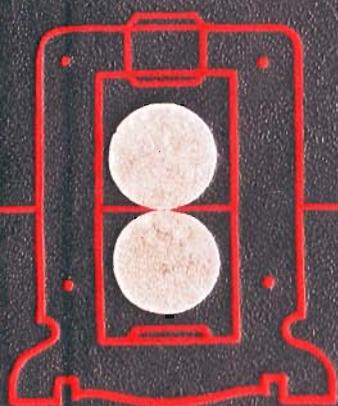


А. П. ЧЕКМАРЕВ , Г. Г. ПОБЕГАЙЛО



ТОЧНАЯ  
ПРОКАТКА  
СОРТОВЫХ  
ПРОФИЛЕЙ

А. П. ЧЕКМАРЕВ, Г. Г. ПОБЕГАЙЛО

# Т О Ч Н А Я ПРОКАТКА СОРТОВЫХ ПРОФИЛЕЙ



ИЗДАТЕЛЬСТВО „МЕТАЛЛУРГИЯ“  
Москва 1968

8-81 С  
94 09

*Handwritten mark or signature*

В книге рассмотрена экономическая эффективность получения проката точных размеров на сортовых станах, а также влияние основных факторов (температура прокатываемых полос, износ калибров, межклетевое натяжение, давление металла на валки, жесткость рабочих клеток и других) на точность проката.

Приведены результаты экспериментальных исследований упругой деформации рабочих клеток и точности размеров прокатываемых профилей. Изложены методы расчета жесткости предварительно напряженных клеток и допускаемых отклонений размеров проката с учетом технологии процесса и конструктивных особенностей стана. Рассмотрены современные конструкции жестких прокатных клеток и даны рекомендации по повышению точности прокатки на действующих станах. Илл. 111. Табл. 31. Библ. 99 назв.



ЧЕКМАРЕВ Александр Петрович  
ПОБЕГАЙЛО Григорий Гаврилович

**ТОЧНАЯ ПРОКАТКА СОРТОВЫХ ПРОФИЛЕЙ**

Редактор издательства Б. А. Прудковский. | Технический редактор М. Р. Клейнман  
Переплет художника Ю. Н. Степанова

Сдано в производство 1/II 1968 г. Подписано в печать 25/VI 1968 г.  
Бумага № 2 типографская, 60×90<sup>1/16</sup> = 7,38 бум. л. = 14,75 печ. л.  
Уч.-изд. л. 14,30 Изд. № 4952. Цена 82 коп.  
Т-09145 Тираж 2 500 экз. Заказ 93.

Издательство «Металлургия». Москва, Г-34, 2-й Обыденский пер., 14  
Подольская типография Главполиграфпрома Комитета по печати  
при Совете Министров СССР  
г. Подольск, ул. Кирова, д. 25

3-12-3  
90-68

**ОГЛАВЛЕНИЕ**

Введение . . . . .	4
<b>Глава I. Экономическая эффективность получения проката точных размеров</b>	
Допускаемые отклонения от геометрических размеров проката и возможности их снижения . . . . .	7
Экономичные профили проката . . . . .	10
Калибрование горячекатаных профилей . . . . .	15
Эффективность точной прокатки на сортовых станах . . . . .	20
<b>Глава II. Факторы, влияющие на точность размеров проката</b>	
Расчет минимального поля допусков . . . . .	24
Жесткость рабочих клеток . . . . .	29
Температура прокатки и рабочих валков . . . . .	31
Износ валков и деталей клетки . . . . .	36
Давление металла на валки . . . . .	40
Межклетевое натяжение металла . . . . .	48
<b>Глава III. Упругая деформация прокатной клетки</b>	
Допускаемая упругая деформация клетки . . . . .	52
Методы определения упругой деформации . . . . .	59
Расчет упругой деформации прокатной клетки . . . . .	62
Экспериментальное исследование упругой деформации прокатных клеток . . . . .	67
<b>Глава IV. Исследование точности размеров проката</b>	
Катанка . . . . .	87
Круглая сталь . . . . .	93
Квадратная сталь . . . . .	97
Полосовая сталь . . . . .	98
Шпаловая сталь . . . . .	100
<b>Глава V. Новые конструкции прокатных клеток</b>	
Тенденции в развитии конструкций клеток . . . . .	104
Клетки с предварительно сжатыми подушками . . . . .	111
Клетки с предварительно сжатыми валками . . . . .	125
Расчет профиля валков предварительно напряженной клетки . . . . .	139
Клетки с подвижными опорными буртами валков . . . . .	147
Ненапряженные прокатные клетки . . . . .	150
<b>Глава VI. Применение жестких клеток</b>	
Линейные проволочные станы . . . . .	163
Линейные сортовые станы . . . . .	167
Возможности повышения качества проката на непрерывных станах . . . . .	175
<b>Глава VII. Измерение и автоматическое регулирование размеров проката</b>	
Измерение сортовых профилей . . . . .	186
Измерение межклетевого натяжения . . . . .	195
Измерение скорости прокатки . . . . .	208
Автоматическая настройка клеток . . . . .	218
Литература . . . . .	233

