется желанием, чтобы прокатываемая полоса по выходе из калибра шла вверх или вниз. Это легко достигается применением верхнего или нижнего давления в связи с тем, что более

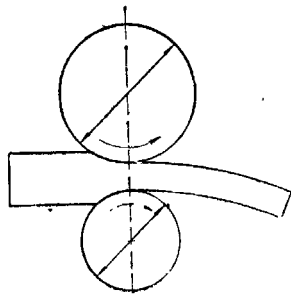
толстый валок, вследствие большей его окружной скорости, в определенный отрезок времени вытягивает большей длины полосу, чем валок с меньшим диаметром, поэтому полоса отгибается большим валком в сторону меньшего (фиг. 11). Такое обжатие прокатываемого металла необходимо для того, чтобы противодействовать слишком сильному прилипанию к калибру и чтобы полоса принудительно направлялась на проводки или для того чтобы предохранить ролики рольганга, вернее, их шейки и подшипники от сильных ударов при падении на них прокатываемых полос.

При изготовлении чертежа валков для фасонных профилей необходимо иметь в виду, что минимум два бурта должны иметь уступы, расположенные в противоположные стороны, - с целью предотвращения сильного горизонтального смещения валков друг относительно друга.

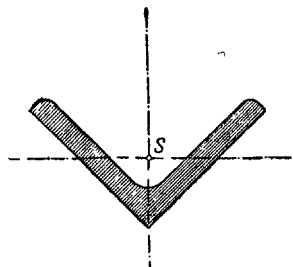
Если по каким-либо причинам такое выполнение буртов невозможно, то необходимо сделать оба крайние бурта с уступами, сделав их при этом достаточно широкими.

При прокатке играет большую роль еще одно важное обстоятельство, которое при изготовлении чертежей валков должно быть принято во внимание, именно расположение калибров по их высоте на нейтральной линии.

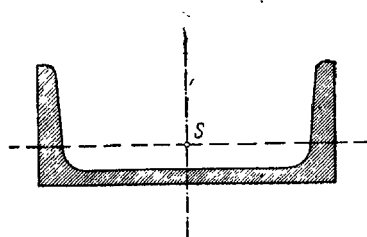
Калибры на нейтральной линии должны быть расположены таким образом, чтобы окружные скорости поверхностей валков, находящихся в соприкосновении с одними и теми же частями профиля, были при-



Фиг. 11. Влияние различия диаметров валков.



Фиг. 12. Расположение сечения углового профиля на нейтральной линии.



Фиг. 13. Расположение сечения швеллера на нейтральной линии.

близительно одинаковыми. Если разница между окружными скоростями слишком велика, то прокатываемая полоса увлекает за собой валок меньшего диаметра, имеющий меньшую окружную скорость, и при выходе полосы из калибра в стане получается очень сильный „обратный удар“, часто влекущий за собой поломки.

Этот обратный удар является результатом того, что валок, увлеченный быстрее движущейся полосой в момент ее выхода из ка-

либра, внезапно останавливается, в то время как ближе лежащие к машине валки и соединения, вращающиеся с полной скоростью, со всего размаха ударяют в останавливающуюся тяжелую массу. В таких случаях возможна моментальная и одновременная поломка многих частей стана. Эта опасная разница между окружными скоростями может быть уменьшена, когда линия центра тяжести калибра будет совпадать с нейтральной линией.

Линия центра тяжести может быть определена с достаточной точностью следующим образом: железный шаблон данного калибра устанавливается на остром ребре какого-либо твердо стоящего предмета, например трехгранной масштабной линейки, в том же положении, как он должен лежать на нейтральной линии и при этом шаблон должен быть в равновесии (фиг. 12 и 13).

V. ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ ПРИ ПРОКАТКЕ

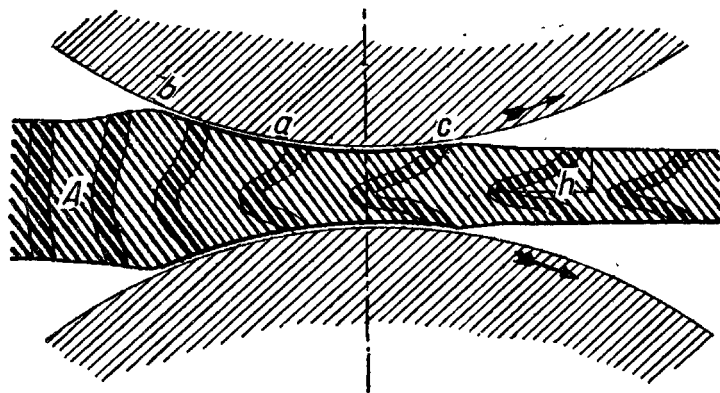
В главе I было установлено, что прокатка собственно представляет собой непрерывный процессковки. Точное и надежное теоретическое исследование напряжений при прокатке упирается в целый ряд больших трудностей, во-первых, в то, что при процессе прокатки мы имеем дело одновременно как с упругими, так и пластическими деформациями, во-вторых, потому что при прокатке мы имеем дело с объемными напряжениями и обстоятельствами, связанными с изменением формы¹².

В связи с тем, что точное теоретическое определение явлений пластической деформации невозможно даже в случае, если для упрощения будет принято, что истечение металла происходит в одной плоскости, то для определения рода и действия давления прокатки наиболее удобным является исследование линий скольжений в материале прокатной полосы, выявляемых путем травления. Этот способ исследования был впервые применен Холленбергом¹³. В исследуемых полосах через каждые 25 мм были просверлены отверстия в 6—7 мм диаметром, в которые вставлялись обточенные круглые прутки вязкого железа. Валки в момент прохождения полосы через них специально останавливались с таким расчетом, чтобы полоса в них застревала. По продольной вертикальной плоскости прутков делался разрез — шлиф, на котором путем травления выявлялась форма деформированных прутков. В связи с тем, что результаты работы Холленберга представлены только графически, автор приводит их точно по оригиналу вместе с тремя важнейшими волокнами (фиг. 14). По этим волокнам из работы Холленберга ясно видно, что этот рисунок показывает не действительное изображение испытанной полосы, а является только эскизом, набросанным по памяти. После Холленберга длительное время этот опыт не был никем повторен, поэтому холленберговские фигуры смещения были приняты как достоверные, но при этом обычно подчеркивался тот факт, что эскиз внешнего вида деформированных прутков сделан по

¹² Friedr. Körber u. Erich Siebel, Ueber die Beanspruchungs-Verhältnisse beim Schmieden und Walzen, „Mitteilungen aus d. K.-W.-Institut f. Eisenforschung“, Düsseldorf 1928, Bd. X, Lief. 2, S. 15—22.

¹³ „Stahl u. Eisen“, Jahrgang 1883, H. 2.

памяти и возможно даже, что значительно позднее чем был сделан сам опыт. Бенценлайтнер первый проверил правильность опыта Холленберга, повторив его. Бенценлайтнер вместо прутков, вставленных в просверленные отверстия, применял для опытов полосы, на которых были проделаны вертикальные параллельные друг другу канавки¹⁴. Так как деформированные канавки на фотографиях Бенценлайтнера немного искажены, вследствие ли большой разницы в диаметрах валков или сильной сработанности вкладышей, то здесь приводится снимок, сделанный автором в Металлургическом институте Высшей школы в Сопроне (фиг. 15). Из этой фигуры ясно видно, что деформированные канавки имеют стремление после прохода через валки восстановить свою первоначальную,



Фиг. 14. Холленберговские фигуры деформированных прутков в прокатанной полосе (сфотографировано из „Stahl und Eisen“, № 121, 1883 г.).

прямую форму. Кроме того видно, что даже наиболее сильно изогнутые канавки не могут принять воронкообразной формы. Автор имел возможность убедиться в этом как на производстве, так и в научно-исследовательском институте.

То что канавки на прокатанной полосе после прохода через валки должны оставаться прямыми, подтверждается также теоретическими соображениями. Частицы материала полосы под влиянием давления валков (по Финку), двигаются по направлению их радиусов, вернее, их продолжений¹⁵. Вследствие этого радиусы кривизны канавок (фиг. 16) должны быть тем больше, чем ближе они приближаются к самому узкому месту между валками. Из этого вполне ясно, что первоначально прямые канавки по выходе из валков должны оставаться прямыми, так как их радиус кривизны в вертикальной плоскости по оси валков бесконечно большой. Все это происходит в действительности и подтверждается данными практики и опытов при условии соответственно большого давления или небольшой толщины полосы. Только при этих обстоятельствах давление

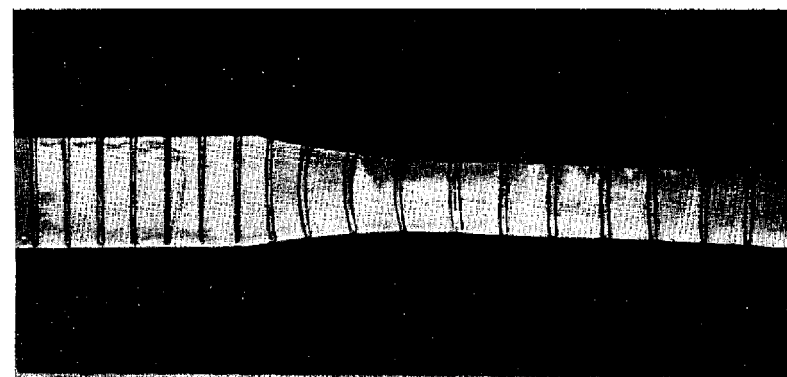
¹⁴ E. Cotel, Ueber die Begleiterscheinungen des Walzvorganges, „Montan. Rundschau“, Wien—Berlin 1924, 636.

¹⁵ См. статью автора в „Montan. Rundschau“, Wien—Berlin (1924), 636, затем Dr. P. Puppe-Stauber, Walzwerkswesen, Bd. I. Berlin—Düsseldorf 1929, S. 635.

может проникать достаточно глубоко, при этом равномерно распространяясь по всей толщине полосы.

В этих случаях канавки по выходе из валков действительно принимают снова вид прямых линий (фиг. 17).

Если обжатие недостаточно велико или полоса недостаточно тонка, то давление не будет глубоко проникать, вследствие чего слои материала, находящиеся в середине полосы, будут двигаться без давления, следовательно, без вытяжки и поэтому будут немного отставать. Это отставание является небольшим, так как средние слои увлекаются верхними слоями. В таких случаях канавки не восстанавливают полностью своего первоначального положения — они остаются несколько изогнутыми в сторону заднего конца полосы (фиг. 18).



Фиг. 15. Деформированные вертикальные канавки в прокатанной полосе. (Опыт и снимок автора).

На практике это явление подтверждается вполне аналогичным видом концов полос, прокатанных при небольшом давлении. Из вышеуказанного следует, что канавки могут принимать вогнутую форму, но ни в коем случае не воронкообразную.

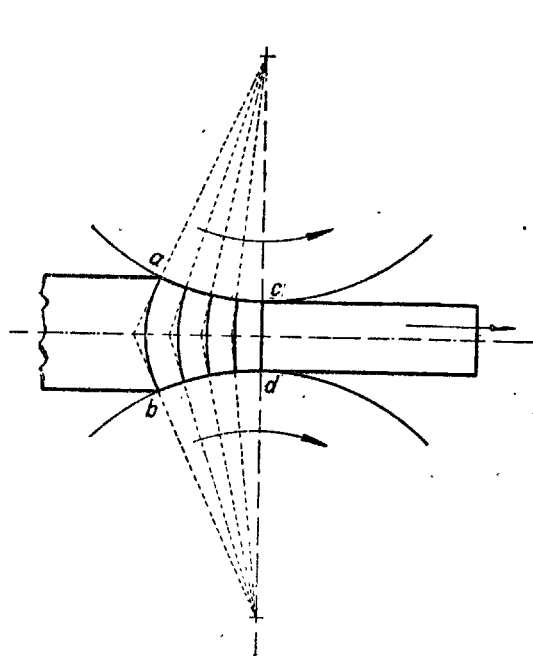
То обстоятельство, что давление при прокатке распределяется по толщине полосы неравномерно, причем это давление больше в наружных слоях, чем в срединных, известно уже давно; численно это давление было проверено опытом Бенценлайтнера¹⁶. При этом опыте на полосе были сделаны горизонтальные канавки, распределенные таким образом, что полоса высотой в 40 мм была разделена на 8 слоев по 5 мм толщиной каждый (фиг. 19). Этим опытом было твердо установлено, что после пропуска расстояние между верхними и нижними канавками уменьшилось больше, чем между срединными. Высота слоев материала изменилась после пропуска, считая сверху или снизу к середине, согласно следующему: 1,9, 2,6 и 3,0 мм (фиг. 20). Численные величины размеров слоев в сечениях *ab* и *ef* (фиг. 20) будут разобраны в следующей главе. Здесь необходимо только отметить, что опыты по ковке с подобно приготовленными пробами дают совершенно аналогичные результаты. Это

¹⁶ „Montan. Rundschau“, Wien—Berlin 637, 1924.

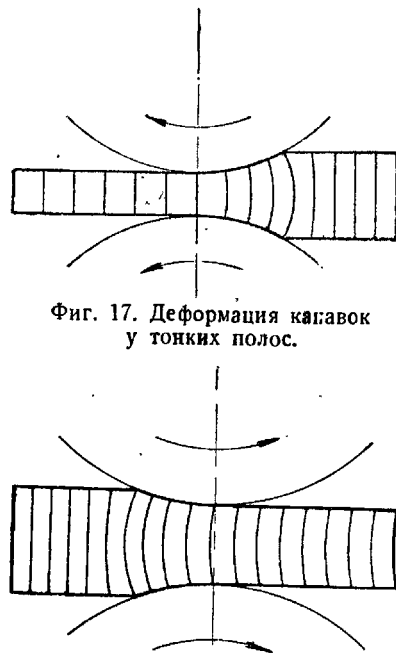
получается естественно только при так называемой протяжке, — еще одно доказательство коренного сходства обоих видов деформации.

По вопросу о плоскостях скольжения, или линиях скольжения, по которым двигаются частицы материала во время прокатки, имеется целый ряд капитальных трудов, из которых можно упомянуть труды Хенки¹⁷, Л. Прандтля¹⁸, Мейера и Неля¹⁹, а также Кербера и Зибеля²⁰.

Хенки и Прандтль на основании теоретических соображений составили диаграммы линий скольжения для полос, обжимаемых с обеих сторон.



Фиг. 16. Постепенное уменьшение радиусов кривизны канавок.



Фиг. 17. Деформация канавок у тонких полос.

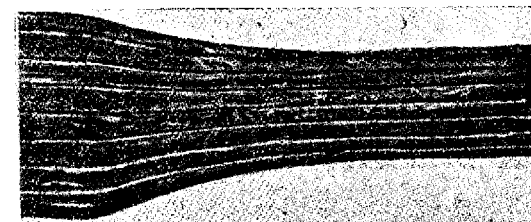
Фиг. 18. Деформация канавок у толстых полос.

Кербер и Зибель для этой цели обрабатывают полосы из мягкого железа на узких бойках прессы.

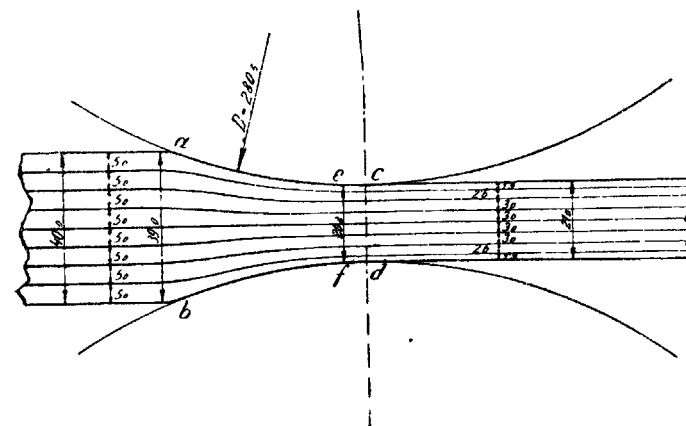
Плоскости скольжения или их линии в плоскости шлифа выявляются при помощи травления по способу Фришера.

На фиг. 21 показаны пучки линий скольжений в их основной форме. Фиг. 22 показывает пучки линий скольжения, полученных на испытанных кусках мягкого литого железа; чем больше дав-

ление, тем на большую глубину проникают линии скольжения; при достаточно большом давлении они сливаются друг с другом и при этом увеличиваются в размерах. Это явление увеличения общей площади отдельных пучков линий скольжения подтверждается фиг. 22. Причина этого заключается в влиянии слоев материала, находящегося по обе стороны инструмента, производящего давление. Действие давления вследствие пластичности материала полосы распространяется на большую поверхность, чем ширина давящего инструмента, что можно ясно видеть из фиг. 22. Линии скольжения, получающиеся при прокатке, должны иметь вполне аналогичную форму. Это следует, с одной стороны, из принципиального сходства обоих видов деформации и, с другой стороны, подтверждается данными практики, именно тем, что границы линий, получающихся при осыпании окалина с полосы во время прокатки, полностью соответствуют линиям скольжения, получающимся при ковке. Давящая поверхность при прокатке непрерывно катится вперед, в результате чего в прокатываемой полосе накапливаются одна за другой очень много линий скольжения. Фиг. 23 показывает



Фиг. 19. Распределение давления при прокатке по высоте полосы (Опыт Бенценлайтнера).



Фиг. 20—фиг. 19 в числовом выражении.

образование первоначальных (I) и последующих (II) линий скольжения в прокатываемой полосе. При малом обжатии линии скольжения, выявленные травлением по Фришеру, оказываются не связанными между собой (фиг. 24 — опыт Мейера и Неля).

При большом давлении линии скольжения в прокатанной полосе накапливаются так густо, что после травления шлифа они представляются в виде сплошной поверхности (фиг. 25). Переход-

¹⁷ H. Henky, Einige Fälle des Gleichgewichtes in plastischen Körpern, „Zeitschr. f. angew. Math. u. Mech.“, 1923, 241.

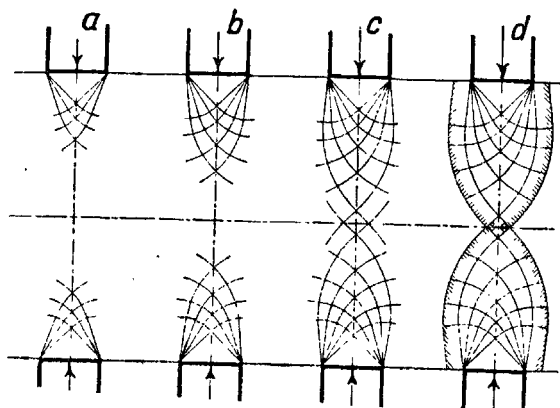
¹⁸ L. Prandtl, Anwendungsbeispiele zu einem Henkyschen Satz, „Zeitschr. f. angew. Math. u. Mech.“, 1923, 401.

¹⁹ H. Meyer u. F. Nehl, Die grundlegenden Vorgänge der bildsamen Verformung, „St. u. E.“, 1925, № 48.

²⁰ E. Körber u. E. Siebel, Ueber die Beanspruchungsverhältnisse beim Schmieden und Walzen, „Mitt. a. d. K.-W.-Inst. f. Eisenf.“, 1928, 15.

ные линии этой поверхности имеют ту же форму, как и отдельные линии скольжения (фиг. 25).

Совершенно ясно, что при больших обжатиях в местах линий скольжения могут образоваться трещины. Различные формы концов прокатанных полос являются непосредственным следствием влияния обжатия при прокатке, вернее, глубины проникания обжатия по толщине полосы. Уже было установлено в связи с фиг. 18,



Фиг. 21. Линии скольжения в обжатой полосе.

что выходящий (передний) конец полосы при малом обжатии или при небольшой толщине ее имеет небольшую вогнутость. Данные практики показывают, что при правильно выбранном обжатии концы полос средней толщины после прокатки получаются прямыми (фиг. 17). При достаточно большом обжатии и достаточно пластичном металле возможны случаи, когда

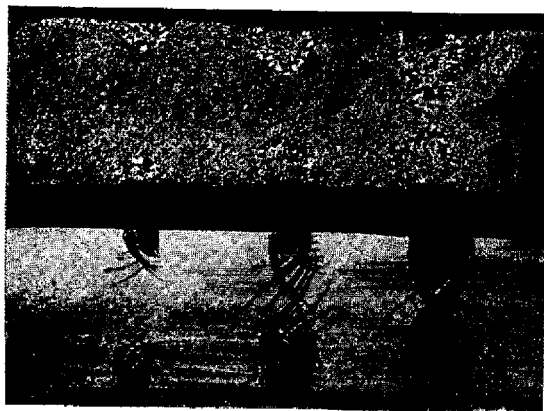
концы прокатанных полос получаются выпуклыми. На причины этих явлений было уже указано выше. Фиг. 26 показывает все это графически²¹.

концы прокатанных полос получаются выпуклыми. На причины этих явлений было уже указано выше. Фиг. 26 показывает все это графически²¹.

VI. ЯВЛЕНИЯ, СОПРОВОЖДАЮЩИЕ ПРОЦЕСС ПРОКАТКИ. ВЫТЯЖКА И УШИРЕНИЕ

Прямым следствием обжатия при прокатке является уменьшение площади сечения и связанное с этим увеличение длины полосы. Так как удельный вес²¹

и объем данной полосы остаются неизменными (незначительное увеличение плотности практически не имеет значения), то совершенно ясно, что полоса после пропуска становится на столько процентов длиннее, на сколько площадь исходного сечения была больше площади готового профиля, т. е. длины полос до и после пропуска обратно пропорциональны площадям сечения до и после пропуска.