## ВВЕДЕНИЕ

Одна из основных задач развития прокатного производства — обеспечение максимальной экономии металла за счет снижения отходов на переделах, уменьшения допусков на размеры прокатной продукции и расширения выпуска экономичных профилей. Для решения этой задачи, наряду с улучшением технологических процессов, оснащением строящихся станов новейшим оборудованием и аппаратурой, необходимо усовершенствовать действующие прокатные станы, приблизив их по техническому уровню к современным.

В настоящее время на металлургических заводах страны работает много устаревших сортовых и проволочных станов, не обеспечивающих получение проката точных размеров. На ряде сортовых станов невозможно получить тонкостенные экономичные профили с толщиной стенки 2—3 мм. Поэтому освоение производства облегченных балок, швеллеров, уголков, зетовых шпунтов и других фасонных профилей ведется крайне медленно.

Проблема получения точных и экономичных профилей проката приобрела в настоящее время серьезное народнохозяйственное значение. Как показала практика работы ряда металлургических заводов, значительного экономического эффекта можно достигнуть на тех станах, где получают прокат повышенной точности. Если бы на действующих станах удалось получить прокат с допусками, уменьшенными в два раза, это дало бы народному хозяйству дополнительно около 1 млн. т металла в год. Целесообразность производства облегченных профилей проката подтверждена экономическими показателями работы действующих станов. Так, например, сравнительные данные работы сортовых станов металлургического завода им. Дзержинского при прокатке облегченных и обычных профилей свидетельствует о том, что с переходом на прокатку облегченных швеллеров и уголков производительность станов 500, 330 и 280 повысилась на 3—7%, а себестоимость всех облегченных профилей снизилась по сравнению с обычными на 2—11%.

Прокатку фасонных и сортовых профилей по суженным допускам трудно осуществить на станах, рабочие клетки которых имеют значительную упругую деформацию. Поэтому для улучшения условий производства проката точных размеров необходимо модернизировать существующее оборудование непрерывных и линейных станов. При этом в первую очередь следует установить жесткие отделочные клетки, устройства для калибрования проката и другие средства, обеспечивающие повышение точности. Замена устаревших чистовых и предчистовых клеток новыми клетями повышенной жесткости с использованием современных подшипников, универсальных шпинделей, роликовой проводковой арматуры позволит повысить точность проката, внедрить многониточную прокатку и увеличить производительность станов. Новые клетки и устройства для калибрования целесообразно установить и на тех линейных станах, которые будут реконструированы для производства специальных профилей проката из легированных марок стали.

Развитие прокатного производства, характеризующееся высокими скоростями прокатки и возросшими требованиями к точности готовой продукции, вызывает необходимость дальнейшего совершенствования измерительных и регулирующих устройств. Вопросам автоматизации настройки рабочих клеток сортовых станов пока не уделяется должного внимания. Разработка автоматически действующих приборов для контроля толщины и межклетевого натяжения проката ведется преимущественно в области листового производства. Основная же часть прокатной продукции — сортовой прокат — не контролируется в потоке станом, что приводит к большим потерям металла. Отсутствие надежных бесконтактных измерителей геометрических размеров профилей проката, скорости прокатки, межклетевого натяжения металла и величины зазора между рабочими валками не позволяет осуществить автоматическую настройку сортовых станом в широких масштабах.

Несмотря на очевидную целесообразность повышения точности проката и увеличения выпуска экономичных профилей, работы по замене устаревшего оборудования сортовых станом и оснащению их измерительной аппаратурой ведутся недостаточно интенсивно. Мы не имеем отработанных в промышленных условиях конструкций жестких рабочих клеток и устройств для калибрования проката в горячем состоянии в потоке сортовых станом. Это объясняется прежде всего отсутствием широких теоретических и экспериментальных исследований в области точной прокатки сортового металла.

В технической литературе не освещены в достаточной мере вопросы, связанные с расчетом допускаемых отклонений размеров проката, измерением натяжения металла, определением упругих деформаций сортопрокатных клеток, выбором оборудования для точной прокатки и должным его расположением на станах.