Фиг. 22. Линии скольжения в обжатом опытном куске из мягкого железа.

Обозначая через F площадь исходного сечения, f — площадь конечного сечения, L — первоначальную длину полосы, l — длину готовой полосы, на основе неизменяемости объема

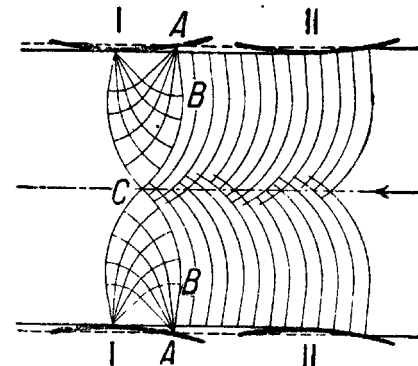
$$FL = fl,$$

откуда

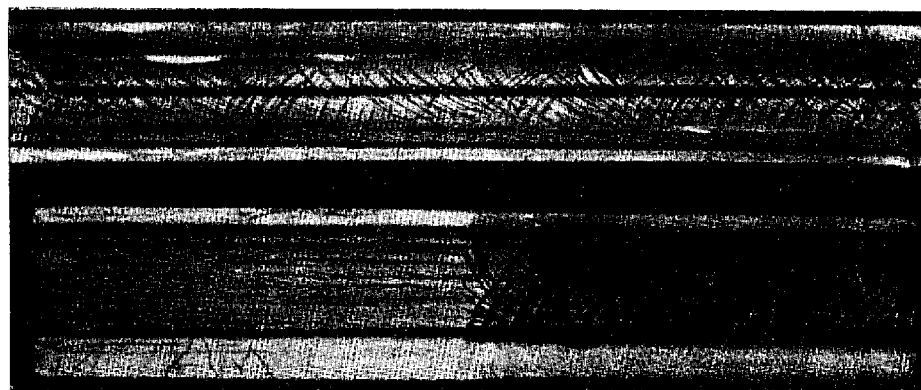
$$\frac{F}{f} = \frac{l}{L}.$$

Значение величины уменьшения сечения может, таким образом, постоянно служить для определения длины полосы после пропуска. Это значение остается неизменным вне зависимости от формы сечения. Площадь сечения фасонных профилей обычно определяется путем планиметрирования.

Из выведенной ясной и закономерной зависимости вовсе не следует, что все части какого-либо прокатываемого профиля увеличиваются в одинаковом процентном отношении. Это возможно только тогда, когда все части сечения имеют одинаковое процентное обжатие. Другими словами, точно соответствующее частичному давлению удлинение отдельных частей сечения возможно только в случае простых сечений. Совершенно понятно, что отдельные части фасонных профилей, например подошва, полки и шейка, не могут подвергаться таким же большим обжа-



Фиг. 23. Линии скольжения при прокатке.

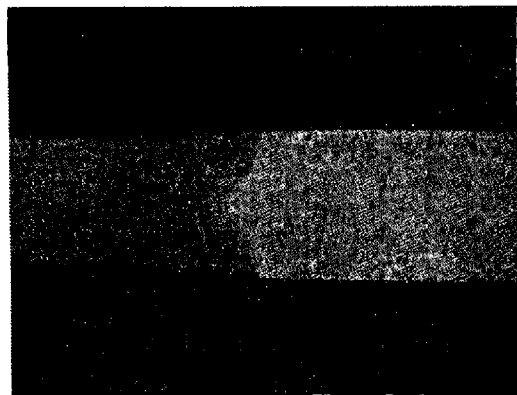


Фиг. 24. Линии скольжения в прокатанной полосе (Опыт Мейера и Неля „Stahl und Eisen“, 1925, № 48).

тиям, как остальные части данного сечения простой формы и находящиеся в горизонтальном положении. Так, например, подошва рельс и фланцы двутавровой балки получают малое обжатие, в то

²¹ Ср. также Dr. Puppe-Stauber, Walzwerkswesen, Düsseldorf—Berlin, 1929, S. 635.

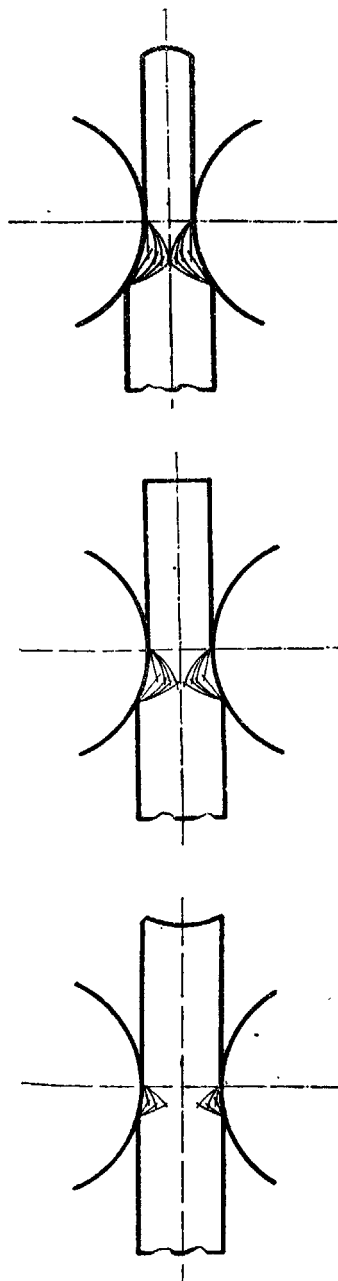
время как связанные с ним части, как например, шейка рельса или балки, проходят через тот же калибр при соответственно большем давлении. Полная длина прокатанной полосы, однако, и в этом случае соответствует уменьшению полной площади сечения, но при этом отдельные части сечения удлиняются по-разному: подошва больше, шейка меньше, чем следовало бы при условии полного соответствия удлинения обжатия в отдельных частях. Для объяснения этого своеобразного явления



Фиг. 25. Вид линий скольжения в сильно обжатой прокатанной полосе (Опыт и снимок автора).

ния процесса прокатки приводится следующий пример. Необходимо, в виде исключения, кусок длиной в 1 м, сечением, показанным на фиг. 27, прокатать в один проход с таким расчетом, чтобы средняя наиболее тонкая часть не получила никакого обжатия, в то время как боковые части должны быть обжаты с 20 до 12 мм. Результатом этого пропуска будет, само собой разумеется, уменьшение площади сечения с 960 мм² на 640 мм², и при этом кусок с первоначальной длиной в 1 м получит длину $960 : 640 = 1,5$ м, т. е. отношение площадей сечения и отношение длин и в данном случае точно соответствуют друг другу.

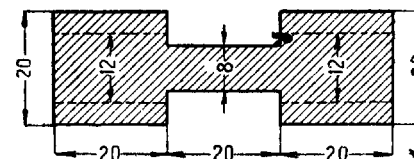
В то время как сильно обжатые боковые части (40% сечения) вытянулись с 1 до 1,5 м, средние части, не получившие никакого



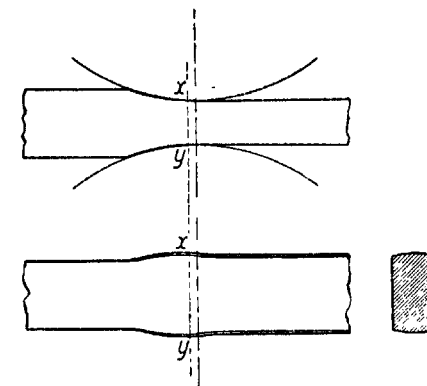
Фиг. 26. Форма концов полос при прокатке.

обжатия, но связанные с боковыми частями, были вынуждены также увеличить свою длину до 1,5 м. На основании нашего расчета можно также установить, что при условии ни с чем несвязанной свободы движения боковые части должны были бы удлиниться на $20 : 12 = 1,67$ мм. Связанные между собой части одного сечения, испытывающие различные давления, оказывают определенное и значительное влияние друг на друга:двигающиеся под большим давлением частицы увлекают с собой соседние слабо или совсем не обжимаемые, в то время как последние препятствуют свободному удлинению первых. Части, сильно обжатые и не могущие свободно удлиниться, увеличивают свою плотность и при этом уширяются; слабо обжатые, но увлекаемые соседними частицами части вытягиваются и при этом уменьшаются во всех своих размерах.

По поводу часто замечаемого при прокатке фасонных профилей «неожиданного» укорачивания некоторых частей сечения раньше часто говорили, «что железо из слабо обжимаемых частей сечения переходит в части, сильно обжимаемые», что, само собой разумеется, невозможно. Это явление есть не что иное, как естественное следствие вышеописанного взаимного влияния соседних частей сечения.



Фиг. 27. Сечение с неравномерно распределенным давлением.



Фиг. 28. Уширение прокатанной полосы.

Неодинаковое удлинение отдельных частей сечения, вернее их вытяжка, без соответствующего обжатия сопряжено с опасностью. В прокатанных таким образом полосах возникают напряжения, ведущие к образованию рванин и трещин. В связи с этим при прокатке фасонных профилей должно быть обращено особое внимание на правильное распределение давления.

Было упомянуто, что части сечения, не могущие свободно удлиниться, склонны к большему уширению. Следовательно, уширение прокатываемой полосы — это такое явление, которое получается, когда свободное удлинение частей встречает препятствия.

Собственно уширение выражается в том, что ширина полосы после прохода получается большей, чем до прохода. Таким образом в момент, когда полоса находится во вращающихся валках, уменьшается не только ее сечение и увеличивается ее длина, но изменяется также и ее ширина. При прокатке металлов уширение всегда имеет место и поэтому его необходимо учитывать. К сожалению, точно вычислить величину уширения пока невозможно, так как величина его зависит не только от величины обжатия, а, глав-

ным образом, от пластичности металла, являющейся в свою очередь функцией температуры, обычно быстро падающей при прокатке.

Уширение с точки зрения механической технологии есть следствие осаживания, которое влечет за собой увеличение ширины. Осаживание при прокатке имеет место в результате того, что частички рядом расположенных вертикальных слоев относительно вязкой стали под влиянием обжатия выжимаются с некоторой скоростью, так что позади вертикальной плоскости по осям валков происходит накопление металла, которое при данных условиях выражается только в уширении. Что это так, можно убедиться, если остановить прокатку полосы, прокатываемой при достаточном давлении, в момент, когда она прошла примерно до половины своей длины; в этом случае можно наблюдать, что на расстоянии нескольких миллиметров от вертикальной плоскости осей валков уширение достигает своей максимальной величины. Полоса позади валков шире своего выходящего конца (фиг. 28, $x-y$), что указывает на явление наибольшего осаживания в этом сечении. В связи с этим необходимо снова остановиться на размере толщины полосы ef по фиг. 20, а также на размере ab той же фигуры. Размер ef обозначает толщину полосы в сечении, к которому относится и $x-y$ (фиг. 28.)

Это сечение застрявшей между валками полосы обладает особыми свойствами: ширина его больше, чем ширина полосы, выходящей из валков, а высота меньше соответствующей высоты. Это исключительное явление не имеет, однако, никакого значения, так как при продолжающейся прокатке указанные небольшие отличия в размерах под влиянием упругих деформаций в момент, когда полоса проходит через узкую щель между валками, снова пропадают.

В связи со сделанными замечаниями к фиг. 20 здесь необходимо упомянуть, что размер ab по фиг. 20 — опытом установленный факт — является доказательством того, что еще до момента, когда валки входят в соприкосновение с полным сечением прокатываемой полосы, высота последней начинает уменьшаться. Это является исключительно результатом вязкости связанных между собой частичек, результатом их взаимного воздействия, известного нам из исследования явлений, представленных на фиг. 22. Тафель даже в новом издании упомянутой его книги придерживается совершенно несостоятельного мнения, что непосредственно перед наибольшим обжатым сечением толщина полосы увеличивается. Чтобы доказать данное положение, Тафель приводит сделанный только на память, несомненно неверный рисунок Холленберга и приводит его слова: «...также и опыты Холленберга указывают на влияние «напора».

Уширение в процессе прокатки можно считать скорее нежелательным, чем благоприятным явлением. Вместе с тем имеется очень много возможностей полезно использовать это обычно нежелательное явление именно для хорошего заполнения калибра и получения острых кромок. Жезом²² найдено, что свободное уширение, наблюдаемое в производстве, в среднем соответствует

$$B = 0,35(h_1 - h_2)$$

где h_1 — высота полосы до и h_2 — после прохода. Температура при этом вовсе не учитывается, учитывается только обжатие, вернее, уменьшение высоты сечения. Из формулы Жеза следует, что уширение в среднем равно $\frac{1}{3}$ уменьшения высоты. Вполне точных данных эта формула не дает. Вычисленные по этой формуле значения уширения все же очень близко соответствуют данным практики. Для хорошего выполнения закрытого калибра уширение безошибочно определяется как

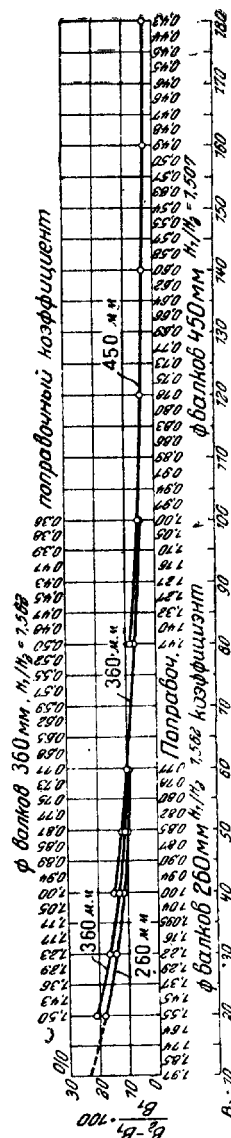
$$B = \text{от } 0,2 \text{ до } 0,3(h_1 - h_2).$$

Для остывших и толстых полос применяются большие значения формулы, а для более горячих и тонких — меньшие. На практике уширение обычно определяется по формуле Жеза, простой по существу и достаточно точной.

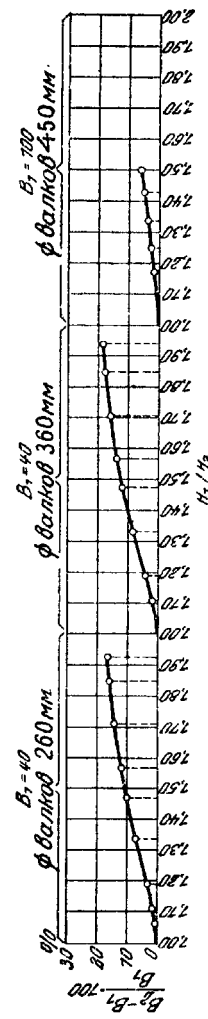
Из формул по определению уширения, опубликованных в последнее время, должны быть упомянуты формулы Зибеля, Седлацека и Метца. При этом необходимо отметить, что метод Метца является скорее графическим, чем аналитическим решением этого вопроса.

Формула уширения Зибеля²³ следующая:

$$B = C \frac{h_1 - h_2}{h_1} \sqrt{h_1 - h_2}$$



Фиг. 29. Влияние первоначальной ширины полосы и диаметра валков на уширение («Stahl und Eisen» 1925 г., № 14)



Фиг. 30. Влияние уменьшения высоты и диаметра валков на уширение.

²² L. Geuze, Laminage du fer et de l'acier, Paris 1900, 11, 1921.

²³ „Bericht d. Walzwerksausschusses“, 1922, № 28.

где r — радиус валков, C — опытный коэффициент. Среднее значение $C = 1 : 3,2$.

Формула Седлацека ²⁵ имеет следующий вид:

$$B = \frac{h_1 - h_2}{6} \sqrt{\frac{r}{h_1}}$$

здесь уже коэффициент $C = 1$.

Из новейших формул следует, что уширение увеличивается не только с увеличением степени обжатия, но также с увеличением диаметра валков.

Метод Метца сводится к следующему ²⁶. Данные своих методов Метц изображает в виде 3—4 графиков раздельно по первоначальным толщинам полос и диаметрам валков, показанных на фиг. 29—32.

Для вычисления уширения по этим графикам он рекомендует следующий способ. Оставляя без внимания первоначальную ширину полосы, из графика фиг. 30 определяется величина уширения, соответствующая заданному уменьшению высоты и диаметру валков. Найденная таким образом величина уширения для полос шириной в 40 или 100 мм пересчитывается на действительную начальную ширину полосы следующим образом: из графика фиг. 29 определяется относящееся к заданной начальной ширине уширение; последнее делят на соответствующее этой величине число между начальной шириной от 40 до 100 мм и, наконец, полученную величину умножают на число, определяемое из графика фиг. 30.

При небольшой начальной ширине полос, меньше 20 мм, необходимо величину, определяемую из графика фиг. 31, разделить на поправочное число, взятое из графика фиг. 32.

Метод Метца очень сложен и, как показывают сравнительные подсчеты, данные уширения по Метцу отличаются от данных, полученных по формуле Жеза, на небольшую величину, не превышающую 0,1—0,2 мм; этим обстоятельством объясняется малое распространение метода Метца на практике. Опытами Метца были подтверждены следующие уже ранее известные явления уширения:

- 1) уширение не зависит от первоначальной ширины полосы, когда последняя больше начальной толщины;
- 2) уширение возрастает с увеличением диаметра валков;
- 3) боковые стороны полосы при небольшом давлении несколько выпучиваются, при большем давлении это выпучивание увеличивается;

- 4) уширение уменьшается с увеличением скорости прокатки.

К. Гопфером в последнее время были проведены специальные опыты, с одной стороны, для проверки различных формул по уширению и, с другой стороны, для установления влияния температуры и качества металла на уширение ²⁷. Из этих опытов следует, что

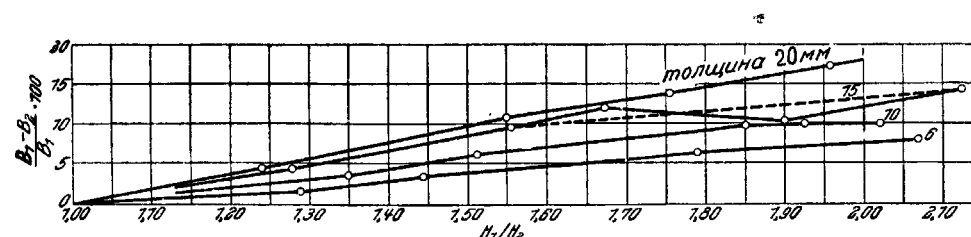
²⁴ W. Tafel u. F. Anke, „Zeitschr. f. Metallkunde“, 1925, 225.

²⁵ W. Tafel u. H. Sedlaczek, Das Breiten beim Walzen, „St. u. E.“, 1925 190.

²⁶ Norb. Metz, Experimentelle Untersuchungen über den Walzvorgang, „St. u. E.“ 1926, 476—478, bzw. die Originalarbeit in der „Revue de Métallurgie“, 1925, 66.

²⁷ Kurt Hopfer, Der Einfluss der Walztemperatur auf die Streckung, Breitung usw., „Mitt a d. K.-W.-Inst f. Eisenf.“, 1928, 283—299.

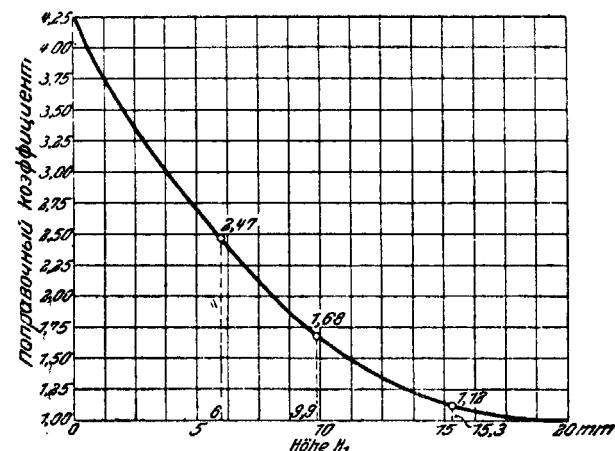
«... при прокатке с промежуточным нагревом можно получить значительно лучшую вытяжку и меньшее уширение, чем при про-



Фиг. 31. Уширение узких полос („Stahl und Eisen“ 1926 г., № 14).

катке того же металла без подогрева. Мартеновская сталь с 0,45% С давала в конечных сечениях меньшую вытяжку и большее уширение».

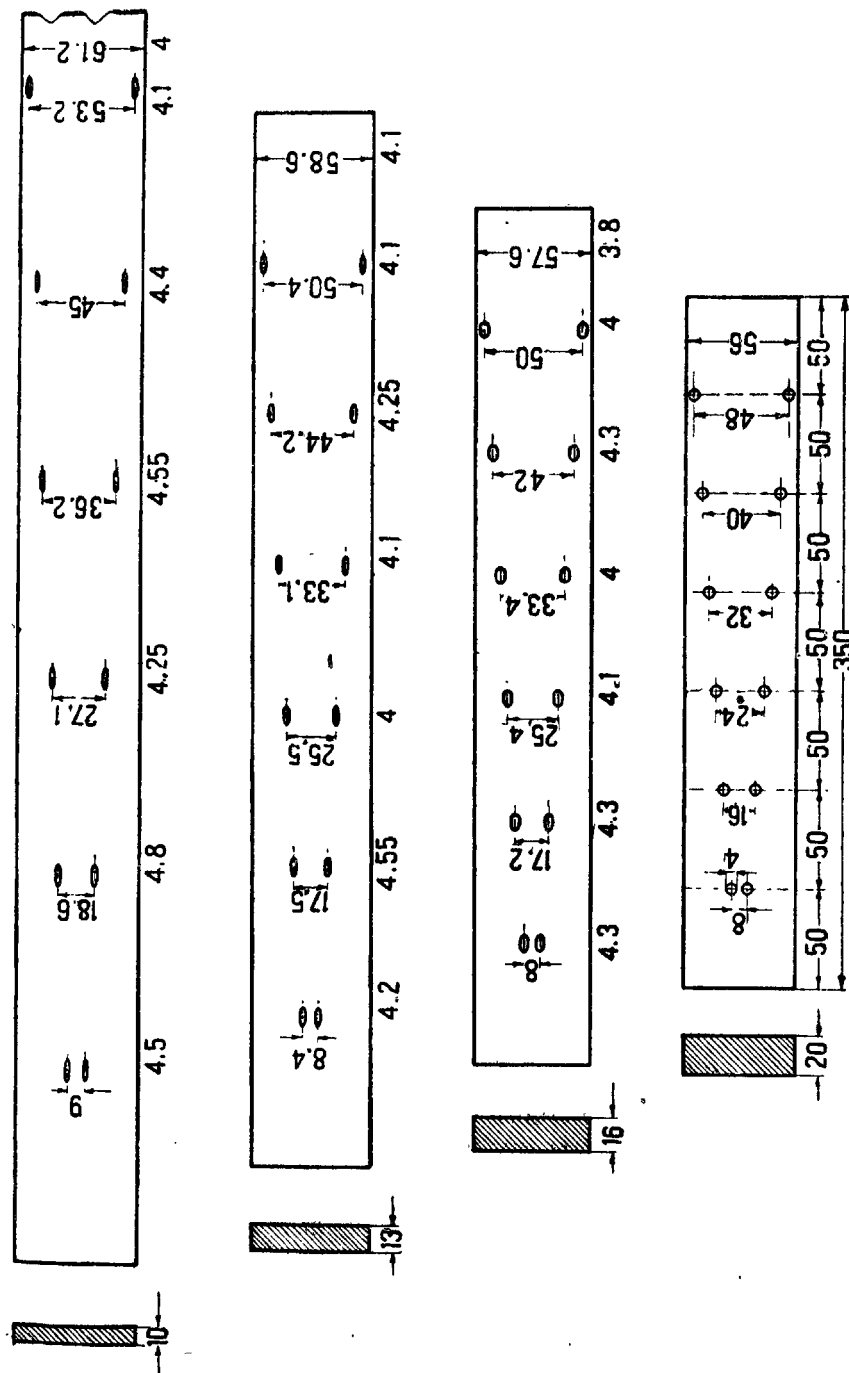
Необходимо еще указать на вид и форму уширения по ширине по-



Фиг. 32. Поправочный коэффициент к значению уширения узких полос („Stahl und Eisen“, № 14, 1926 г.).

лосы. Еще недавно очень многие были того мнения, что крайние слои металла по ширине полосы уширяются больше, чем срединные части. Автором было установлено, что при прокатке имеется очень много случаев, при которых уширяются исключительно только средние части полосы. Это имеет место при прокатке фасонных профилей в виде корытного железа, двутавровых балок, трамвайных и ж.-д. рельс и ряда подобных сечений.

Данное обстоятельство не подлежит сомнению, так как наибольшее уширение при прокатке фасонных профилей имеет место там, где находится горизонтально лежащая наиболее сильно обжимаемая полосовидной формы часть сечения. Оно ясно и из того, что части, подвергающиеся боковому давлению, не могут уширяться, в то время как полосовидные горизонтально лежащие части сечения, наоборот, должны уширяться совершенно незави-



симо от того, находятся ли они на боковых кромках или посередине прокатываемого сечения.

Распределение уширения по ширине полосы при практике чисто полосовых сечений (квадратное и полосовое железо) интересно само по себе. Уширение узких полос, выраженное в процентах прокатываемого сечения всегда больше чем в широких полосах.

Автором было проведено девять одинаковых опытов на уширение с тремя полосами в трех различных прокатных цехах. Расположение просверленных отверстий и полученные уширения представлены на фиг. 33. Эти три полосы были прокатаны в каждом цехе при одной и той же температуре в 1100°, причем обжатие для одной полосы равнялось 20, для другой 35 и для третьей 50%. Результаты этих девяти опытов показывают, что расстояние между 4-мм отверстиями становятся тем больше, чем ближе эти отверстия расположены к середине ширины полосы. Этот вывод подтверждается всеми девятью опытами. Таким образом и при прокатке полосовых сечений уширение больше посредине ширины полосы, чем на краях.

VII. ОПЕРЕЖЕНИЕ

Опережение — своеобразное явление процесса прокатки. Опережение выражается в том, что выходящая часть прокатываемой полосы во многих случаях имеет немного большую скорость, чем окружающая скорость валков. Явление опережения впервые было обнаружено Блассом и объяснено следующим образом: если какое-либо твердое тело подвергнуть давлению, то в нем под давящей поверхностью образуется конусообразная часть, имеющая своим основанием давящую поверхность и не участвующая в деформации (фиг. 34). Если испытываемое тело вязко, то под влиянием давления частицы, расположенные вне конусообразного тела, начинают двигаться по клину вверх (линии скольжения, слои скольжения, ср. гл. V). Если материал раздавливаемого тела более твердый, менее вязкий, то поверхность клиновидного тела образует собой поверхность разрушения. Это видно по ударной пробе тигельной стали; испытываемый брусок ломается не под прямым углом к изгибающей силе, а образуя при этом как сверху, так и снизу клиновидные тела.

На фиг. 35 показана фотография такого двухстороннего клинообразного тела.

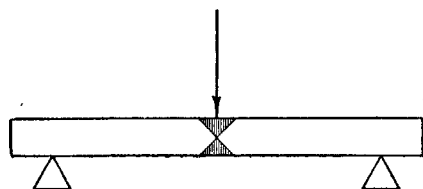
Если принять, что при прокатке конуса скольжения находятся в таком положении, что их вершины сходятся в точке E (фиг. 36), края представляют собой точку пересечения радиусов, проведенных под углами $\frac{\alpha}{2}$, а площади их основания есть поверхности сопри-

косновения валков с полосой, то, очевидно, что, когда точка M придет в B , через щель между валками должно пройти количество металла, соответствующее площади $MECD$.

Так как эта площадь больше, чем прямоугольник с высотой h и шириной $BM = \frac{BK}{2}$, следовательно, полоса должна выходить из

валков со скоростью большей, чем окружная скорость самих валков в рассматриваемом калибре.

В этом случае мы имеем налицо опережение. Явление опережения можно также установить при помощи насечки валков. Расстояния между отпечатками на прокатанной полосе, полученными от насечек, оказываются несколько большими, чем окружность валков в рассматриваемом калибре. В последнее время подробным исследованием этого вопроса занимался Пуппе, произведший целый ряд точных исследований, опубликованных в журнале „Stahl und Eisen“, 1909, № 5. По вопросу об опережении Пуппе сделаны следующие заключения: при 1160—1180° опережение не имеет места, вне зависимости от того, как велико давление; при повышении температуры выше 1160—1180° скорость выходящей части полосы



Фиг. 34. Образование конусов в надавленном твердом теле.



Фиг. 35. Двусторонние конуса из раздавленного твердого тела.

становится меньшей, чем окружная скорость валков, т. е. наблюдается уже так называемое отставание (скольжение). Помимо этого Пуппе установлено, что при уменьшении высоты сечения меньше, чем на 16%, опережения не наблюдается. Отсутствие опережения и скольжения при этом объясняется Пуппе тем, что при более высоких температурах сталь теряет свою твердость, в результате чего конуса скольжения получают не такими, как показано на фиг. 36 (см. фиг. 37); при температурах выше 1160—1180°, отрезки ME или CE_1 делаются настолько малыми, что площадь $MEGB + CE_1ID$ становится равной или меньшей, чем прямоугольник с высотой h и длиной $BM = \frac{BK}{2}$. В результате этого обстоятельства

скорость полосы, выходящей из валков, в первом случае равна, а во втором — меньше окружной скорости соответствующей части валков. Почему при обжатии меньшем 16% не наблюдается опережения, — Пуппе ответа не дает.

В заключение Пуппе делает из своих опытов следующие выводы:

1) начиная от определенной величины обжатия и температуры ниже определенной наивысшей, скорость выхода прокатываемой полосы из валков становится большей, чем окружная скорость валков в рассматриваемом калибре; это явление называется опережением;

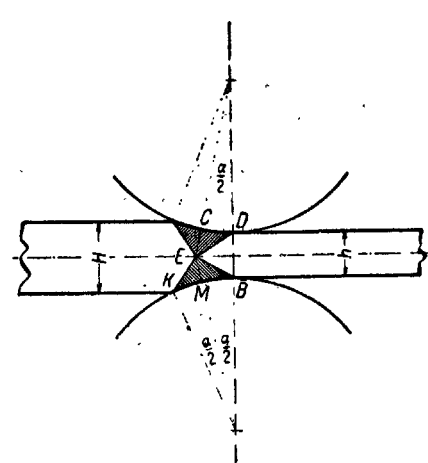
2) отношение между скоростью выхода полосы из валков и ок-

ружной скоростью валков тем больше, чем ниже температура полосы, чем больше ее высота после прохода, чем больше уменьшение высоты (обжатие) и чем меньше диаметр валков;

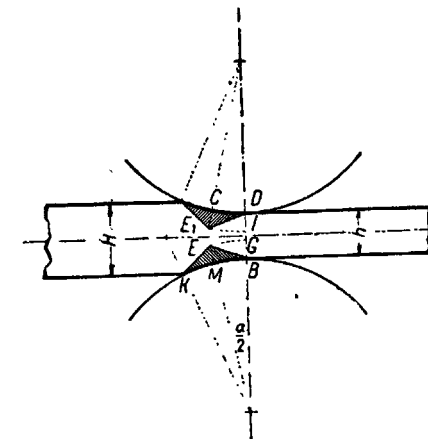
3) опережение наступает при обжатиях около 15% и быстро приближается к максимальному значению;

4) это максимальное значение равняется при 1150° примерно 0,7%, а при 950° приблизительно 10%;

5) каждой температуре полосы соответствует определенная мак-



Фиг. 36. Образование конусов в прокатываемой полосе по Бласу.



Фиг. 37. Образование конусов по Пуппе.

симальная величина опережения, на которую обжатие не оказывает существенного влияния;

6) качество материала, вероятно, не имеет никакого влияния на величину опережения;

7) величина опережения зависит также от состояния поверхности валков (шероховатая или гладкая).

Рассматривая эти выводы из опытов Пуппе, можно заключить, что опережение при прокатке не всегда имеет место, зависит от очень многих причин и при этом сильно изменчиво.

Различные исследования, проведенные при одинаковых температурах и прочих одинаковых условиях, как выше уже было сказано, дают сильно противоречивые результаты. Из этого ясно следует, что опережение, особенно в смысле его размеров, есть явление, чрезвычайно трудно поддающееся определению.

Для определения влияния ряда других факторов на опережение, автором был произведен ряд опытов по определению величины опережения при различных скоростях прокатки и различном боковом давлении. С этой целью производилась прокатка полос одного и того же сечения при одинаковой температуре, в одном случае в закрытом калибре, в другом случае на гладких валках.

Уменьшение высоты обжатия в обоих случаях было одинаковым. Опыты производились трижды попарно, при этом в первом

опыте стан работал с нормальной скоростью, во втором — с уменьшенной, и в третьем — на очень тихом ходу. Само собой разумеется, что как закрытый калибр, так и гладкие валки относились к одному и тому же стану.

Результаты этих опытов сведены в табл. 5.

Они показывают, что на величину опережения оказывает большое влияние боковое давление в калибре. Отмечаем любопытное явление, что, в то время как величины опережения при первых двух скоростях едва отличаются друг от друга (это видно из того, что все четыре величины составляют приблизительно 2% от соответствующего диаметра валков), при третьей скорости эта разница становится довольно значительной. При этом калиброванные валки дали в два раза большее опережение, чем в первых двух случаях, а на гладких валках опережение получилось вдвое меньше, чем при первых двух скоростях.

Влияние бокового давления выражается, таким образом, в том, что при прокатке на очень тихом ходу (третий случай), калиброванные валки вызывают опережение в три раза большее, чем при этих же условиях гладкие валки.

Из всего этого следует, что опережение является величиной во всех отношениях непостоянной и трудно поддающейся определению. Эти опыты, повторенные автором с более толстыми валками, еще раз подтвердили исключительную неопределенность явления опережения.

По последним опытам было установлено, что расстояния между отпечатками от насечек на одной и той же прокатанной полосе получились все различными. Например, на двух полосах были получены следующие расстояния между отпечатками:

первая полоса 1618, 1616, 1601, 1603, 1597 мм
 вторая полоса 1653, 1645, 1630, 1618, 1608 мм.

При длине рабочей окружности валков в 1570 мм опережение для первой полосы при каждом обороте принимало значения, соответствующие 48, 46, 31, 33 и 27 мм, для второй 83, 75, 60, 48 и 38 мм. Отсюда следует, что величины опережения даже для одной и той же прокатанной полосы могут отличаться друг от друга больше чем на 100%.

В заключение должно быть отмечено, что опережение является частым спутником прокатки, хотя, как выше уже было сказано, наблюдается не при всех условиях и не в вполне закономерной форме.

Явление опережения особой роли в производстве не играет, так что при проектировании калибровок, за исключением калибровок периодических профилей, может не приниматься во внимание.

Формулы для вычисления опережения, основанные исключительно только на влиянии диаметра валков и высоты полосы, совершенно неприменимы.

Многочисленные опытные данные полностью подтверждают, что явление опережения не всегда имеет место и что его величина безусловно непостоянна.

Эти факты совершенно исключают возможность применения формулы вышеуказанного типа,

таблица 5

Опыты по определению опережения при различных скоростях прокатки и различном боковом давлении

№ по порядку	Сечение полосы до прохода в мм	Калиброванные валки				Гладкие валки				Число оборотов валков в минуту в мм
		Сечение полосы после прохода в мм	Длина окружности валка в калибре в мм	Расстояние между отпечатками в мм	Опережение в мм	Сечение полосы после прохода в мм	Длина окружности валка в мм	Расстояние между отпечатками в мм	Опережение в мм	
1	13,8 × 23,4	9 × 24	верхн. в 651 нижн. н. 651	665,4	14,4	8,6 × 27,2	в. 745,7 н. 745,7	762,7	17,0	250
2	13,8 × 23,4	9 × 24	в. 651 н. 651	662,0	11,0	8,6 × 26,5	в. 745,5 н. 745,7	763,1	17,4	190
3	13,8 × 23,4	9 × 24	в. 651 н. 651	678,8	27,7	8,7 × 26,8	в. 745,7 н. 745,7	754,4	8,7	70

VIII. ОСНОВЫ КАЛИБРОВКИ ВАЛКОВ

A. ИСТЕЧЕНИЕ МЕТАЛЛА. ОБЩИЕ ЗАКОНЫ КАЛИБРОВКИ

«Калибровка» валков является работой конструктора. Цель ее — определить размеры и форму калибров, расположенных между конечным и исходным, обычно прямоугольной формы, сечением (слиток или заготовка). Тот факт, что экономические результаты прокатки, большая или меньшая правильность готового профиля, чистота поверхности прокатанного металла, суточная производительность, а также и износ самых валков находятся в тесной связи с применяемой калибровкой, в достаточной степени указывает на большую важность правильной калибровки. Условием правильной калибровки является основательное знакомство с движением металла в плоскости прокатываемого сечения. К сожалению, это движение металла в плоскости сечения до настоящего времени еще недостаточно изучено.

В гл. V—VII описываются отдельные виды истечения металла; это истечение металла происходит исключительно в направлении прокатки и зависит от вытяжки полосы.

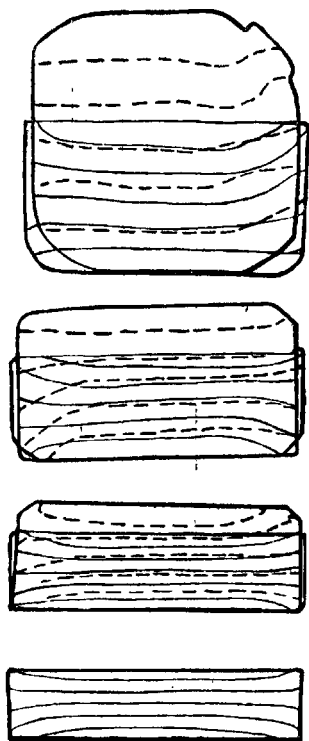
Знакомство с описанным в гл. V—VII движением частиц металла вполне достаточно для возможности калибровки сечений простей-

ших форм (квадратное, полосовое железо и др.), у которых уменьшение высоты по всему сечению равномерно. Это знакомство, однако, недостаточно для возможности правильной калибровки сложных профилей. Вследствие этого и в настоящее время для фасонных профилей приспособляются существующие и, что еще хуже, применяются целиком без изменения старые калибровки.

Вот почему исследователи явления истечения металла в сечении прокатываемых полос заслуживают большой благодарности.

Первым, проводившим многочисленные и планомерные опыты, по этому вопросу, был Метц²⁸. Результаты опытов Метца являются исключительно ценными и оригинальными (ср. гл. IX, раздел D, I), но, к сожалению, ограничиваются только одной группой фасонных профилей. В последнее время А. Галокси были опубликованы подобные результаты исследования истечения металла²⁹. Вышеназванный специалист проводил свои опыты с разнообразными профилями и любезно предоставил автору оригиналы снимков.

Фиг. 38—45 заимствованы из труда Галокси. Последний проводил свои опыты следующим образом: пробные куски для прокатки изготовлялись путем сварки отдельных пластин из мягкого хорошо поддающегося сварке железа. Прокатка этих кусков производилась таким образом, что одни полосы пропускались через калибр с вертикально расположенными линиями сварки, а другие через тот же калибр с горизонтально расположенными линиями сварки. После каждого пропуска от полосы брался образец, полировался и подвергался травлению. Эти образцы затем или фотографировались, или по ним изготовлялись точные чертежи. Все сечения представлены на фиг. 38—45 дважды: по



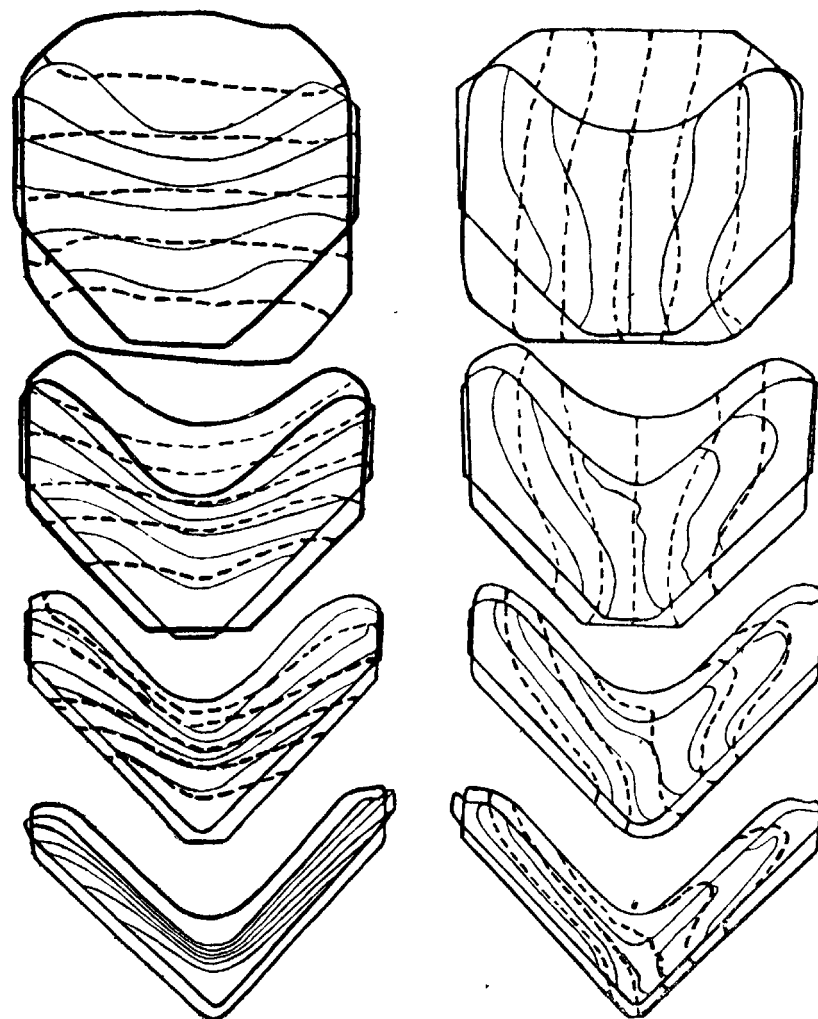
Фиг. 38. Линии сварки в прокатанной полосе (опыт Галокси).

одному от предыдущего и последующего калибров.

Фиг. 38 показывает деформацию горизонтальных линий сварки при прокатке полосового железа. Эти линии не показывают, как и надо было ожидать, ничего необычного, а подтверждают только сказанное в гл. V и VI относительно более сильной вытяжки верхних и нижних слоев и сильного уширения средних горизонтальных слоев в прокатываемой полосе (ср. фиг. 19, 20 и 28). Из фиг. 38 становится понятным, почему середины боков полосового железа при прокатке с большими обжатиями принимают выпуклую форму. Кроме того

равномерное распределение линий сварки показывает пример правильного и лишенного недостатков процесса прокатки.