Следует отметить, что отсутствие специального координирующего органа и необходимого контроля приводит к тому, что работы в области точной прокатки сорта ведутся разрозненно. Разработки жестких клетей и устройств для калибрования не включаются в планы проектных организаций, а машиностроительные заводы, специализирующиеся на изготовлении прокатного оборудования, мало уделяют внимания вопросам жесткости конструкций. Решение этих вопросов будет способствовать совершенствованию техники и технологии прокатного производства, улучшению качества проката и повышению производительности сортовых станов.

В настоящей работе рассмотрены факторы, влияющие на точность сортового проката, приведены результаты экспериментальных исследований упругих деформаций рабочих клетей. Дан анализ известных конструкций жестких рабочих клетей и предложены варианты их установки на сортовых и проволочных станах. Освещены некоторые вопросы теории допусков на прокат, расчета жесткости напряженных клетей с предварительно сжатыми подушками и валками, а также даны рекомендации по улучшению качества проката на действующих станах.

# Глава I

## ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПОЛУЧЕНИЯ ПРОКАТА ТОЧНЫХ РАЗМЕРОВ

### ДОПУСКАЕМЫЕ ОТКЛОНЕНИЯ ОТ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ ПРОКАТА И ВОЗМОЖНОСТИ ИХ СНИЖЕНИЯ

Получение проката требуемой формы, точных размеров и массы является одним из основных направлений развития современного прокатного производства. Прокатка сортовых профилей с отклонением от номинальных размеров даже в пределах плюсовых допусков приводит к заметному перерасходу металла. Предусмотренные ГОСТом отклонения размеров проката допускают значительную разницу в массе одного метра профиля. Так, разница в массе профиля, прокатанного на верхнем и нижнем пре-

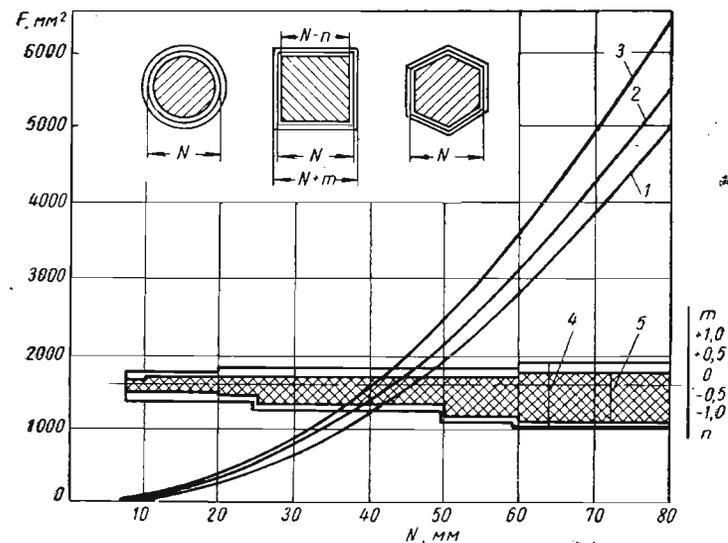


Рис. 1. Изменение поля допусков и площади поперечного сечения в зависимости от размеров профиля:

1 — круг; 2 — шестигранник; 3 — квадрат; 4 — при обычной точности прокатки; 5 — при повышенной точности прокатки;  $N$  — номинальный размер профиля;  $m$  — плюсовой допуск;  $n$  — минусовой допуск;  $F$  — площадь поперечного сечения

делах поля допусков, составляет для катанки 36%, для угловой стали 50×50×5 мм — 31%, для круга 10 мм — 17%, для круга 60 мм — 5,5%. Кроме того, при одних и тех же номинальных размерах и допускаемых отклонениях сортового проката масса единицы длины профиля неодинакова. Это можно видеть из данных, приведенных на рис. 1. Из рисунка следует, что колебания площади поперечного сечения, а следовательно, и масса единицы длины квадрата больше, чем шестигранника и круга.

Для уменьшения расхода металла на единицу длины проката государственными стандартами предусмотрено снижение поля допусков сортовых профилей. В новых стандартах на прокат черных металлов плюсовые допуски значительно снижены, а минусовые — выше плюсовых. Так, например, по ГОСТ 2590—57 плюсовые допуски на горячекатаную сталь круглого профиля

Таблица 1

Допускаемые отклонения на мелкосортную круглую сталь по данным отечественных и зарубежных стандартов

Номинальный диаметр, мм	Допускаемые отклонения, мм						
	ГОСТ 2590—57 СССР при точности прокатки		425510—56 ЧССР	США*	DIN 1013—57 ФРГ	SIS 1013—57 Швеция	JIS 3104—58 Япония
	обычной	повышенной					
5—6	+0,3	+0,1	+0,3	±0,13	±0,4	±0,5	±0,3
6—8	—0,5	—0,3	—0,5				
8—9							
10—11				±0,15	±0,5	±0,5	±0,3
11—15	+0,3	+0,2	+0,3				
15—16	—0,5	—0,3	—0,5	±0,18	±0,5	±0,5	±0,3
16—19							
20—22	+0,4	+0,2	+0,4	±0,20	±0,5	±0,5	±0,4
22—25	—0,5	—0,4	—0,5	±0,23			
26—28				±0,26			
28—32	+0,4	+0,2	+0,5	±0,28	±0,6	±0,8	±0,5
32—35	—0,7	—0,6	—0,75	±0,30			
35—38				±0,35	±0,8		

\* По данным американских журналов.

снижены по сравнению с ранее действовавшими стандартами на 25—35%.

Новые уменьшенные допуски на сортовой прокат в ряде случаев уже допусков, имеющихся в зарубежных стандартах. Кроме того, в отечественных стандартах установлены допуски при обычной и повышенной точности прокатки (табл. 1).

Для легированной конструкционной стали плюсовые допуски снижены так же, как для углеродистой стали. Исключение составляет инструментальная сталь, которую прокатывают только «на плюс» [1].

При несимметричном расположении поля допусков, когда прокатку ведут «на минус», происходит уменьшение средних размеров профиля, что является как бы снижением номинала. Так как при меньшем поперечном сечении профиля увеличиваются рабочие напряжения, то с точки зрения экономии металла заведомое увеличение допускаемых напряжений равнозначно прокатке «на минус». Учитывая, что при введении новых допускаемых напряжений организационные и материальные затраты, например перекалибровка валков, значительно меньше, чем при изменении системы расположения поля допусков, некоторые исследователи считают введение указанной системы допусков нерациональным. Экономия металла должна быть достигнута в результате сужения общего поля допусков при одинаковых положительных и отрицательных допусках [2].

Опыт работы зарубежных прокатных станков показал, что стандарты на точный прокат отстают от требований промышленности. В связи с этим мелкосортную сталь в Швеции, ФРГ и других странах выпускают с допусками ±0,15 мм. Прокат точных размеров получают с использованием жестких конструкций рабочих клетей и автоматизацией процесса прокатки.

Новыми отечественными стандартами на фасонный прокат предусмотрено уменьшение ширины полок балок и швеллеров до № 16 включительно. Для экономии металла введены дополнительные литерные размеры балок и швеллеров с повышенной несущей способностью. В облегченных балках значительно уменьшена толщина стенки и полок. Одновременно несколько увеличена ширина полок больших номеров для увеличения их жесткости. Аналогичные изменения внесены в сортамент швеллеров. В результате получено среднее снижение массы балок на 21% и швеллеров на 15%.

До настоящего времени величину допускаемых отклонений размеров проката устанавливают на основании данных работы действующих станков, многие из которых конструктивно устарели и не обеспечивают получение профиля необходимой точности. С ростом требований к точности проката проводят изучение причин, влияющих на размеры профиля, совершенствуют технологию процесса и улучшают прокатное оборудование. Исследованиями установлено, что колебания размеров проката имеют перио-

дический, а также равномерно нарастающий характер. Периодические колебания размеров связаны с изменяющейся по величине деформацией рабочей клетки, которая находится под переменной нагрузкой. Основные причины постепенно нарастающего изменения размеров проката обусловлены износом (рабочей поверхности калибров и подшипников).

Изменение давления, действующего на рабочие валки, происходит от колебания температуры прокатываемого металла, неоднородности его химического состава и структуры, непостоянства размеров задаваемой заготовки, натяжения полосы между клетями, количества одновременно прокатываемых полос и других факторов. Полностью устранить колебания давления металла на валки практически невозможно, а следовательно, невозможно устранить колебания упругой деформации клетки. Кроме того, действительные размеры прокатываемого профиля зависят от точности размеров чистового калибра, правильности учета степени его заполнения и величины усадки при остывании металла. Существенное влияние на точность проката оказывает и температура прокатных валков.