На фиг. 39 показаны деформированные линии сварки при прокатке углового железа из пробы, состоящей из шести слоев, гори-



Фиг. 39. Угловое железо, прокатанное из полос с горизонтальными линиями сварки (опыт Галокси).

Фиг. 40. Угловое железо, прокатанное из полос с вертикальными линиями сварки (опыт Галокси).

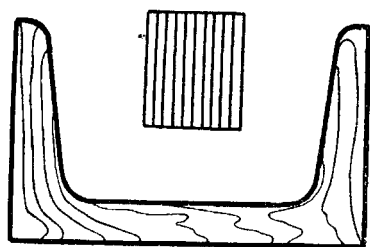
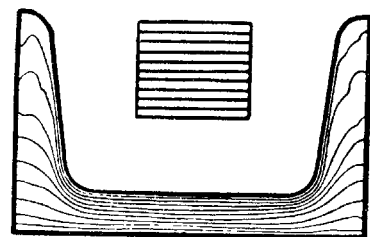
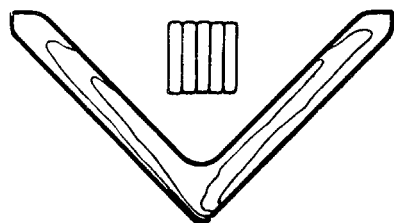
зонтально сваренных, а фиг. 40 — те же линии при их вертикальном расположении. Форма, положение и размеры деформированных слоев металла на фиг. 39 указывают на то знаменательное явление, что верхние слои большей частью переходят в фланцы, в то время как нижние слои почти целиком остаются в вершине угла. Остальные слои представляют собой переходы. Легко понять, что клино-

²⁸ N. Metz, Experimentelle Untersuchungen des Materialflusses beim Walzen von Grägern, „St. u. E.“, 1929, 1577—1582

²⁹ Argad Galocsy, Walzenkalibrierung, „Ung. Zeitschr. f. Berg u. Hüttenwesen“, 1929, № 17—19.

видная часть валка вызывает в слоях металла, непосредственно расположенных под вершиной клина, сильную вытяжку, а в правой и левой полках сильное боковое выдавливающее действие.

Рассматривая фиг. 40, в которой показаны деформированные вертикальные слои, можно ясно заметить боковое выдавливание как влево, так и вправо.



Фиг. 41. Деформация линий сварки в угловом сечении, прокатанном из полосы с вертикальными линиями сварки (опыт Галокси).

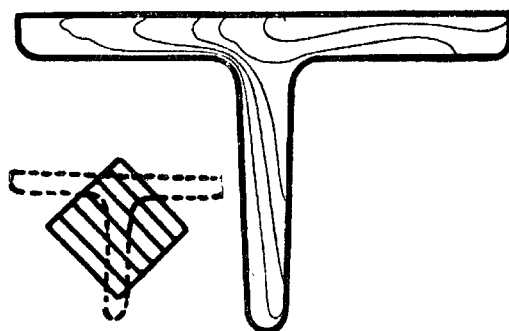
Фиг. 42. Распределение металла в швеллере при горизонтальных линиях сварки (опыт Галокси).

Фиг. 43. Распределение металла в швеллере, при вертикальных линиях сварки (опыт Галокси).

ностью соответствует полосовому профилю (фиг. 38). Фиг. 43. снова показывает случай одностороннего распределения вертикальных слоев, являющегося результатом одновременного захвата полосы валками: в левом фланце мы видим четыре слоя, в правом только три.

Достойным внимания является распределение металла в тавровых сечениях. Фиг. 44 показывает распределение металла в чисто-

На фиг 41 показано расположение пяти деформированных вертикальных слоев при раскатке на готовый угловой профиль. Само собой разумеется, что при прокатке пробных кусков, состоящих из вертикальных слоев, очень редко можно получить правильное распределение этих слоев по калибру, так как малейшее отклонение их от вертикали (это легко происходит, если заготовка при поступлении в валки недостаточно крепко удерживается пропусками) ведет к тому, что они деформируются неравномерно. Распределение металла при прокатке корытного железа показано на фиг. 42 и 43.



Фиг. 44. Распределение металла в тавровом сечении (опыт Галокси).

На фиг. 42 представлен корытный профиль, прокатанный из вертикально сваренных слоев и на фиг. 43 — из горизонтально сваренных слоев.

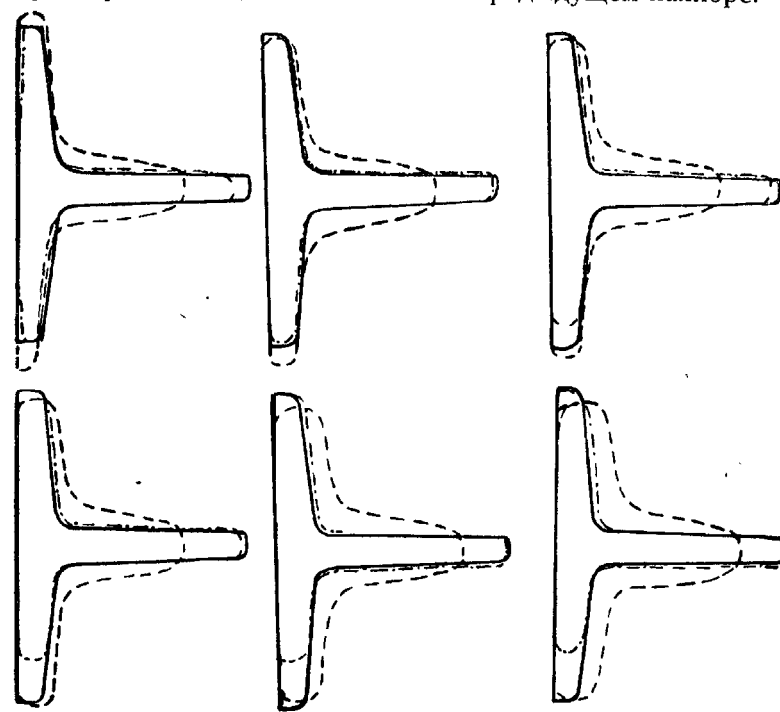
На фиг. 42 ясно видно, что шейка — часть сечения между фланцами — по форме и расположению слоев пол-

ном тавровом профиле и расположение слоев в исходном сечении.

Правый фланец образован, как видно, из двух верхних слоев, левый фланец и ножка из остальных.

В связи с тем, что тавровый профиль представляет собой интерес и с точки зрения прокатки, на фиг. 45 будут показаны шесть прокатанных при различных условиях полос, которые задавались в один и тот же чистовой калибр.

Предотделочный калибр в каждом последующем опыте настраивался путем раздвижения валков с таким расчетом, что фланцы от опыта к опыту делались толще на 1 мм (см. линии черного калибра). Остальные калибры оставались неизменными в своих размерах при всех опытах. Результаты этих опытов следующие: верхний фланец оказался невыполненным, только в 6-ой пробе, благодаря чрезмерной толщине этой части в предыдущем калибре.



Фиг. 45. Образование частей сечения в тавровом железе при различных условиях (опыт Галокси).

Совершенно по-иному это происходит в нижнем фланце таврового профиля, так как здесь мы имеем закрытую часть калибра, в котором невозможна нормальная обработка. Придание формы в таких частях калибра сильно затруднено. Фиг. 45 ясно показывает, как нижние фланцы быстро и значительно укорачиваются. Ножка оказалась невыполненной только при первом опыте. При всех этих опытах обнаруживается еще одно довольно интересное явление, заключающееся в постепенном утолщении верхнего фланца готового профиля. Очертания готового профиля, нанесенные — . — . — ли-

ниями, ясно показывают, что верхний фланец в готовом профиле тем толще, чем толще этот фланец был в предыдущем проходе. Верхний фланец уже при третьем опыте был толще этого же фланца в готовом профиле согласно шаблону, показанному на фигуре сплошными линиями. Это обстоятельство указывает на исключительно большее влияние избытка или недостатка металла в предыдущем калибре, и вместе с этим на тот факт, что при неправильной настройке даже на лучшей калибровке нельзя получить безупречного профиля.

В дальнейшем будут по возможности яснее разобраны все основные правила калибровки. Приступать к калибровке какого-либо нового профиля можно тогда, когда установлено, что этот профиль может быть как технически, так и экономически выгодно получен прокаткой. В первую очередь должно быть установлено, можно ли данный профиль катать на том или ином существующем стане или для этого требуется какой-либо другой. При помощи справочника «Hütte для металлургов» любой молодой специалист, учитывая местные производственные условия, сумеет ответить на поставленный вопрос.

Собственно, калибровка начинается с вычерчивания так называемого горячего профиля, соответствующего профилю полосы, выходящей из последнего калибра в горячем состоянии. Размеры горячего профиля определяются путем увеличения размеров холодного профиля на некоторый процент, связанный с расширением сечения при нагревании. Это колебание происходит в пределах 1,2—1,4%. Для простых сечений, быстро прокатываемых, берется большее значение, для сложных профилей — меньшее значение. Затем на основе сечения исходной заготовки и сечения горячего профиля составляется предварительный план обжатий, и этим самым определяется примерное число проходов. Исходным пунктом при калибровке обычно является горячий профиль, по которому уже определяются все предыдущие калибры.

В первую очередь, следовательно, должен быть определен предчистовой калибр, из которого железо должно заполнить чистовой калибр без заусенца или недовыполнения. Учитывая быстрое падение температуры полосы во время прокатки, площадь предчистового калибра берется такой, чтобы обжатие в чистовом калибре было небольшим. В чистовом и предчистовом калибрах температура металла относительно невысокая. В остальных калибрах процентное увеличение площади их сечения постепенно возрастает в сторону исходной заготовки или, что то же, постепенно уменьшается в сторону конечного продукта. В отделочных ручьях фасонных профилей обжатие, как правило, не превышает 10—15%; в первых черновых ручьях оно доходит до 30—35%. Это, однако, не является законом. Опытные калибровщики устанавливают обжатия целиком по своему усмотрению, учитывая, конечно, при этом мощность двигателя стана, диаметр валков, взаимное влияние частей сложного профиля и т. д. Последующий черновой калибр определяется на основе тех же положений, только здесь обжатие, выраженное в процентах, берется соответственно большим, чем в отделочном ручье. Правильное выполнение калибра и в этом случае имеет большое значение; нужно иметь в виду, что небольшое невыполнение свя-

зано с меньшими неудобствами, чем образование заусенцев. Невыполнение калибра является меньшим неудобством, так как простой обточкой предыдущего калибра или части его этот недостаток можно легко устранить. При образовании же заусенцев необходимо уменьшить размеры той или иной части калибра, для чего нужно перетачивать валок по всей бочке. Это связано с излишними расходами и тратой времени, а также идет за счет прочности валка в целом.

Итак, проектирование калибровки ведется от калибра к калибру, считая от чистового, до тех пор пока не будет определено необходимое сечение — обычно квадратное — заготовки или слитка.

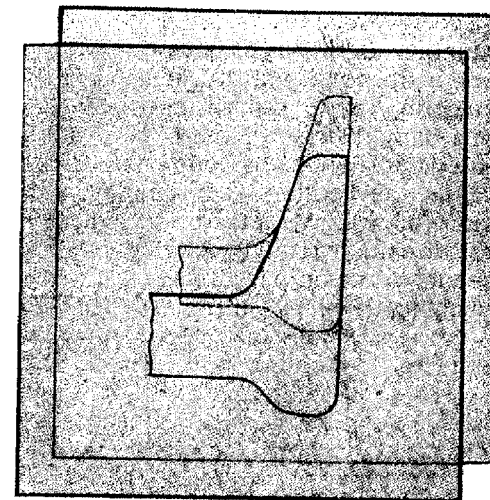
По изготовлении предварительной калибровки последнюю необходимо проверить. Для этой цели очертания вычисленных калибров наносятся на прозрачную бумагу; отдельные калибры накладываются друг на друга и при этом устанавливается возможность правильного выполнения и предполагаемого формоизменения. На фиг. 46 это показано наглядно.

Только после такого рассмотрения этих предварительных калибров можно годные калибры вычертить на плотной чертежной бумаге. Калибровка не имеет никаких общих твердо установленных правил. Это, однако, не значит, что инженер-прокатчик при проектировании калибровки ничем не связан, так как процесс прокатки, несомненно, имеет свои совершенно строгие законы, которые нам еще не все известны. Многие прокатчики открывали отдельные законы прокатки тем, что по незнанию нарушали их. Хотя калибровка не имеет общепринятых законов, но на основе сказанного в предыдущих главах следует, что процесс прокатки связан с целым рядом закономерных явлений. Знание этих явлений необходимо для того, чтобы иметь возможность успешно переделать ту или иную калибровку.

Что большинство задач по калибровке может быть решено различными методами указывают слова автора в одном из его трудов³⁰: «Творческие способности инженера-прокатчика играют большую роль при калибровке даже и тогда, когда расчетные данные по калибровке окончательно приняты на практике». Тафель³¹ высказы-

³⁰ E. Cotel, Über die Grundsätze der neuzeitlichen Walztechnik, „Montan. Rundschau“, Wien—Berlin, 1920, 427.

³¹ W. Tafel, Walzen u. Walzenkalibrieren, Dortmund 1921, S. 227.



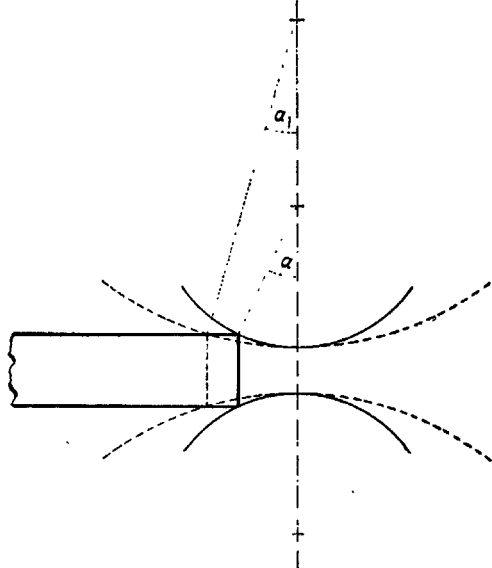
Фиг. 46. Проверка очертания предыдущего калибра.

ваает ту же мысль следующими словами: «При всем развитии абстрактных математических методов калибровка является работой, в определенном смысле зависящей от индивидуальных способностей инженера». Важнейшим правилом калибровки является необходимость, чтобы деформация сечения была по возможности менее насильственной, а более простой и несложной. Чем сложнее деформация сечения в одном ручье, тем больше расходуется энергии, тем скорее срабатывается калибр и тем меньше возможностей правильного выполнения его. Что касается остальных общих правил, то они приблизительно могут быть сведены к нижеследующему.

1. В случае если какая-либо часть сечения поступает в часть калибра, образованного обоими валками в виде острого угла, необходимо, эту часть калибра закруглить (фиг. 47) с тем, чтобы избежать образования заусенца. Острые углы поступают, как правило, в закругленную часть соседнего калибра, а закругленная часть в ост-



Фиг. 47. Закругление и затупление углов калибров.



Фиг. 48. Зависимость между толщиной полосы и центральным углом

рый угол, и так попеременно дальше. Закругление необходимо всегда делать большим, чем это нужно, так как небольшой недостаток металла легко устраним путем обточки самого закругления, в то время как для устранения избытка металла необходимо перетачивать валки по всей бочке. Величина закругления находится в зависимости от площади сечения и увеличивается или уменьшается вместе с ней.

2. При определении высоты калибра должна быть учтена возможность захвата заготовки валками и проверена возможность «задачи» заготовки с определенной высотой в соседний ручей. Валки могут захватить (втянуть) заготовку лишь тогда, когда отношение толщины (высоты) полосы к диаметру валков не превышает определенных пределов. Хирстом установлено, что захват еще возможен, когда центральный угол, обозначенный через α на фиг. 48, не превышает 30° , в то же время Жезом установлено, что о без условном захвате может быть речь только тогда, когда центральный угол не превышает 22° . Практика показывает, что Хирст прав в тех случаях, когда заготовка катается совершенно свободной от ока-

лины или когда валки сильно шероховаты. Вообще же рекомендуется работать с углом захвата, не превышающим 22° . Правда, часто валки захватывают и при больших углах захвата, только с большим трудом, после долгих попыток, при сильных ударах в стане, иногда при этом заготовка проскальзывает по несколько раз в калибре. Результатом всего этого является потеря во времени, падение производительности, охлаждение заготовки, неправильные размеры профиля, и, наконец, возможны и поломки. Из фиг. 48 видно, что при одной и той же толщине заготовки более толстые валки захватывают легче, так как угол захвата у них меньше. Насечку валков необходимо по возможности избегать³², так как следы от насечек обнаруживаются и в готовом прокате. Насечка может быть применена только при прокатке очень крупных сечений, для обжимных валков или в тяжелых черновых станах, т. е. во всех тех случаях, когда требуется надежный и быстрый захват.

3. При калибровке должна быть предусмотрена возможность уширения заготовки в калибрах на основе тех правил, которые были выведены при рассмотрении явлений уширения. Если в каком-либо калибре уширение очень мало, то необходимо по меньшей мере предусмотреть достаточный выпуск, так как в противном случае трудно задать полосу в калибр. Кроме того такой выпуск сильно облегчает выход из калибра, так как при недостаточной возможности уширения полоса защемляется в нем. Если же дать калибру припуск на уширение значительно больший, чем это требуется, то полоса проходит через калибр, не выполняя его, и с тупыми кромками.

4. Должно быть установлено расположение калибров в валках: или так, чтобы штука после или до каждого пропуска кантовалась на 180° , или чтобы калибры были расположены с поворотом на 180° по отношению друг к другу. Первый способ дает преимущество тогда, когда имеется автоматический хорошо работающий кантовальный прибор или когда прокатываемые полосы достаточно легки. При этом способе могут быть лучше использованы бочки валков, кроме того, готовая продукция имеет более чистую поверхность, в связи с тем, что образующаяся, быстро затвердевающая окалина во время кантовки легко выпадает из глубоких частей профиля. При прокатке без кантовки, образовавшаяся окалина закатывается так, что даже при сильной продувке паром или водой на готовой продукции от нее остаются отпечатки. Без кантовки, само собой разумеется, прокатка идет значительно быстрее, и при этом, при работе вручную, сильно облегчается работа вальцовщика и повышается производительность.

5. Еще раз здесь подчеркивается важнейшее правило калибровки, по которому обжатия отдельных частей калибра, выраженные в процентах, должны быть все одинаковыми или почти одинаковыми.

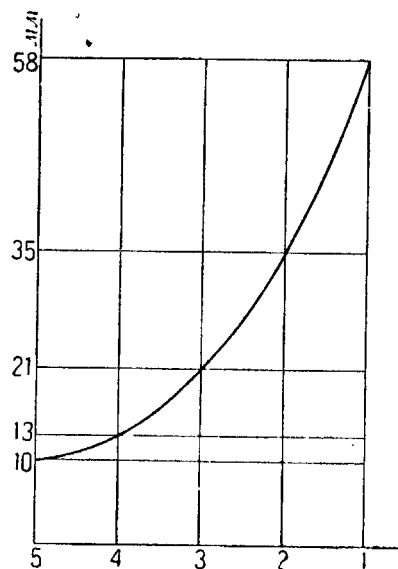
От этого правила можно отступать только в первых проходах, где температура и вязкость прокатываемой штуки еще достаточно высоки. После того как на основе вышесказанного, а также на основе сказанного в следующих главах, получены окончательные форма и

³² Dr. U. Sedláček, Vorschläge zur Vermeidung des Rauhens der Walzen „St. u. E.“ 1927, 26.

размеры отдельных калибров, желателно эти калибры вычертить в туши. По полученным чертежам в механической мастерской изготовляются точные шаблоны из 0,5-мм оцинкованного железа для проверки валков при обточке. По ним составляется чертеж валков, как это указано в гл. IV.

В. ОСНОВЫ АНАЛИТИЧЕСКОГО И ГРАФИЧЕСКОГО МЕТОДОВ КАЛИБРОВКИ

В разделе А данной главы указывалось, что по настоящее время не имеется вполне надежных численно выраженных данных относительно истечения металла в плоскости сечения сложных профилей. Вместе с этим, естественно, отпадает возможность существования вполне обоснованных правил аналитического и графического методов калибровки фасонных профилей.



Фиг. 49 Парабола по размерам высот для калибровки полосового железа.

На основании исследований Кирхберга следует, что парабола может найти себе применение не только в этих отдельных случаях, но также может служить основой для калибровки в целом. Уже было установлено, что высоты следующих друг за другом калибров простого прямоугольного профиля представляют собой ординаты параболы, абсциссами которой служит число проходов, нанесенных в соответствующей очередности. Ордината вершины в этом случае представляет собой высоту готового профиля, а последняя ордината — высоту первого калибра рассматриваемой калибровки. Так как при проектировании калибровки обычно известны высоты как конечного сечения, так и исходной заготовки и, кроме того, известно также примерное число пропусков, то, следовательно, для построения кривой обжатий всегда имеются все необходимые данные. На фиг. 49 для примера изображена парабола высот калибров полосового же-

леза (ср. гл. IX, раздел С). Высота готовой полосы равна, как это показывает ордината вершины, 10 мм, высоты остальных калибров соответственно равны 13, 21, 35 и 58 мм. Если не учитывать уширения, то совершенно ясно, что ординаты параболы, вернее соответствующие ее точки, означают не только высоты, но и площади ряда прямоугольных калибров. При условии, если обжатие равномерно распределено по всему сечению, этот вывод имеет место и для фасонных сечений. Большое преимущество калибровки при помощи параболы очевидно; поэтому понятно, почему Кирхберг имел так много последователей. Так например, проф. Г. Штаубером было предложено проектировать калибровки графическим путем. Вайсенберг говорит о преимуществах графического метода калибровки по Штауберу следующее ³³:

1) всякой калибровке в графическом изображении соответствует совершенно определенного характера непрерывная кривая;

2) на основе этой кривой для определения отдельных калибров достаточно знать число пропусков и отношение исходного сечения к конечному;

3) опыты по определению давления прокатки и расхода энергии могут быть с особой легкостью использованы в качестве средства контроля правильности выбора числа проходов и характера кривой;

4) у руководителей производством имеется при этом простая и наглядная форма изображения всего парка валков и хода работы для каждого профиля, помогающая даже новичку быстро вникнуть в особенности производства.

В последнее время Тафелем предложены аналитические правила ³⁴ для решения задач по калибровке, которые сводятся к следующему ³⁵:

1) сечения до и после пропуска вычерчиваются одно на другом так, чтобы при этом совпадали их средние линии и нижние кромки;

2) выходящее сечение делится на прямоугольники одинаковой площади;

3) определяются «натуральные удлинения» H/h всех прямоугольников и вычисляется их среднее арифметическое L_m ;

4) определяется средняя высота конечного профиля h_m ;

5) проверяются равны ли $H/L_m = h_m$.

Если они равны, то калибр будет выполняться; если $h_m > H/L_m$ то калибр не заполняется; при $h_m < H/L_m$ в калибр будет поступать избыток металла. При этом методе уширение не учтено.

Об этом способе калибровки по Тафелю необходимо заметить, что он на практике вряд ли может иметь применение, во-первых, потому, что он очень сложен и, во-вторых, потому, что основы исследований Тафеля сами по себе сомнительны. Разложение какого-либо нового сложного профиля на равновеликие прямоугольники может быть произведено чисто произвольно, так как по вопросу о виде и размерах движения металла в плоскости сечения очень мало изве-

³³ Weissenberg, Walzbetrieb und Kalibrierung in graphischer Darstellung. St. u. E., 1911, 1653—62.

³⁴ W. Tafel, Walzen und Walzenkalibrierung, Dortmund 1923, II. Auflage, S. 214—216.

³⁵ Hütte, Taschenbuch f. Eisenhüttenleute, IV. Auflage, S. 732

стно. Произвольное разложение сечения может быть поэтому источником многочисленных ошибок.

С. НАИБОЛЕЕ РАСПРОСТРАНЕННЫЙ СПОСОБ КАЛИБРОВКИ

Практические приемы калибровки, выработанные отдельными прокатчиками, передавались преемникам, которые в свою очередь развивали их дальше. Поэтому эти приемы были долгое время секретом отдельных заводов и лиц, и вполне понятно, почему практические приемы калибровки фасонных профилей так разнообразны. Наиболее испытанные методы калибровки в настоящее время достаточно изучены, так что знание этих методов будет весьма полезно для начинающего.

Практический метод калибровки фасонных профилей заключается в следующем.

В готовом горячем профиле (например, в сечении двутавровой балки или рельса) выбирается часть сечения, по своей форме схожая с полосовым железом, которое при прокатке испытывает вертикальное или почти вертикальное давление. Такой частью, например у корытного железа, балок и рельсов является шейка. Для этой части составляется план обжатий и определяются высоты для такого количества калибров, пока не получается необходимое исходное сечение.

Теория парабола Кирхберга при этом является большим подспорьем для начинающего калибровщика; в дальнейшем, когда калибровщик имеет уже достаточный опыт, он может обходиться и без нее.

Проектирование остальных частей профиля (подошва, головка и т. д.) производится в зависимости от того, находятся ли они в вырезанной в одном валке «закрытой» части калибра и при этом катаются совсем без обжатия или в вырезе в обоих валках, где они испытывают только боковое горизонтальное давление. Выбранная за основу плоская часть калибра, как уже было сказано, испытывает только прямое, вертикальное давление и расположена горизонтально, как правило, по нейтральной линии. Подошва и головка ответвляются от этой части под прямым или почти прямым углом вверх или вниз и имеют в обоих направлениях в соответствии с возможностями прокатки сходящиеся стороны. Так как такие части сечения обрабатываются почти исключительно посредством бокового, горизонтального давления, то ясно, что одна половина калибра (нижняя или верхняя) должна всегда находиться в закрытой, другая (верхняя или нижняя) половина одновременно в открытой, образуемой обоими валками, части калибра. Следующие один за другим калибры должны быть так построены, чтобы во время прокатки часть профиля, выходящая из закрытой части калибра, поступала в открытую и наоборот. Необходимо только при этом знать, какой вид бокового давления должен быть в одной части калибра и что одновременно с этим происходит с частью сечения, проходящей через закрытую часть калибра.

Также и здесь может быть применено основное правило о равномерности распределения давления, по которому боковое давление фланцев, выраженное в процентах, должно быть приблизительно

равно давлению в плоской части сечения, т. е. части черного калибра, поступающие в открытую часть отделочного калибра, могут быть на столько процентов толще, на сколько процентов увеличивается высота плоской части калибра. Находящиеся в валках в вертикальном положении части сечения должны быть в предотделочном калибре, примерно, на 1 мм короче, чем соответствующая часть чистового калибра, так как под влиянием вытесняющего действия открытых частей калибра эти вертикальные части несколько увеличиваются. Нужно подчеркнуть, что горизонтальная толщина подошвы из последнего черного калибра может принять требуемые размеры только в том случае, если сечение этой части будет заполнять соответствующую часть чистового калибра от 0,75 его вертикальной высоты. В остальных черновых калибрах при большей толщине и более высокой температуре достаточно 0,66 и меньше. Если не обращать внимания на эту закономерность, то ответвления, как подошва, головка и т. д., могут остаться короткими, невыполненными. В последующих главах будет показано построение этих частей сечения по Кирхбергу.

Подошва, поступающая из предотделочного калибра в закрытую часть отделочного калибра, по своей толщине не испытывает никакого давления; в результате такого удлинения без давления в материале возникают вредные напряжения. Во избежание этого необходимо увеличить в предотделочном калибре размеры высот.

Практика показывает, что это увеличение длины ответвлений (подошвы) в черном калибре может быть сделано независимо от площади и размеров сечения. Установлено, что правильное выполнение калибра без появлений напряжений имеет место тогда, когда высоты ответвлений увеличиваются при переходе из калибра в калибр округленно на 5 мм.

Этим достигается возможность прокатки необходимого профиля из относительно небольшого исходного сечения, что само по себе является важным фактом в смысле производительности и экономичности процесса. Последующие калибры определяются тем же методом при учете всех основных правил. Нужно еще отметить, что радиусы закруглений между отдельными частями черновых калибров должны быть взяты таких размеров, чтобы и переходные поверхности испытывали такое же обжатие и вытяжку, как и остальные части профиля.

Часто бывает, например у рельс, что вертикальные ответвления от плоской части калибра имеют различные высоты. Например, высота подошвы рельс много больше высоты головки. В таких случаях, при условии строгого соблюдения всего сказанного, ответвления будут иметь соответственно различные высоты и в черновых калибрах. Это обстоятельство является значительным препятствием в смысле перехода к исходному прямоугольному сечению и может также послужить причиной неудовлетворительной работы. Поэтому в таких случаях обычно отступают от вышеуказанного правила. И в первых двух фасонных черновых ручьях высота меньшего ответвления увеличивается значительно больше, с тем чтобы перейти к прямоугольному исходному сечению с почти одинаковыми высотами ответвлений. Переходить ли к исходному сечению открытым или закрытым калибром — это вопрос, ответ на который, главным

образом, зависит от высоты самого исходного сечения. В случае если размеры эти достаточно велики, целесообразно первые два калибра делать открытыми.

Такое расположение имеет то преимущество, что при этом вертикальные размеры калибра равны только половине полной высоты сечения, в связи с чем бурты могут быть взяты тоньше, что дает возможность лучше использовать длину бочки валька.

При пробной прокатке, если окончательный профиль получается неудовлетворительным (с усом или незаполненным), необходимо отрезать образцы от прокатываемой полосы каждого калибра и тщательно их обследовать. Согласно этому обследованию в калибровку вносятся необходимые изменения на основе сказанного в гл. V—VIII и IX.

IX. ПОСТРОЕНИЕ НАИБОЛЕЕ ХОДОВЫХ ПРОФИЛЕЙ

А. КАЛИБРОВКА ЧЕРНОВЫХ ВАЛКОВ

На обжимных вальках прокатываются разнообразные полуфабрикаты, идущие в дальнейший передел на отделочные прокатные станы под молота и пресса, в связи с чем обжимные вальки калибруются таким образом, чтобы иметь возможность получать в массовом масштабе квадратные и прямоугольные сечения.

Так как квадратные и прямоугольные калибры не допускают особенно больших обжатий, является необходимость в применении для обжимных вальков и других калибров, допускающих большие обжатия. Иногда имеется необходимость врезывать в обжимные вальки и такие калибры, которые служат подготовительными для дальнейшей прокатки на отделочных станах.

К первой группе вытяжных калибров относятся овалы, ко второй — ромбы и стрелчатые калибры.

Так как основной задачей обжимных вальков является производство большого количества заготовки при значительном уменьшении сечения, то совершенно ясно, что овальные калибры среди черновых играют большую роль, чем ромбические и стрелчатые. Калибровка черновых вальков тем проще и удобнее, чем меньше различных квадратных сечений нужно получить из одних и тех же вальков.

Калибровка черновых вальков должна быть таким образом рассчитана, чтобы производительность черновой линии всегда была несколько больше, чем производительность работающих с ней отделочных станов. Калибровка обжимных и заготовочных вальков состоит из прямоугольных (ящичных) калибров (фиг. 4, стр. 16).

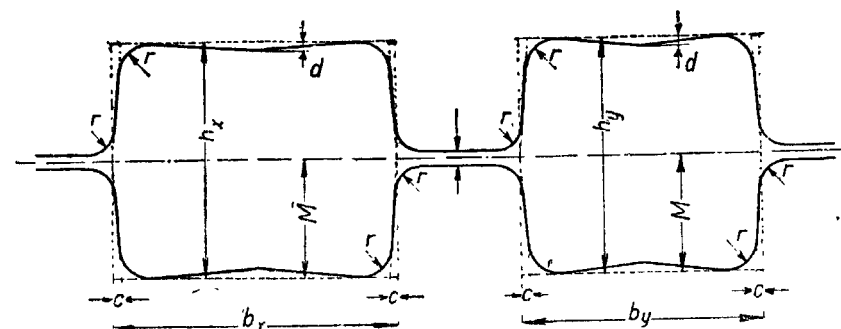
Калибровка среднесортных черновых (подготовительных) вальков состоит из ящичных, квадратных и овальных калибров. Калибровка мелкосортных черновых вальков из ромбических или квадратных и овальных калибров (фиг. 7, стр. 19).

1. Ящичные калибры

Ящичные калибры обычно делаются открытыми (для станов дуо). Расположение их в вальках стана трио должно быть таковым, чтобы меньшие вырезы приходились на средний вал во избежание сильных напряжений в нем.

На фиг. 50 показаны ящичные калибры.

Ящичные калибры обладают рядом больших преимуществ. В связи с тем, что калибры открыты посередине, а не по углам, имеется возможность делать ширину буртов небольшой, а выпуск — довольно большим. Другое преимущество заключается в том, что путем изготовления больших калибров с выпуклыми верхними сторонами уменьшается возможность образования заусенцев в меньших



Фиг. 50. Форма и размеры прямоугольных калибров по Кирхбергу.

калибрах, и, кроме того, облегчается задача полосы в вальки. Простая форма ящичных калибров также дает возможность легко получить из них ряд промежуточных квадратных сечений. Это преимущество является объяснением большой распространенности ящичных калибров, кроме случаев, когда требуется катать очень небольшие сечения.

Максимальное обжатие в ящичных калибрах составляет 35%.

Уширение принимается почти равным (80—85%) свободному уширению, выпуск берется в 6—10%.

2. Стрелчатые калибры

Стрелчатые калибры в данное время имеют малое распространение. Они большей частью служат как черновые калибры при прокатке вручную круглых профилей. Преимущество этих калибров — незначительное уширение в них. Но у них есть и значительные недостатки: обжатия в этих калибрах небольшие, кроме того штука при прокатке в них имеет склонность к опрокидыванию. Приводимое Таффелем преимущество, что благодаря тупым углам полоса не так быстро стынет, не может быть принято во внимание, так как в черновых станах полосы имеют еще настолько высокую температуру, что небольшое охлаждение не имеет никакого значения.

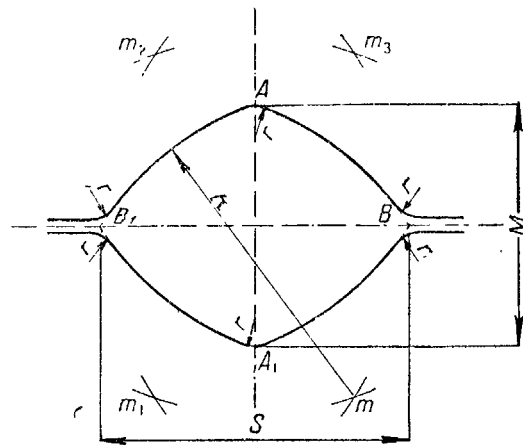
Свернувшаяся полоса является большим злом, чем небольшое охлаждение в черновой клетке.

Допустимое давление обыкновенно равно 10—14% от высоты полосы.

Так же, как и при ящичных калибрах, прокатка ведется с кантовкой на 90° от калибра к калибру.

Ширина бурта очень небольшая: 5—10 мм.

Построение стрельчатых калибров можно вести по фиг. 51 или по Тафелью³⁶ следующим способом: $R=S$; $r=0,1R$ или $0,2R$ (охотнее берут верхнее значение). Радиусами $R=S$ из концов диагоналей проводят четыре дуги; точки их пересечения являются центрами дуг, ограничивающих стрельчатый калибр. Уширение в стрельчатых калибрах принято во внимание постольку, поскольку углы A и A_1 закруглены радиусом r , а углы B и B_1 соответственно расширены (развалены). Как правило, размер S должен быть равен высоте предыдущего калибра, измеряемой при незакругленных углах.



Фиг. 51. Конструкция стрельчатого калибра по Тафелью.

Отношение высоты калибра к ширине обыкновенно берется

$$M : S = 6 : 7 \text{ или } 8 : 9.$$

При стрельчатой калибровке так же, как и при ромбической, возможно получение различных промежуточных сечений, особенно при изменении расстояния между валками. Разумеется, эти сечения получаются не совсем точной квадратной формы. Стрельчатая калибровка применяется, главным образом, там, где возможность получения заготовки разнообразных размеров является главной, ибо, вообще говоря, эта калибровка неэкономична, так как прокатка при ней идет очень медленно.

3. Ромбические калибры

Основы построения и применения стрельчатых калибров в равной степени относятся и к ромбическим калибрам (фиг. 52), так как форма калибров и их расположение на нейтральной линии в обоих случаях одинаковы. В связи с этим ромбические калибры, как черновые, не пользуются большим успехом.

4. Система квадрат — овал (вытяжные калибры)

Эта система, благодаря небольшому уширению и чрезвычайно сильной вытяжке, является одной из наиболее выгодных вытяжных систем. Максимально допустимое обжатие доходит до 60%. Как правило, в овале обжатие в полтора раза больше, чем в квадрате. Для вычисления отношения обжатий площадь овала определяется, как $\frac{2}{3}$ от площади описанного прямоугольника. Е. Меркадер³⁷ определяет наивыгоднейшую ширину овала для данного квадрата, на основе своих опытов и вычислений следующим образом:

$$b = c + \beta(2c - h),$$

где b — искомая ширина овала,

c — размер стороны квадратного калибра,

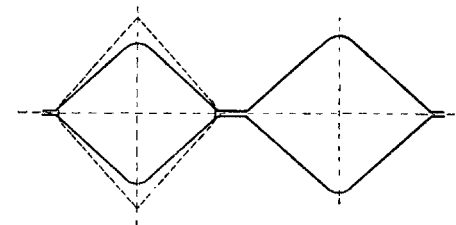
h — высота овала, определенная на основе плана обжатий,

β — константа.

Меркадер установил на основе целого ряда опытов, значение $\beta = 0,465$, поэтому ширину овала по большему квадрату можно определить по формуле:

$$b = 1,93 c - 0,465 h \text{ (см. фиг. 53).}$$

Он также установил, что величина β меняется от 0,43 до 0,5, причем оказалось, что меньшим размерам овала соответствуют максимальные значения β и наоборот.



Фиг. 52. Ромбический черновой калибр.

В. КАЛИБРОВКА КВАДРАТНОГО И КРУГЛОГО ЖЕЛЕЗА

Квадратное и круглое железо может кататься двумя способами: 1) вручную и 2) из проволок.

При прокатке железа вручную, прокатываемая полоса держится рабочими при помощи клещей; при прокатке из проволок, прокатываемая полоса удерживается от опрокидывания специальными пропусками, устанавливаемыми перед соответствующими калибрами. Помощью установленных соответствующих прокатываемым сечениям пропусков (проводок) устраняется возможность свертывания заготовки. В то время как при прокатке вручную каждый чистовой калибр является черновым для последующего меньшего сечения, при прокатке из проволок для каждого чистового калибра необходимо иметь свой отдельный черновой калибр.

Прокатка из проволок имеет большие преимущества; благодаря большим обжатиям и большим скоростям прокатки производитель-

³⁶ „Eisenhütte“ E., Kalibrierung. IV Auflage, S. 727.

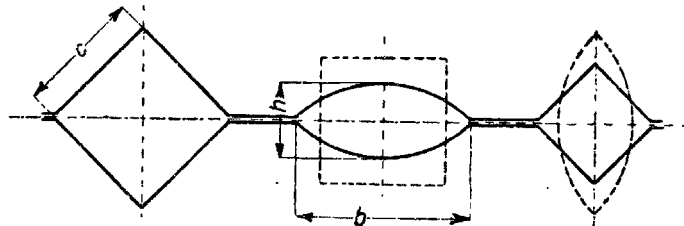
³⁷ „St. u. E.“, 44, 1924, N. 14,

ность получается очень высокой, значительно выше, чем при прокатке старым способом — вручную.

Прокатка вручную применяется только для квадратов больших сечений. При прокатке круглого железа свыше 100 мм диаметром, прокатка вручную применяется лишь для небольших партий.

1. Прокатка квадратного железа вручную

Построение этих калибров состоит в определении размеров вертикальной и горизонтальной диагоналей. Вертикальную диагональ обычно принимают равной 1,4, горизонтальную диагональ — рав-



Фиг. 53. Вытяжная система овал — квадрат.

ной 1,42 стороны квадрата в горячем состоянии, в связи с чем углы при вершине равняются 91° («Hütte для металлургов»).

По данным Кирхберга³⁸ угол при вершине получается правильным, если делать горизонтальную диагональ на 1 мм больше вертикальной диагонали. Уширение учитывается тем, что углы перехода калибра в бурт закругляются радиусом, равным $\frac{1}{3}$ стороны квадрата.

2. Прокатка квадратного железа в проводках

При прокатке квадратного железа в проводках чистовые калибры являются точными квадратами (угол при вершине 90° , обе диагонали равны). Закругления перехода калибра в бурт можно не делать. Ширина бурта здесь также 5—10 мм. Крайние бурты должны быть достаточно широкими, чтобы иметь возможность установить пропускную коробку. Черновыми калибрами при прокатке квадратного железа из проводок являются вытяжные ромбы, получаемые из квадратов. Все ромбы должны находиться в отдельной паре валков, для того чтобы иметь возможность изменять их сечение перестановкой последних.

Конструкция вытяжных ромбов характеризуется следующими данными: высота отделочного ромба должна быть на 1—3 мм меньше горизонтального размера готового профиля. Горизонтальная диагональ отделочного ромба определяется из его площади сечения, полученной на основе плана обжатий.

Стороны ромба переходят в бурты без закругления. Углы при вершинах делаются также без закруглений.

3. Прокатка круглого железа вручную

Конструкция калибра в этом случае состоит в том, что место пересечения окружности горячего профиля с линией валков в зазоре несколько закругляется. Чистовые калибры одновременно являются черновыми для меньших сечений. Заготовка пропускается через данный калибр или соседний меньший по несколько раз, каждый раз с кантовкой на 90° , для того чтобы избежать образования заусенца и получить в итоге совершенно точный круглый профиль.

4. Прокатка круглого железа в проводках

Чистовые калибры для небольших размеров являются точными кругами, иногда немного закругленными в зазоре.

Черновым калибром при прокатке круглого железа из проводок является овал. Черновой калибр для последнего ручья, так называемый отделочный или чистовой овал, должен иметь точно определенные размеры для получения из него в один пропуск вполне точный, круглой формы профиль.

Круглые и квадратные профили являются наиболее распространенными прокатными профилями. Калибровка их поэтому наиболее законченная, в связи с чем нет надобности в ее новом проектировании в каждом отдельном случае, а нужно пользоваться испытанными калибровками, приводимыми Кирхбергом³⁹ или «Hütte для металлургов»⁴⁰. Круглые профили от 4 до 10 мм, идущие в протяжку и при прокатке сматываемые в бунты, носят название проволоки. Тонкие сорта в отличие от остальных сортов круглого железа катаются на одной клети в несколько ниток.

При прокатке тонких сортов для возможности получения высокой производительности задача заготовки из калибра в калибр происходит автоматически при помощи специальных обводок (калибровку для проволоки см. «Hütte для металлургов», изд. IV, стр. 717).

С. КАЛИБРОВКА ПОЛОСОВОГО ЖЕЛЕЗА

Полосовое железо большей частью катается таким образом, что чистовой пропуск происходит в гладких, полировочных валках, предчистовой — в ребровых, ступенчатых валках, а остальные, как правило, в закрытых плоских черновых калибрах (полосовой калибр см. фиг. 10). При узких полосах всю прокатку можно производить в ступенчатых валках. Однако общепотребительным является вышеуказанный способ. Благодаря тому, что полосовое железо относится к наиболее распространенным сортам торгового железа, калибровка его почти повсюду одинакова. Для простейших прямоугольных форм полосового железа определение обжатий исключительно просто и состоит в измерении высот калибров. В этом случае приносит большую пользу парабола Кирхберга (фиг. 49). Просматривая размеры высот калибров испытанных калибровок по-

³⁸ E. Kirchberg, Grundzüge der Walzenkalibrierung, S. 58 u. 59.

³⁹ E. Kirchberg, Grundzüge der Walzenkalibrierung, S. 46 u. 49—53.

⁴⁰ „Eisenhütte“, IV Auflage, S. 741.

лосового железа, можно убедиться, что эти размеры представляют собой точки параболы.

Бурты валков для полосового железа должны быть выше обычных, так как из одного и того же плоского калибра обычно прокатываются сорта различной толщины.

Характерными для прокатки полосового железа являются ребровые и полировочные проходы. Для получения полосы необходимой ширины их прокатывают в ребровых ручьях в вертикальном положении.

В ребровом ручье большое давление невозможно, к тому же в нем нет необходимости. В полировочном проходе полосовое железо катается при очень малом обжатии, так как правильная ширина и прямые вертикальные бока могут быть получены только при этом условии. Наряду с полосовым железом должно быть упомянуто о тех сортах его, которые в торговом деле называются обручным железом.

Особенность этих профилей заключается в том, что их толщина по отношению к ширине очень мала; поэтому прокатка обручного железа несколько отличается от прокатки обычного полосового железа. Обручное железо, вследствие своей незначительной толщины, очень быстро стынет, поэтому оно может быть прокатано при условии (в противовес нормальным условиям прокатки) больших обжатий в последнем и предпоследнем калибрах. Точно так же в связи с незначительной толщиной и упругостью обручного железа прокатка последнего производится без пропуска на ребро, причем калибры делаются со значительно большим выпуском.

Д. КАЛИБРОВКА НАИБОЛЕЕ ХОДОВЫХ ФАСОННЫХ ПРОФИЛЕЙ

Все остальные прокатные сечения, не упомянутые в разделах А—С, относятся к фасонным профилям.

Фасонные профили отличаются тем, что ввиду их сложной формы не имеется возможности применять равномерное обжатие по всему сечению. Однако и для калибровки фасонных профилей необходимо по возможности придерживаться этого основного правила; его можно не принимать во внимание только в первых калибрах.

1. Двутаверное железо

Прокатка фасонных профилей, как двутаверное железо, требует наибольшего расхода энергии (что будет ниже подтверждено соответствующими данными) по сравнению со всеми другими фасонными профилями.

Причина большого расхода энергии заключается в своеобразной и сложной форме сечения двутаверного железа.

В гл. VIII были описаны общие правила обработки фланцев фасонных профилей, из которых следует, что фланцы могут быть образованы только при помощи бокового давления. Фланцы двутаверного железа, как правило, очень тонки, очертания их образуют малый угол, поэтому становится понятной необходимость большого расхода энергии для вытеснения известного количества металла из

глубокой корытообразной части, образованной шейкой и внутренними сторонами фланцев. В противоположность ранее упомянутым прокатным профилям, при прокатке двутаверов имеет место более значительное перемещение металла.

Затрудненное движение металла в плоскости сечения объясняется тем, что одновременно с обработкой шейки прямым давлением необходимо обрабатывать фланцы боковым — горизонтальным или почти горизонтальным давлением. Помимо этого, в то время как при прокатке простых сечений, движение частиц происходит почти исключительно в продольном направлении, при прокатке двутаверов и других подобных сечений часть металла перемещается также в боковых направлениях, т. е. в самой плоскости сечения, на что требуется добавочный расход энергии.

Вышеупомянутое глубокое корытообразное углубление в сечении двутавера может быть образовано, главным образом, при начале формообразования, т. е. в первых фасонных ручьях тем, что материал вытесняется от середины в фланцы. Форма и величина истечения металла при прокатке двутаверового железа были определены Метцем на основе точного и планомерного исследования⁴¹. Метц пришел к следующим выводам:

1) в первых проходах увеличивается трение выступающей остроугольной части валка, образующей углубление по мере увеличения угла; при этом имеет место некоторое уменьшение высоты фланцев;

2) высота фланцев увеличивается с увеличением высоты начального сечения;

3) высота фланцев увеличивается при разрезывании исходного сечения в несколько проходов;

4) для выполнения разрезывающего калибра необходимо, чтобы отношение высоты исходного сечения к высоте фланцев в первом калибре равнялось 1,07—1,21;

Метц для своих опытов применял заготовки, в которые вставлялись специальные болты как в горизонтальном, так и в вертикальном направлениях. Путем разрезки прокатанных заготовок были установлены размеры и вид деформации болтов, и по ним — форма и величина движения частиц материала. Кирхбергом, Тафелем и Дегецом были выработаны различные методы для проектирования калибровки балок.

Брово первый провел систематическую работу по этой калибровке. Тафель при своих калибровках, путем применения уже известных канавок, установил правило о равномерности распределения давления по сечению, и для проверки правильного выполнения калибров применял собственные расчеты. Дегец большей частью изучал профили специального характера. Отдельно должна быть упомянута работа Кирхберга по калибровке фасонных профилей и балок⁴², послужившая в дальнейшем основой для графического метода калибровки балок, корытного железа, рельс и других про-

⁴¹ Norbert Metz, Experimentelle Untersuchungen des Materialflusses beim Walzen von Trägern, St. u. E., 1926, 46, 1577—1582.

⁴² E. Kirchberg, Grundzüge der Walzenkalibrierung, Verlag W. Ruhfuss, Dortmund 1905, S. 66—80.

филей. Кирхберг на основании целого ряда исследований твердо установил, что увеличение толщины открытой части фланца находится в зависимости от тангенса угла предыдущего меньшего фланца из закрытой части калибра, и что эта зависимость может быть выражена в виде формулы (фиг. 54):

$$\operatorname{tg} \alpha_1 = \operatorname{tg} \alpha (1 + \operatorname{tg} \alpha).$$

Одновременно с этим было установлено, что разница высот фланцев, при которой еще возможна задача фланца из закрытой части калибра в последующий открытый меньший фланец, приблизительно соответствует зависимости (фиг. 55):

$$N = h \cdot \operatorname{tg} \alpha.$$

Из этой формулы следует, что разрезывание первоначального сечения должно производиться под углом не больше 45° с тем, чтобы при этом не уменьшать высоты фланцев. В отношении остальных закрытых фланцев Кирхберг делает следующие указания.

1. Угол фланцев:

$$\operatorname{tg} \alpha_1 = \frac{m}{x - 0,5h_1},$$

где m — средняя толщина фланца, x — больший катет угла, образующегося при пересечении сторон фланца.

2. Вертикальная высота фланцев

$$h_1 = h - 1 \text{ мм.}$$

На это определение высоты уже было указано в гл. VIII при разборе общих практических правил калибровки. Установленные Кирхбергом закономерные зависимости побудили металлургов калибровать такие профили, как балки, швеллера, рельсы и другие подобные, еще более простым графическим способом.

Это облегчалось тем, что к моменту опубликования формул Кирхберга практические методы калибровки балок, швеллеров и рельс были настолько однообразны, что ряд фасонных профилей катался в различных прокатных цехах с одним и тем же числом пропусков. Так, по сообщению Холцвайлера⁴³ прокатку балок обычно ведут со следующим количеством пропусков:

при прокатке балок высотой	80 — 100 мм	в	5 пропусков
"	110 — 200	"	7 "
"	210 — 300	"	9 "
"	320 — 400	"	11 "

Вайссенбергом 6 лет спустя⁴⁴ был опубликован проверенный метод калибровки, имеющий действительно большие преимущества (ср. гл. VIII, раздел В). То, что непрерывные кривые при графическом методе калибровки действительно являются параболообразными, следует из вышеупомянутых выводов и наблюдений Кирхберга. Это имеет силу для всех частей калибра. Кирхберг, например, устанавливает в своей работе, что отношение горизонталь-

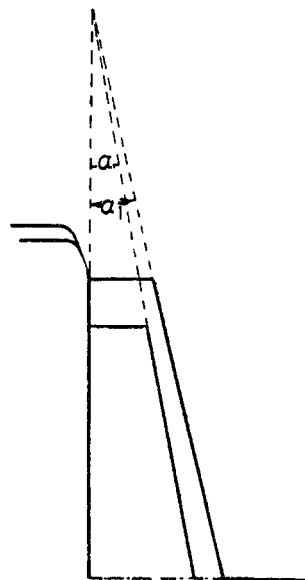
ных размеров толщин закрытых фланцев может быть выражено уравнением параболы

$$A_1 = A + \frac{A^2}{200}$$

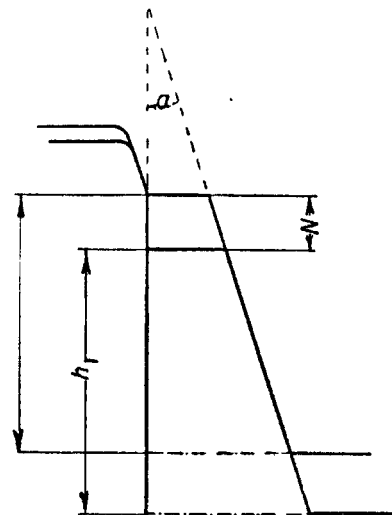
(ср. книгу Кирхберга, стр. 76). Данные исследования Кирхберга были подтверждены и дальше развиты исключительной работой Торкара⁴⁵. Пример калибровки балок показан на фиг. 56.

2. Корытное железо

Корытный профиль можно себе представить, если разрезать балку по средней линии. Корытный профиль представляет собой, таким образом, балку с двумя параллельными полуфланцами. Отсюда и большое сходство калибровок балок и швеллеров. Для лучшего вы-



Фиг. 54 Конструкция открытой части фланца у балок по Кирхбергу.



Фиг. 55. Размеры высот фланцев по Кирхбергу.

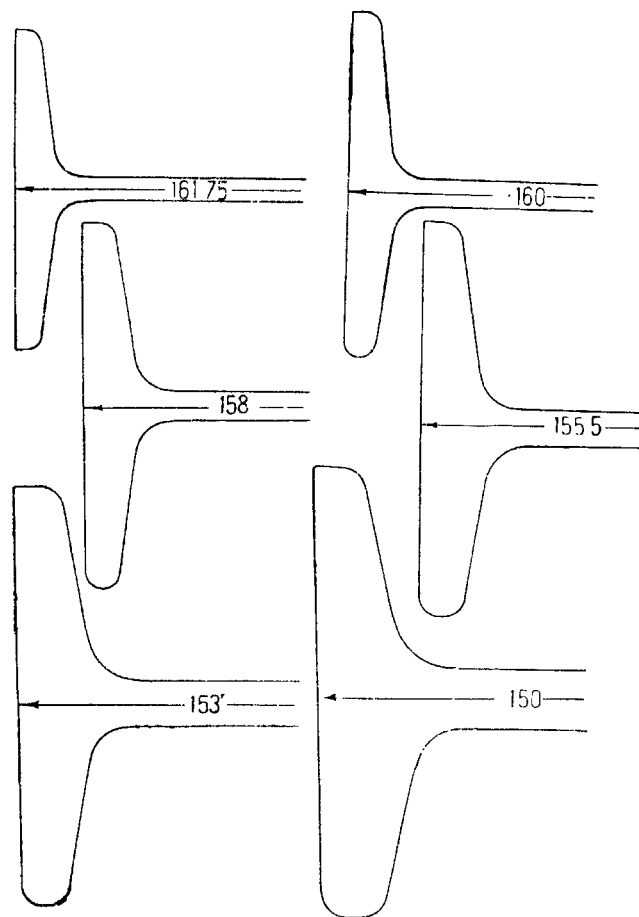
полнения полуфланцев, расположенных на одной стороне шейки, а также для получения острых кромок при калибровке корытного железа обычно применяются так называемые противофланцы, которые как бы заменяют отсутствующие полуфланцы. Эти противофланцы уничтожаются только в чистовом или предчистовом калибрах. Они применяются для того, чтобы иметь избыток металла для нижних частей верхних полуфланцев, а также и для выполнения крайних углов шейки. Применение этих противофланцев имеет еще и то преимущество, что дает возможность калибровать и корытное

⁴³ Holzweiler, Das Kalibrieren der Profilwalzen für Träger. „St. u. E.“, 1905 25, 450

⁴⁴ B. Weissenberg, Walzarbeit und Kalibrierung in graphischer Darstellung, „St. u. E.“, 1911, 31, 1653.

⁴⁵ F. Torkar, Ueber Kalibrierung von Trägern, „Archiv f. d. Eisenhüttenwesen“, Verl. Stahlisen, Dusseldorf, 1928, 155—158.

сечение в целом и его фланцы тем же способом, как и двутавровые балки. Таким образом все сказанное относительно калибровки двутавровых балок имеет в основном силу и при калибровке корытного железа. Калибровка корытного железа отличается от калибровки балок тем, что корытные профили употребляются для железных конструкций, вследствие чего они должны быть с острыми кромками, что для балок не обязательно.

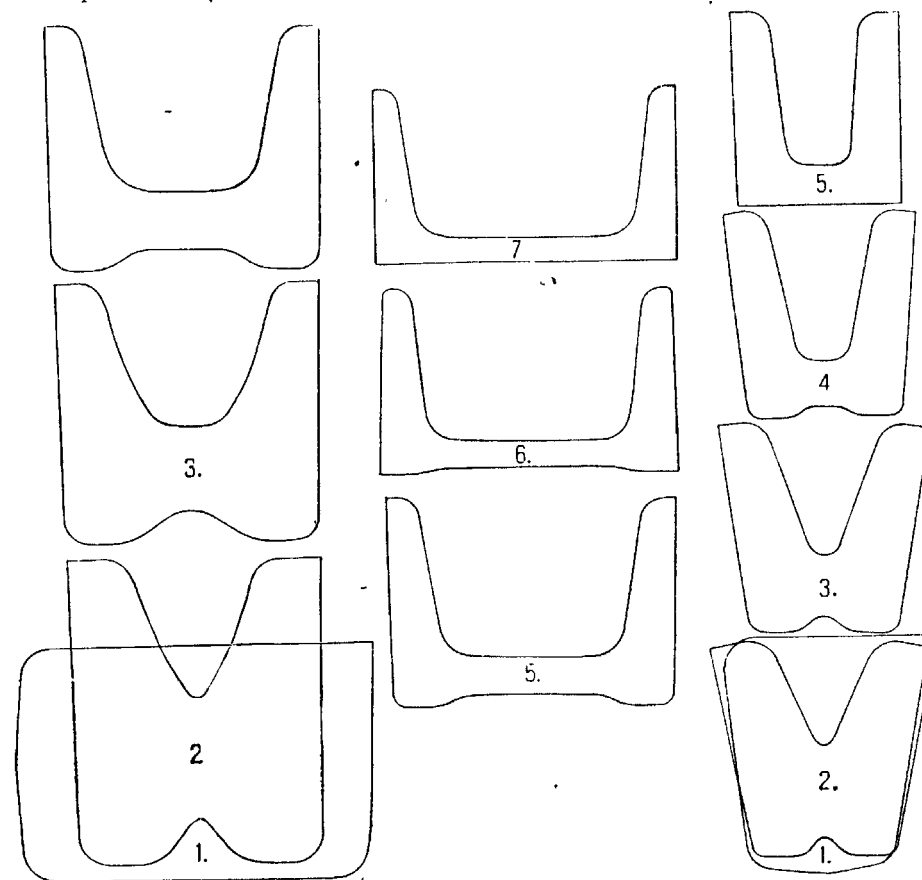


Фиг. 56. Пример калибровки балок.

В то время как фланцы при прокатке балок попеременно поступают из открытого в закрытый калибр, при прокатке швеллеров фланцы большей частью катаются в открытых ручьях. Это обеспечивает хорошее выполнение и быстрое образование фланцев. При прокатке корытного железа в постоянно открытых ручьях на фланцах образуются заусенцы, удаление которых требует дополнительных расходов. Обычно охотнее идут на лишние расходы по обрезке заусенцев, чем на производство швеллеров с тупыми кромками. Чтобы избежать образования заусенцев и лишних расходов на обрезку, швеллера часто калибруются таким образом, что предпослед-

ний калибр делается с закрытыми фланцами, при этом все или часть остальных калибров остаются открытыми. Применением такого вида калибровки при условии правильно установленных высот достигается, как правило, хорошее выполнение. Калибровка швеллера № 8, показанная на фиг. 57, выполнена с закрытым предпоследним калибром. Расположение фланцев по одной и той же стороне шейки делает возможным калибровку корытного сечения с развернутыми в стороны фланцами, при этом ускоряется образование фланцев и требуется меньше пропусков (фиг. 58).

Формообразование в этом полсложении происходит быстрее, так как при этом слабо действующее боковое давление дополняется со-



Фиг. 57. Калибровка швеллера № 8.

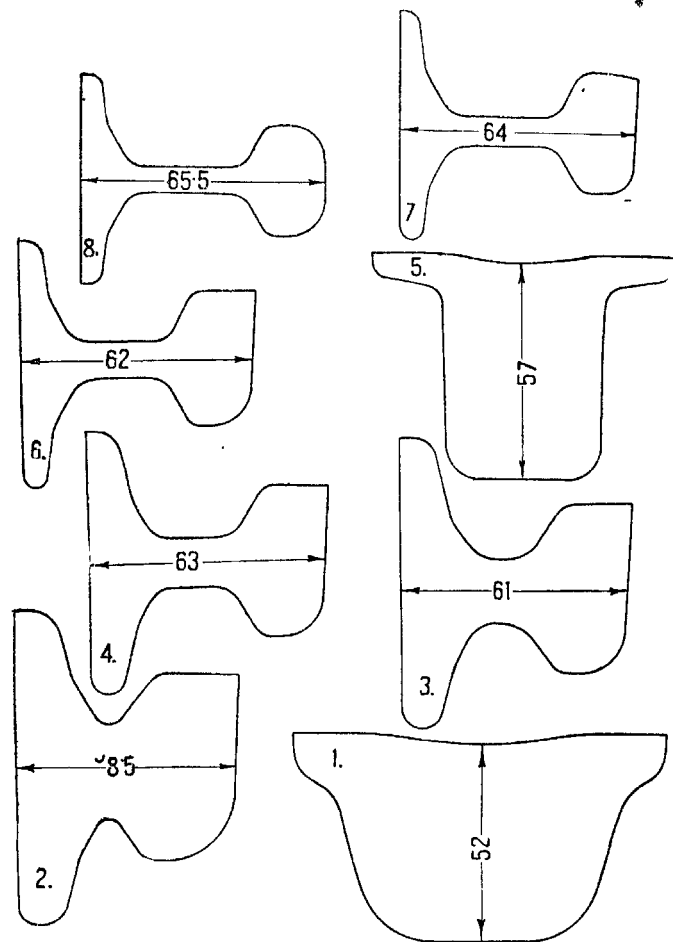
Фиг. 58. Калибровка ходового рельса 45×52 мм.

ставляющей прямого давления. Швеллера с небольшой высотой шейки, не входящие в стандарты швеллеров, применяемые, как направляющие канавки для раздвижных дверей (например для ж.-д. вагонов), называются ходовыми рельсами (Laufschiene). Такие профили имеют большое распространение. Форма и размеры их фланцев

делают еще более желательным калибровку с развернутыми фланцами, как это видно из калибровки ходового рельса 45×52 мм, приведенного на фиг. 58.

3. Рельсы

Калибровка рельс при знакомстве с калибровкой балок и швеллеров не представляет никаких затруднений. В связи с тем, что



Фиг. 59. Калибровка рельс.

головка так называемых рельс Виньоля симметрична по отношению оси шейки, половинки ее можно рассматривать как особый вид полуфланцев и калибровку их вести по тем же правилам, как и калибровку полуфланцев, балок и швеллеров. Первые фасонные калибры для рельс незначительно отличаются от таковых в калибрах для балок и швеллеров.

Разница заключается в том, что и в первом пропуске высота по-

дошвы больше высоты головки. Это обстоятельство является отличным для первых фасонных калибров для рельс. Первые фасонные калибры для балок отличаются тем, что они симметричны как в отношении вертикальной, так и горизонтальной осей, а для швеллеров — только вертикальной оси. Прочие отличия калибровки рельс являются следствием, с одной стороны, большей твердости металла, идущего на рельсы, с другой стороны, повышенных требований в смысле правильности профиля, размеров и веса погонного метра.

Материал для рельс, благодаря повышенному содержанию в нем С и Mn, имеет твердость и при температуре прокатки большую, чем у бедного С и Mn железа. Если даже эта разница равна только 1—2 кг/мм², то, выраженная в процентах по отношению к пределу текучести нагретой мягкой стали, она становится значительной.

Вследствие этого рекомендуется катать рельсы при меньших обжатиях, чем фасонные профили из мягкого железа. Но так как образование головки рельса без выполнения или заусенцев в связи с его удобной формой не встречает никаких затруднений, то только для подошвы рельса в целях регулирования массы металла применяется специальный так называемый ребровой калибр, врезаемый в валки в одном или двух местах.

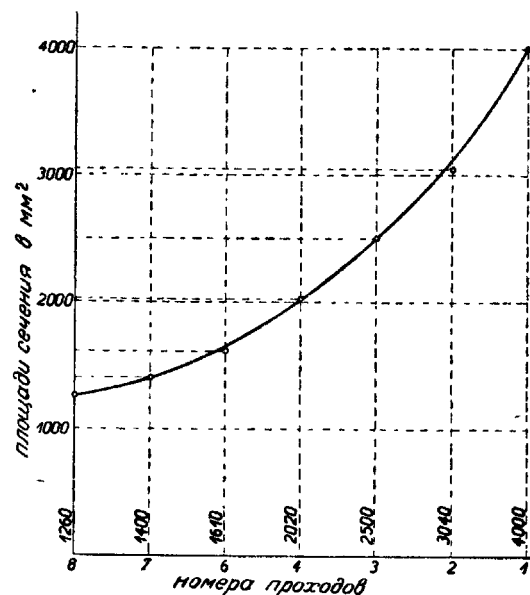
Ребровой калибр, характерный для калибровки рельс, делается колоколообразным и служит для обработки перьев подошвы рельса, в то время как другие части рельса проходят через калибр без обжатия (см. ребровой калибр в калибровке рельс по фиг. 59).

Вследствие того, что площадь обжимаемых частей сечения в отношении ко всему сечению чрезвычайно мала, следует, что применение такого калибра противоречит правилу равномерного распределения давления в частности, и принципам прокатки — вообще. Ребровой калибр в калибровке рельса можно понимать только как вспомогательное средство, к которому прибегает калибровщик исключительно в силу старых традиций, упуская при этом важнейшее правило калибровки. Это упущение, хотя бы даже в одном только калибре, ведет к тому, что в результате более сильного охлаждения необжимаемых частей сечения полоса выходит из ребрового ручья сплошь и рядом винтообразной. Также в результате неравномерного распределения давления в рельсах часто возникают вредные напряжения. Калибровка рельса имеет еще и то отличие, что чистовой калибр со стороны головки делается открытым по средней линии. Это возможно потому, что головка большинства рельс ограничена одной непрерывной кривой; линия опорной поверхности переходит в стороны головки плавной кривой. Вообще при прокатке трудных профилей необходимо иметь два чистовых калибра, при прокатке рельса — это безусловная необходимость; чистовые валки должны иметь парные отделочные и предотделочные калибры, так как они при прокатке твердого, возможно несколько пристывшего, металла исключительно быстро вырабатываются, что ведет к получению неточного профиля. Представленная на фиг. 59 калибровка рельса, хорошо оправдавшая себя на производстве, показывает, что величины площадей сечения следующих друг за другом калибров, кроме ребрового, представляют собой парабо-

лическую кривую. На фиг. 60 нанесены площади сечения всех этих калибров; из них только площадь второго калибра лежит вне кривой и то только на 2,5%.

4. Угловое железо

Формообразование, число и расположение частей сечения угловых профилей сильно отличаются от всех уже описанных сечений. Поэтому для углового железа применяются другие методы калибровки. Имеется два метода калибровки углового железа: по первому более старому способу угол в вершине остается во всех калибрах равным или почти равным 90° . Чтобы иметь возможность обработать полки, последние изгибаются в части между краем и серединой или же на всем своем протяжении. Ясно, что при этом способе калибровки полки должны постепенно отгибаться назад;



Фиг. 60. Парабола калибровки рельсов по фиг. 59

горизонтальная ширина калибров по мере прокатки уменьшается от калибра к калибру, в результате чего затрудняется задача штуки в ручей. Этот способ калибровки не имеет сейчас распространения.

При втором способе калибровки угол в вершине от калибра к калибру увеличивается; лучше выполняются полки, особенно если в предпоследнем калибре имеется избыток металла, для того чтобы окончательный профиль получился с заусенцем. По удалении на специальных машинах этого заусенца получается угловое железо с хорошо выполненными полками и

с острыми кромками. Этот метод пригоден как для равнобокового, так и для неравнобокового углового железа.

Между калибровками этих угловых профилей имеется лишь та разница, что при неравнобоких уголках валки легче смещаются в горизонтальном направлении. Для выравнивания сдвига при калибровке неравнобоких уголков меньшим полкам дают несколько большее давление. Разница в давлении, как правило, не превышает 2 мм; она делается тем большей, чем больше разница между длиной полков.

Хотя давление в полках является переходным от прямого к боковому, однако, и для углового железа давление может быть распределено по параболе.

Уширение в целом не определяется как уширение отдельных

полок, так как в калибрах угловых профилей оно незначительно. Если же, однако, уширение все-таки принимается во внимание, то гораздо важнее дать прокатываемой полосе надежное боковое направление, делая максимальную ширину ее равной или немного меньшей ширины последующего калибра. Учитывая уширение, калибрам дается обычно довольно значительный выпуск.

Угол при вершине в чистовом калибре равен 90° . Угол в предчистовом калибре делается не больше $93-94^\circ$ в связи с тем, что железо при этом уже недостаточно пластично. В остальных калибрах этот угол быстро увеличивается. Угол первого чернового калибра делается тем больше, чем

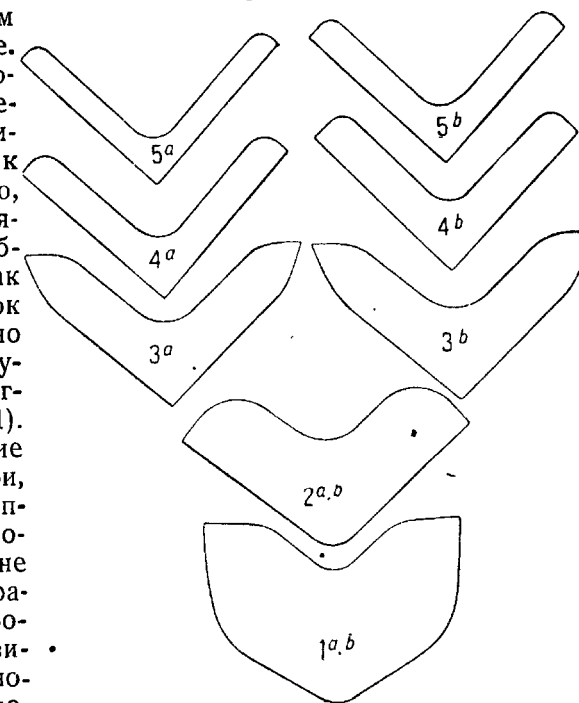
крупнее профиль, т. е. чем больше число пропусков. Радиус закругления вершины угла увеличивается от калибра к калибру с той целью, чтобы материал, находящийся в закруглении, обрабатывался так же, как и полки. Концы полков закругляются постепенно уменьшающимися радиусами (см. калибровку углового железа, фиг. 61).

Совсем маленькие уголки калибруются в три, средние в пять и крупные в семь-девять пропусков. Это, однако, не является незыблемым правилом, так как число пропусков находится в зависимости также мощности машины, толщины полков и т. д.

Угловое железо производится с полками разной толщины при одной и той же их длине. Подъемом чистовых валков можно регулировать толщину полков в пределах 1 мм; из калибра толщиной 10 мм можно, таким образом, получить уголки толщиной в 9—11 мм.

При желании получить из этого же калибра еще более толстый профиль необходимо также увеличить и длину полков. Неоднократно применяемый способ, по которому каждый чистовой калибр служит черновым для последующего более тонкого профиля, здесь неприменим так как уголки, прокатанные таким способом, получаются с очень плохо выполненными полками.

Более правильно иметь на каждые два чистовых калибра один черновой. В случае больших переходов по толщине полков необходимо врезывать также и третий калибр на две толщины (фиг. 61). При прокатке уголков в стане трио в пять пропусков лучше всего распо-



Фиг. 61. Калибровка углового профиля $50 \times 50 \times 7-10$ мм.

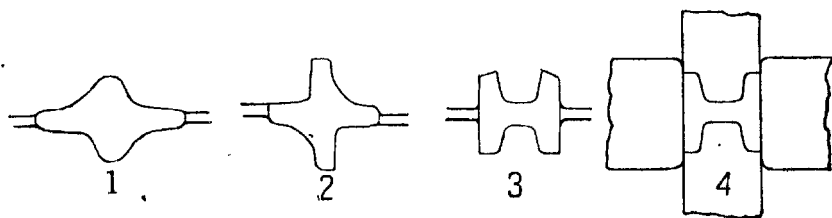
ложить калибры в двух клетях; при семи — в девяти пропусках в трех клетях. Такое распределение калибров делает возможной точную установку валков.

Чистовые калибры не должны находиться в одной клети с черновыми.

При стане допель-дуо приходится удовлетворяться тем, что только чистовые калибры располагаются в отдельной паре валков, все же прочие — в остальных клетях. Угловые профили благодаря их простой и симметричной форме особенно легко поддаются графической калибровке.

5. Специальные фасонные профили

Прокатчику довольно часто приходится иметь дело с разнообразнейшими, иногда довольно фантастическими, профилями. Дегец в своей книге «Walzenkalibrierung» приводит примеры таких сложных специальных профилей. Из многочисленных разновидностей таких профилей на фиг. 62 представлена калибровка 16-мм подков-



Фиг. 62. Калибровка 16-мм подковного железа.

ного железа, являющаяся ярким примером того, что способ калибровки зависит не только от формы, но и от размеров сечения. Если указанный профиль на основании его сходства с двутавровым железом калибровать способом, уже указанным при калибровке балок, то при такой калибровке заготовка в последнем и предпоследнем проходах настолько остывает и твердость настолько повышается, что калибры вырабатываются в течение 1—2 час., в результате чего получаемый профиль теряет всякое сходство с требуемым. Применением более толстых черновых калибров, охлаждение которых незначительно, а еще лучше прокаткой в универсальном стане с валками из закаленного чугуна, можно добиться получения хорошего профиля.

X. РАСХОД РАБОТЫ ПРИ ПРОКАТКЕ

Попытки вычислить потребный расход работы при прокатке до настоящего времени не завершились еще полным успехом.

Первый, кто подвел под определение расхода работы прокатки теоретическую базу, был К. Финк; его формула была опубликована в 1784 г. в журнале «Zeitschrift für das Berg-, Hütten- und Salinenwesen Preussens», стр. 200—220. Эта формула Финка следующая:

$$A = V k \cdot \log_n \frac{h_1}{h_2},$$

где A — расход работы для раскатки одной полосы в кг/м,
 V — объем полосы в см³,
 k — предел текучести (Quetschgrenze) нагретого металла в кг/мм²,
 h_1 — высота полосы до пропуска,
 h_2 — высота полосы после пропуска.

По Финку, таким образом, величина работы прокатки находится в прямой зависимости от объема полосы сопротивления материала, т. е. предела текучести и натурального логарифма уменьшения высоты.

Так как формула Финка дает расход работы не за каждую секунду времени, а общий расход работы, потребный для раскатки полосы в одном или нескольких проходах, то в эту формулу вводится числовое значение объема полосы. По той же причине величина уменьшения сечения показана не в виде разности высот, а в виде натурального логарифма отношения этих высот.

Поэтому величина расхода работы по формуле Финка растет в большей степени, чем увеличение разности высот. При желании получить по этой формуле расход работы в единицу времени, необходимо величину работы разделить на время прокатки⁴⁶. Формула Финка применялась и часто применяется теперь при расчетах и проектировании потому, что данные формулы близко подтверждаются данными практики. Лучше всего подтверждают ценность формулы Финка новейшие исследования Гаммершмидта и Бабина⁴⁷, которые пользовались этой формулой для определения чистой работы деформации (работы прокатки) и для определения всех потерь на основании измеренной величины работы.

Несколько лет спустя Бласс⁴⁸ предложил новую формулу по определению работы прокатки, составленную на основе теории Кика и Баушингера:

$$A = V k \frac{1-f^2}{2f^2} \sqrt{\frac{R(1-f)}{h_1}},$$

где R — радиус валков в см,

$f = \frac{h_2}{h_1} = \frac{\text{высота после прохода}}{\text{высота до прохода}} = \text{коэффициент уменьшения сечения,}$

величина которого всегда меньше единицы. Формула Бласса, следовательно, не дает также секундной работы прокатки в лошадиных силах, а дает полную работу прокатки в кг/м, связанную с определенным уменьшением высоты полосы. Главные существенные отличия от формулы Финка сводятся к тому, что в формуле Бласса вместо коэффициента обжатия применяется его обратная величина — коэффициент уменьшения сечения, во-вторых, в формулу вводится диаметр валков. Проверочные подсчеты показывают, что в то время как данные формулы Финка почти всегда совпадают с практи-

⁴⁶ Cp. E. Cotel u. I. v. Pattantyus, Die Berechnung der Walzarbeit, „Mitteilungen d. Berg- u. Hüttem. Abt. d. Hochschule zu Sopron“ (Oedenburg) 1929, S. 17—48.

⁴⁷ Fr. Hammerschmidt u. U. Babin. Kraftbedarf und Wirkungsgrad von Blech und Panzerplattenwälzwerken, „Archiv für das Eisenhüttenwesen“, Düsseldorf 1928, S. 367.

⁴⁸ Blass, Zur Theorie des Walzprozesses, „St. u. E.“, 1882, S. 283—293.

ческими данными, данные формулы Бласса в большинстве случаевывают меньше фактических почти на 30%.

По нашим сведениям формула Бласса вообще не находит применения. После Бласса прошел довольно большой отрезок времени пока в области теоретического определения расхода работы появилось нечто более или менее существенное. Однако необходимо отметить работу двух выдающихся специалистов: Киссельбаха и Кетгена. Первый из них рекомендовал для привода прокатных станов паровую машину, второй — электромотор; ими приводились подсчеты, доказывающие экономичность и преимущество каждого вида привода.

В области определения расхода работы при прокатке полный переворот произвели данные многочисленных опытов, произведенные Пуппе⁴⁹. Эти данные служат неиссякаемым источником для каждого исследователя в области определения расхода работы. М. Герман был первым, давшим на основе пупповских данных первую применимую формулу⁵⁰.

По Герману секундный расход работы в течение одного пропуска, выраженный в лошадиных силах, определяется по формуле

$$N = \frac{Fkv}{75} 2 \frac{\alpha}{\sin \alpha},$$

где k — предел текучести нагретого металла в $кг/см^2$,
 F — уменьшение сечения, т. е. обжатие в $см^2$,
 v — окружная или скорость выхода полосы в $м/сек$,
 α — угол захвата для данного пропуска.

Формула Германа гласит, что величина работы прокатки прямо пропорциональна обжатию, сопротивлению материала, скорости прокатки и некоторому коэффициенту, зависящему от угла захвата. За Германом последовал проф. К. Ланг⁵¹, предложивший следующую формулу, выражающую работу прокатки за секунду времени в лошадиных силах:

$$N = \frac{Fkv}{75} \left(1 + \frac{1 - \cos \alpha}{2} \right).$$

Выражение работы прокатки по формуле Ланга такое же, как по формуле Германа. Формула Ланга построена по тому же принципу, как и Германа, и отличается от последней только значением коэффициента, стоящего в скобках и зависящего от величины угла захвата. К сожалению, этот коэффициент в формуле Ланга при обычных условиях производства принимает такое значение, при котором он становится совершенно излишним. В большинстве случаев практики угол захвата α меняется в пределах от 10—15 до 22°, при этом коэффициент в формуле Ланга принимает значения: 1,007, 1,02 и 1,03.

Возвращаясь снова к формуле Германа, мы видим, что стоящий наряду с основной частью формулы $\frac{Fkv}{75}$ коэффициент $2 \frac{\alpha}{\sin \alpha}$ имеет значение почти равное 2 (2,01—2,05), так как при малых углах отношение $\frac{\alpha}{\sin \alpha}$ почти равно единице. Из всего сказанного можно сделать заключение, что вычисленная по формуле Ланга величина расхода работы равна почти половине расхода работы, вычисленной по формуле Германа при одинаковых условиях прокатки.

То обстоятельство, что Ланг определяет величину k (сопротивления нагретого металла) несколько иным способом, чем Герман, в связи с чем, возможно, меняется и величина работы, не может быть принято во внимание на основе нижесказанного.

В хронологическом порядке должна быть упомянута работа автора⁵², определившего на основе опытных данных Пуппе удельную работу прокатки (секундная работа прокатки в лошадиных силах на 1 кг железа). Так как эта работа не выражена в виде формулы, то к данным ее мы вернемся после разбора всех формул по определению работы прокатки.

Ланг определяет сопротивление (предел текучести) нагретого металла, т. е. значение k , с одной стороны, путем очень сложных подсчетов, а, с другой стороны, выводит непосредственно из опытных данных Пуппе. В последнем случае все ошибки и недостатки опытных данных Пуппе находят свое выражение в значении k . Метод этот потому недопустим, что факторы, влияющие на величину сопротивления материала и связанную с этим вязкость, по сравнению с влиянием температуры чрезвычайно малы в действительности.

Это положение целиком подтверждается работой Ф. Гаммершмидта⁵³. Последний применял значения k , взятые по данным Риделя и Зибеля и приведенные в графике (фиг. 63).

Гаммершмидт говорит по этому поводу следующее: «Значение предела текучести (k) Жеза, Риделя и Зибеля соответствует опытам со статическим давлением, в то время как сопротивление истечения возрастает с возрастанием скорости деформации. При относительно небольших скоростях прокатки это увеличение, однако, незначительно. Также при наклепе может возрастать сопротивление истечения. По опытам Ф. Кербера, В. Роланда, Ф. Зацервальда и др. при температуре выше 800° наклепа больше не бывает. Применение величины k по Зибелю и Риделю; таким образом, вполне оправдывается».

Из рассмотрения всех разобранных формул следует, что для определения полезной работы прокатки, чистой работы деформации, в данное время наиболее подходящими можно считать формулы Финка и Рейтэ, в то время как формулы Германа и Ланга, полученные на основе опытных данных Пуппе, сильно отличаются друг от друга.

⁵² E. Cotel, Zur Bestimmung der Walzarbeit, „St. u. E.“, 1918, 38 S. 336.

⁵³ Fr. Hammerschmidt u. U. Babin. Kraftbedarf und Wirkungsgrad von Walzwerken, „Archiv für das Eisenhüttenwesen“ 1928, S. 367.

⁴⁹ Puppe, Versuche zur Ermittlung des Kraftbedarfes an Walzwerken, Düsseldorf 1909; ferner Dr. Ing. I. Puppe, Untersuchungen über Walzdruck und Kraftbedarf, Düsseldorf 1903.

⁵⁰ M. Herrmann, Walzarbeit und Walzdruck, „St. u. E.“, 1911, 31 S. 1706.

⁵¹ Karl Lang, Beiträge zur Berechnung der Walzarbeit, „St. u. E.“, 1916, 3610, S. 10.

Основа формул в обоих случаях одинаковая, именно:

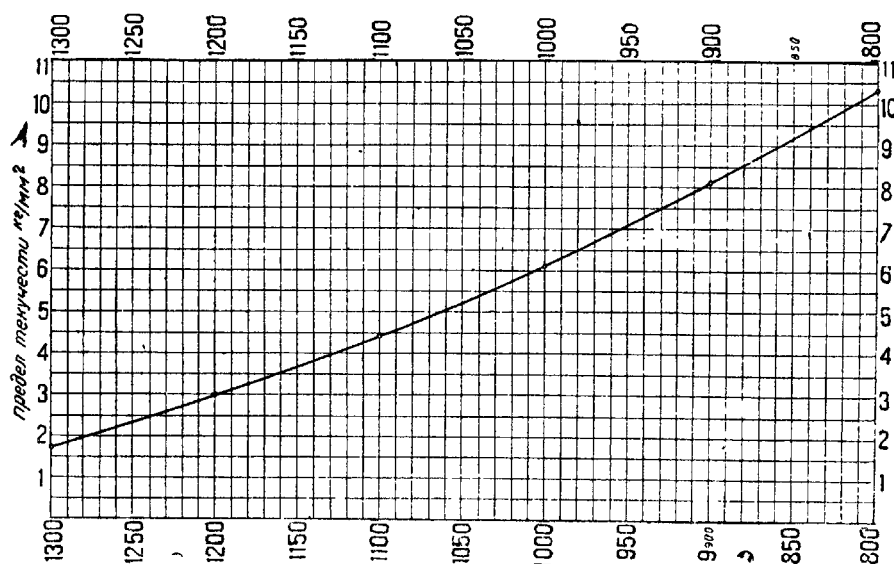
$$Fkv.$$

Эта основная формула вполне совпадает с формулами Финка и Рейтэ⁵⁴ (по Рейтэ $N = \frac{Qkv}{75} 2 \frac{h_1 - h_2}{h_1 + h_2}$), в которых стоящее рядом с kv выражение соответствует величине обжатия (см):

$$Q \cdot \log_n \frac{h_1}{h_2} = Q \cdot 2 \frac{h_1 - h_2}{h_1 + h_2} = F.$$

Исходя из уширения, при $b_1 = b_2 = b$, обжатие будет

$$F = Q_1 - Q_2 = b(h_1 - h_2).$$



Фиг. 63. Диаграмма предела текучести нагретой стали.

В формуле Рейтэ мы имеем

$$Q = \frac{Q_1 + Q_2}{2} = \frac{(h_1 + h_2)b}{2},$$

откуда средняя ширина

$$b = \frac{Q}{\frac{h_1 + h_2}{2}}.$$

зависящие же от угла захвата коэффициенты в обоих случаях, наоборот, различны, именно:

по Герману 2 (точнее 2,02—2,05),
по Лангу 1 (точнее 1,007—1,03).

Коэффициенты Германа и Ланга, как видно, совершенно «нечувствительны». При этом, в то время как коэффициент Германа имеет еще некоторое значение, коэффициент Ланга, благодаря тому что он почти равен единице, не может изменить значения основной формулы и поэтому не имеет никакого практического значения.

Рассматривая получаемые значения коэффициентов, зависящих от угла захвата и влияющих в той или иной степени на работу прокатки, естественно, возникает вопрос, имеет ли вообще какой-либо практический смысл вводить в формулу работы коэффициенты, определяемые различными способами, когда известно, что на величину расхода работы кроме угла захвата также влияет и целый ряд других факторов.

Как Герман, так и Ланг подчеркивают, что их формулы пригодны только для прямоугольных полос при свободном уширении. При других сечениях расход работы может быть определен только при помощи некоторых добавочных практических коэффициентов.

На основании вышесказанного более правильным будет определять величину работы прокатки путем ввода в основную формулу $F \cdot k \cdot v$ коэффициента C , зависящего от всех факторов, влияющих на расход работы, а не только от угла захвата.

В этом случае, следовательно,

$$N = FkvC$$

обозначает расход работы при прокатке.

Величина C , зависящая от калибровки и самого процесса прокатки, может быть определена по опытным данным Пуппе.

Из исключительно ценной работы Пуппе «Опыты по определению расхода работы при прокатке» можно определить только лишь чистую работу деформации (Eu). При обработке своих данных Пуппе брал в основу полезную работу прокатки (E), в которую кроме чистой работы деформации входит также работа трения, в первую очередь трения в шейках валков.

Полезную работу прокатки Пуппе определяют следующим образом: из полной работы, отданной приводом стана, высчитывается работа холостого хода, оставляя при этом без внимания работу трения, вызываемую силами, появляющимися при пропуске. К определенной, таким образом, работе прибавляется работа махового колеса и окончательно получается полная полезная работа прокатки. Вследствие этого фактор C , определенный из пупповской полезной работы прокатки, должен быть несомненно большим, чем коэффициенты, стоящие у основной формулы $F \cdot k \cdot v$, в формулах по определению теоретической работы деформации (Eu).

В своей последующей работе «Untersuchungen über Walzdruck und Kraft bedarf» (1913 г.) Пуппе уже обособляет чистую работу деформации (Eu).

При этом вычисленные значения работы деформации в некоторых случаях получались настолько неправдоподобными, что Пуппе сам отмечает: «...невозможность вычислить потери трением при каждом отдельном пропуске, особенно потому, что коэффициент трения в условиях прокатки настолько непостоянен, что он поддается только приблизительному определению, ставит под сомнение воз-

⁵⁴ A. Rejtő, Einige Prinzipien der theoretischen mechanischen Technologie, Berlin 1927, VDI-Verlag, S. 356—359.

возможность этим путем когда-либо, более или менее точно, определить работу деформации» (стр. 24).

Поэтому все формулы по определению необходимого расхода работы при прокатке какого-либо профиля, выведенные на основе теоретической работы о деформации, имеют только чисто теоретическое значение.

Наилучшие результаты обычно получаются, когда искомые факторы вычисляются на основе пупповской полезной работы прокатки, по которой можно определить действительный наибольший расход работы при различных калибровках.

Автор сам исходил из этих же соображений, когда (см. «St. u E.», 1918, № 16) определял значение удельного расхода работы на единицу веса вытесненного объема. Эти значения имеют то преимущество, что они получены на основании многочисленных опытных данных Пуппе и поэтому должны быть вполне надежными.

Основываясь на необходимом расходе работы для вытеснения 1 кг железа в 1 сек.: N_j (л. с./кг/сек), можно легко определить коэффициент, входящий в формулу по определению полезной работы прокатки:

$$N = CFkv$$

при $N = G \cdot N_j$, когда $G = \frac{Fv\gamma}{10}$ кг/сек,

где F — обжатие см^2 ,

v — скорость прокатки в м/сек,

γ — удельный вес нагретой стали равен 7,5 кг/дм³, в то время как в холодном состоянии $\gamma = 7,8$ кг/дм³,

k — предел текучести в кг/мм²,
имеем

$$C = \frac{0,75 N_j}{k}$$

Формула для определения чистой работы прокатки при применении значений для N_j , приведенных в работе автора, дает для фактора C величины, верхние пределы которых обеспечивают безусловную надежность производства, а нижние пределы, наоборот, дают возможность определить чистую работу прокатки и, следовательно, проверить правильность теоретических формул.

В наших вычислениях наименьшее значение C для черновых квадратных калибров определено равным 5. При этом значение k в кг/мм² постоянно определялось из таблицы Жеза-Риделя-Зибеля (фиг. 63).

Из наибольшей величины удельной работы прокатки, потребной для вытеснения 1 кг железа в 1 сек., может быть выведена еще одна важная закономерность.

При определении функции $N_j = f(t^0)$ для ящичных калибров, у которых вследствие их простой формы величина удельной работы меняется незначительно, можно установить, что максимальные значения N_j находятся почти в прямой зависимости от температуры. Эта зависимость приблизительно выражается следующей формулой:

$$N_j = C_1 (1400 - t^0) \text{ л. с./кг/сек}$$

где $C_1 = 0,16$.

Из этого следует, что на величину работы прокатки решающее влияние оказывает температура.

Влияние изменений всех остальных факторов, связанных с процессом прокатки, как скорость прокатки, диаметр валков, угол захвата и др., не поддаются точному определению. Данные Пуппе показывают, что расход работы при совершенно одинаковых условиях прокатки в одном и том же калибре очень часто принимает значения, отличающиеся друг от друга почти на 50%; в связи с этим приходится удовлетворяться определением наибольшей величины работы прокатки при разных температурах для данной калибровки.

Наряду с наибольшими значениями необходимо также определять наименьшие значения расхода работы, получающиеся при наиболее благоприятных условиях; их должен добиваться каждый прокатчик при калибровке, при организации прокатного дела, а главным образом, при руководстве производством, используя при этом данные практики и опытов.

Прямая зависимость удельного расхода работы от температуры обуславливает собой почти такую же прямую зависимость изменения предела текучести от температуры. Исследуя в этом направлении данные Риделя и Зибеля, можно установить, что кривая уравнения $k = f(t^0)$ показывает небольшую кривизну, при этом в расчет принимается предел текучести, определяемый по формуле:

$$k = 0,015 (1400 - t^0) \text{ кг/мм}^2.$$

В этом случае имеет место также уравнение

$$N_s = C_2 k,$$

где

$$C_2 = \frac{C_1}{0,015}.$$

При этом фактор:

$$C = 0,75, C_2 = 50 C_1.$$

Это означает, что в формуле работы прокатки N для ящичных калибров на месте фактора C должны быть поставлены, как крайние значения

$$C_{\max} = 8 \text{ и } C_{\min} = 5.$$

Приводимые ниже зависимости дают возможность легко определить из величин $V_1 = \frac{V}{E}$ по таблицам Пуппе значения факторов C для всех видов калибровок.

Так как $V_1 = \frac{1000}{75} \cdot V_f$, где $V_f = \frac{1000}{Nf \cdot \gamma} \text{ см}^3/\text{л.с./сек}$ при $\gamma = 7,5 \text{ кг/дм}^3$, то удельная работа прокатки, выраженная через V_1 , будет:

$$N_j = \frac{1780 \text{ л.с./кг/сек.}}{V_1 \text{ кг/сек.}}$$

На основе этого и вышесказанного, получаем для искомого фактора:

$$C = 0,75 \frac{N_j}{k} = \frac{1333}{V_1 k} = \frac{89000}{V_1 (1400 - t^0)}.$$

При приближенном определении удельного расхода мощности по зависимости $Nf=f(t)$ получается на основании предыдущей формулы при $C=\text{const}$ уравнения гипербола вида:

$$V_1 = \frac{89000}{C(1400 - t^\circ)} \text{ мм}^3/\text{кгм},$$

а также

$$Vf = \frac{6667}{C(1400 - t^\circ)} \text{ см}^3/\text{л.с./сек.}$$

Внеся пупповские данные в координатную систему $V_1=f(t)$ или $V_f=f(t)$ и определив сгибающие гиперболы, проходящие через наибольшее накопление точек, выявляют, что значение $C=\text{const}$ соответствует среднему значению фактора, входящего в уравнение

$$N = CFkv$$

или

$$N = C'Fv(1400 - t^\circ)$$

где $C' = 0,015 C$.

Максимальное значение $C=\text{const}$ дает наибольший расход работы при прокатке с достаточной надежностью в производстве.

Таким способом были обработаны все опытные данные Пуппе; по полученным результатам составлены соответствующие диаграммы.

На основе этих диаграмм составлена табл. 6, в которой сведены значения C для отдельных калибровок. Данные этой таблицы подтверждают известный факт, что расход работы в каком-либо калибре не зависит от того, является ли этот калибр первым или последним в калибровке. Большое значение имеет отношение между боковым и прямым давлением. При чрезмерно большом боковом давлении в каком-либо черновом фасонном калибре, вызывающем сильное трение о бурты, удельный расход работы в нем будет всегда больше, чем в правильно запроектированном чистовом калибре.

При известном факторе C по имеющемуся N (в л.с.) и скорости прокатки v (в м/сек) можно всегда определить необходимое обжатие (в см²):

$$F = \frac{N}{Ckv} = \frac{N}{C(1400 - t^\circ) v},$$

где $C_1 = 0,015 C$.

Чтобы иметь возможность легко и быстро оперировать всеми значениями составлена диаграмма (фиг. 64). Из этой диаграммы можно непосредственно получить соответствующие полезной мощности прокатки в 100 л.с., возможное обжатие, удельную деформацию F_f для различных значений при $C=\text{const}$, t° — температуру прокатки и скорость прокатки — v .

Способ применения этой диаграммы показан следующими примерами.

Пример 1. Какое возможно уменьшение сечения в стрельчатом калибре при $N=1200$ л.с. полезной мощности прокатки, $t^\circ=1175^\circ$ и скорости прокатки $v=2,5$ м/сек?

По табл. 6 $C_{\text{max}}=10$, соответственно, $F_f=1,2$ см² (100 л.с.). Безусловно применимое обжатие будет (стр. 82):

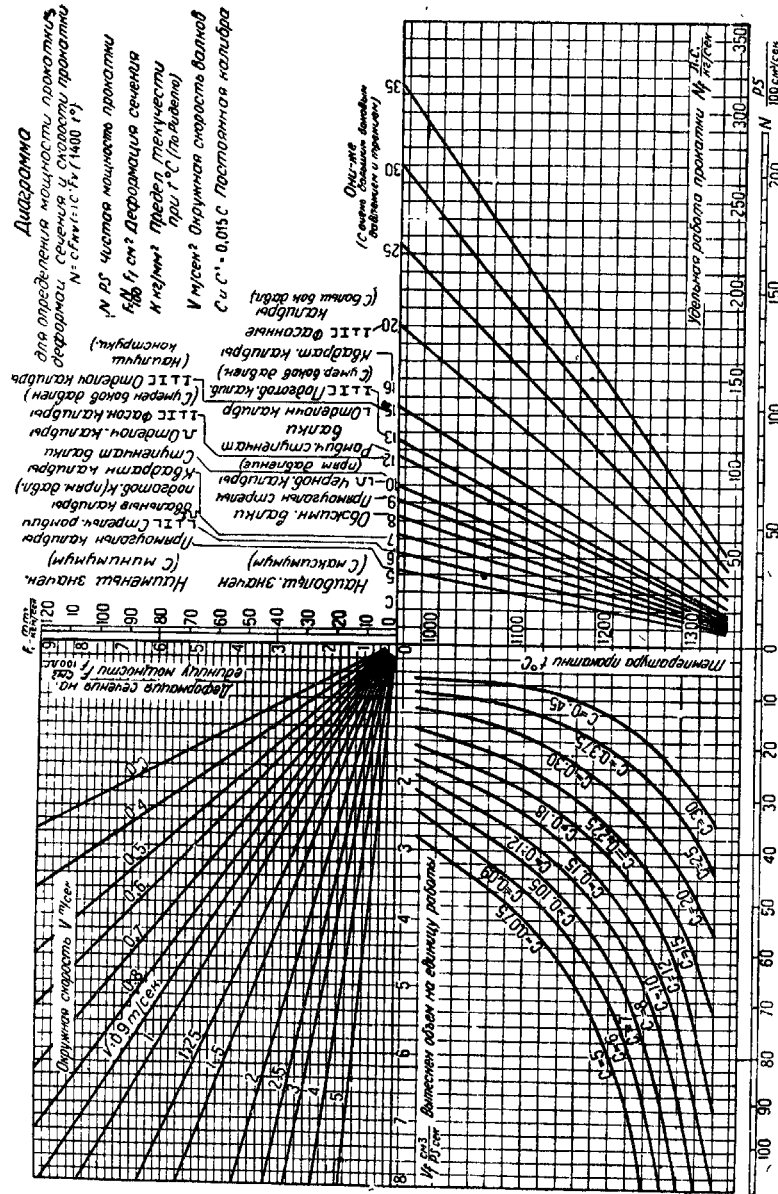
ТАБЛИЦА 6

Значения C для различных калибровок по данным исследований Пуппе

№ по пор.	Род калибров	Значение C		
		Наибольшее	Наименьшее	Среднее
1	Прямоугольные калибры	8	меньше 5	7
2	Ящичные калибры	10		7
3	Стрельчатые калибры	10	6	8
4	Закрытые плоские калибры	10	6	8
5	Овальные калибры	12	6	8
6	Ромбические калибры	12	6	9
7	Пропуск на ребро в ступенчатых валках . .	12	9	10
8	Квадратные калибры	16	6,5	10
9	Угловое железо	{ в первых фасонных калибрах с преимущественно прямым давлением		
		10	7	8
10	Угловое железо	{ в фасонных калибрах с боковым давлением		
		12	9	10
11	Рудничные рельсы	{ в первых фасонных калибрах		
		12	6	8
12	Рудничные рельсы	{ в фасонных калибрах в зависимости от величины бокового давления		
		20	8	12
13	Рельсы	{ в первых фасонных калибрах с преимущественно прямым давлением		
		14	6	10
14	Рельсы	{ в фасонных калибрах с большим боковым давлением		
		20	12	15
15	Ж.-д. шпалы	{ в первых фасонных калибрах с преимущественно прямым давлением		
		10	5,5	8
16	Ж.-д. шпалы	{ в фасонных калибрах с большим боковым давлением		
		25	15	22
17	Балки	{ в первых фасонных калибрах с преимущественно прямым давлением		
		13	6	10
18	Балки	{ в фасонных калибрах с средним боковым давлением		
		20	12	15
19	Балки	{ в фасонных калибрах с сильным боковым давлением и большим трением		
		30	15	20

$$F = \frac{N}{100} \cdot F_f = 14,4 \text{ см}^2,$$

при благоприятных условиях $C_{\min} = 5$; тогда $F = 28,8 \text{ см}^2$.



Фиг. 64. Диаграмма для определения расхода работы при прокатке.

Пример 2. Чему будет равно значение N при помощи которого при $t^\circ = 1010^\circ$ и $v = 2,6 \text{ м/сек}$ в последнем фасонном калибре при прокатке углового железа уменьшение сечения будет равно $2,9 \text{ см}^2$?

При $C_{\max} = 12$; $F_f = 0,55 \text{ см}^2/\text{л. с.}$, следовательно $N_{\max} = \frac{100 F}{F_f} = 530 \text{ л. с.}$ При благоприятных условиях $C_{\min} = 9$, при этом $F_f = 0,75$, $N_{\min} = 400 \text{ л. с.}$

Пример 3. При какой средней скорости возможно при прокатке слитка с $N = 2000 \text{ л. с.}$ и при $t^\circ = 1200^\circ$ достигнуть уменьшения сечения в $F = 64 \text{ см}^2$?

$C_{\max} = 8$ ($C_{\min} = 5$); координаты, соответствующие $F_f = \frac{100 F}{N} = 3,2 \text{ см}^2$ и $t^\circ = 1200^\circ$, пересекаются при

$$C_{\max} = 8 \text{ у значения } v = 1,3 \text{ м/сек,}$$

$$C_{\min} = 5 \text{ у значения } v = 2,1 \text{ м/сек.}$$

Следовательно, при заданных условиях можно хорошо вести прокатку при скорости $v = 1,3 \text{ м/сек}$, при благоприятных условиях эта скорость может быть повышена до $2,1 \text{ м/сек}$. При скорости выше чем $2,1 \text{ м/сек}$ при крепкой стали результат может получиться ненадежным.

Пример 4. Необходимо исследовать расход работы при прокатке двутаврового железа в предпоследнем калибре. При пропуске через испытываемый калибр измеряются измерительными приборами следующие данные:

Счетчик тока. Расход энергии приводным мотором во время пуска $= 1,79 \text{ kWh} = A = 8770 \text{ л. с./сек.}$

Тахограф. Продолжительность пропуска $T = 11,26 \text{ сек}$
Максимальное число оборотов $n_{\max} = 110,9 \text{ об/мин.}$
Наименьшее число оборотов $n_{\min} = 106,5 \text{ "}$
Среднее число оборотов $n_{\text{средн.}} = 108,7 \text{ "}$

Пирометр. Температура на поверхности болванки 1096° .
Прочие размеры и задания:
Длина полосы до пропуска $l = 27,32 \text{ м}$
Уменьшение сечения $F = 4,3 \text{ см}^2$
Мощность холостого хода при $R_{\text{средн.}}$ $N_1 = 144 \text{ л. с.}$

Коэффициент полезного действия мотора при максимальной производительности $\eta = 93\%$.

Момент махового колеса и всех вращающихся частей

$$GD^2 = 1450,000 \text{ кг. м.}$$

Из этих данных определяется отданная мотором средняя мощность

$$N_a = \eta \frac{A}{T} = 0,93 \frac{8770}{11,26} = 725 \text{ л. с.}$$

Отданная маховиком средняя мощность

$$N_L = \frac{GD^2}{4g} \frac{\omega_{\max}^2 - \omega_{\min}^2}{2Z} = \frac{GD^2}{269\,000} n_{\text{средн.}} \frac{n_{\max} - n_{\min}}{T} =$$

$$= \frac{1450}{269} 108,7 \frac{4,4}{11,26} = \dots \dots \dots 229 \text{ л. с.}$$

Общая мощность 954 л. с.
 Мощность холостого хода N_1 144 " "
 Полезная мощность прокатки N 810 " "
 Средняя скорость
 $v = \frac{1}{T} = \frac{27,32}{11,26} = \dots\dots\dots 2,43 \text{ м/сек.}$

По этим данным получаем удельную деформацию

$$F_f = \frac{100 F}{N} = \frac{430}{810} = 0,53 \text{ см}^3/100 \text{ л. с.}$$

Линия, проходящая через это значение (F_f) пересекает линии скоростей при $v=2,43$, что при $t=1096^\circ$ соответствующей гиперболе $C=18$.

Таким образом калибр спроектирован правильно, так как значение C значительно меньше его максимального значения по таблице.

По производственно-экономическим соображениям часто бывает необходимо потребный расход работы относить не к единице времени продолжительности прокатки на данной калибровке, а на единицу веса прокатанной готовой продукции.

Совершенно ясно, что это значение расхода работы будет тем больше, чем меньше сечение прокатываемого готового профиля. Однако, так как эти значения расхода работы зависят не только от качества калибровки, но и от умения рабочих, от степени механизации и других причин, то совершенно понятно, что значения расхода работы, отнесенные к единице веса прокатанной продукции, будут весьма непостоянными, так например, расход энергии на тонну полосового железа колеблется от 50 до 100 kWh.

Проволока, как очень легкий профиль, потребляет около 150 kWh/m, хотя при этом известны значительно более хорошие результаты.

Гопфер⁵⁵ приводит случаи, когда при прокатке проволоки из мягкой стали при 107-кратной вытяжке расход энергии не превышал 75—84 kWh/m и для проволоки из стали с малым содержанием кремния 100—107,5 kWh/m.

**Находятся в производстве и выходят в свет
 в III квартале 1933 г. следующие книги:**

М. М. КАРНАУХОВ

Металлургия стали

Часть I, 20 печ. л.

Г. НОБЛЬ

Бессемеровское производство

Под редакцией акад. М. А. Павлова
 12 печ. л.

В. ХЕЙЛИГЕНШТЕДТ

Регенераторы, рекуператоры и воздухонагреватели

22 печ. л.

Э. Л. РИД

Микрофотография железа и стали

13 печ. л.

Н. А. ШАПОШНИКОВ

Методика механических испытаний металлов

20 печ. л.

КЭМП и ФРЭНСИС

Металлургия чугуна

7 печ. л.

Р. ЛЕВЕР

Модельное дело

15 печ. л.

⁵⁵ Kurt Hopfer, Der Einfluss der Walztemperatur auf die Walzarbeit verschiedener Stähle bei einer Drahtstasse, „Mitt. a. d. K.-W.-Inst. f. Eisenf.“, 1928. 283—299.