В результате влияния многочисленных факторов часть поля допусков не используется при настройке стана. Поэтому общую величину допуска можно разделить на область потерь и область регулировок [3]. Область потерь — это колебания размеров профиля, которые невозможно регулировать; область регулировки — часть допуска, в пределах которой можно регулировать положения валков с целью получения необходимых размеров. Эту часть допуска определяют как

$$D_n = D_p - D_1 - D_2 - D_3 - D_4 - D_5 - D_6, \quad (1)$$

где  $D_n$  — допуск, который может быть использован;

$D_p$  — разрешенный допуск по ГОСТу;

$D_1$  — потеря допуска, связанная с ошибками калибровки;

$D_2$  — потеря допуска из-за неточности расточки валков;

$D_3$  — потеря допуска, связанная с деформацией деталей стана;

$D_4$  — потеря допуска из-за колебаний температуры прокатываемого металла и деталей стана;

$D_5$  — потеря допуска, вызываемая износом деталей стана;

$D_6$  — потеря допуска, связанная с неточностью замеров.

Из выражения (1) следует, что чем выше жесткость рабочих клетей и чем совершенней технология прокатки, тем шире область регулировки при настройке стана.

#### ЭКОНОМИЧНЫЕ ПРОФИЛИ ПРОКАТА

К экономичным профилям относятся облегченные фасонные профили, специальные тонкостенные профили и периодические профили, получаемые продольной и поперечновинтовой прокаткой.

В Советском Союзе сортовой и фасонный прокат используют в больших количествах (табл. 2). Поэтому уменьшение массы и повышение точности прокатных изделий позволяет сэкономить миллионы тонн металла.

Таблица 2

Динамика потребления профильного проката в СССР [4]

Вид проката	Доля в общем объеме проката по годам, %					
	1940	1950	1955	1960	1963	1965
Рельсы железнодорожные . . . . .	11,6	10,0	9,1	5,4	5,0	4,4
Балки и швеллеры . . . . .	4,5	7,8	6,5	5,7	4,8	4,5
Крупный и средний сорт . . . . .	—	27,9	26,3	26,0	25,3	25,0
Мелкий сорт . . . . .	6,3	7,8	9,1	10,0	9,6	9,4
Катанка . . . . .	5,4	6,1	7,1	8,2	8,2	8,2
Осевая и кузнечная заготовка . . . . .	1,8	1,7	1,3	0,9	0,7	0,6
Колеса и бандажы . . . . .	2,2	2,2	1,3	1,3	1,1	1,0
Трубная заготовка . . . . .	—	5,5	5,5	6,3	6,3	6,4
Сортовые штрипсы . . . . .	—	3,3	2,3	1,8	1,3	2,2

Существенным резервом экономии металла является улучшение сортамента проката по видам, профилям и размерам. Благодаря более совершенной структуре сортамента можно уменьшить расход металла на единицу изделия. Важное значение при этом имеет увеличение доли сортового проката повышенной точности. Для машин и строительных конструкций часто применяют металл большего сечения или толщины, чем это необходимо по расчету, так как существующая градация сортамента не позволяет использовать профиль меньшего размера. Так, например, круглую и квадратную мелкосортную сталь поставляют через 1 мм, среднесортную — через 2 мм, а крупносортную с интервалом до 10 мм.

Допуски для круглой и квадратной стали составляют 4—12% по диаметру или стороне квадрата.

Сопоставление размерных рядов простых профилей проката по стандартам СССР и ФРГ показывает, что при существующем интервале размеров круглой стали от 5 до 250 мм и от 5 до 220 мм число размеров по ГОСТ 2590—57 и DIN 1013 составляет соответственно 63 и 123. По указанному ГОСТу дробность размеров через 0,5 мм предусмотрена только в диапазоне до 7 мм, а по DIN до 29 мм; дробность через 1 мм предусмотрена соответственно от 8 до 26 мм и от 30 до 60 мм [5].

Производство экономичных профилей — облегченных фасонных, специальных тонкостенных и периодических — постоянно возрастает [6]. Однако, несмотря на определенные достижения, спрос на экономичные профили значительно опережает их выпуск.

Оценку экономичности профилей производят, сопоставляя удельные моменты сопротивления изгибу:

$$\omega = \frac{W}{\sqrt{F^3}}, \quad (2)$$

где  $\omega$  — удельный момент сопротивления;  
 $W$  — момент сопротивления изгибу,  $\text{см}^3$ ;  
 $F$  — площадь сечения профиля,  $\text{см}^2$ .

Из уравнения (2) следует, что форма и размеры сечения оказывают большое влияние на показатель экономичности профиля.

Чем больше величина удельного момента сопротивления, тем рациональнее профиль при работе на изгиб, что позволяет сравнивать профили различной формы независимо от их размеров и оценивать их рациональность по расходу металла (рис. 2).

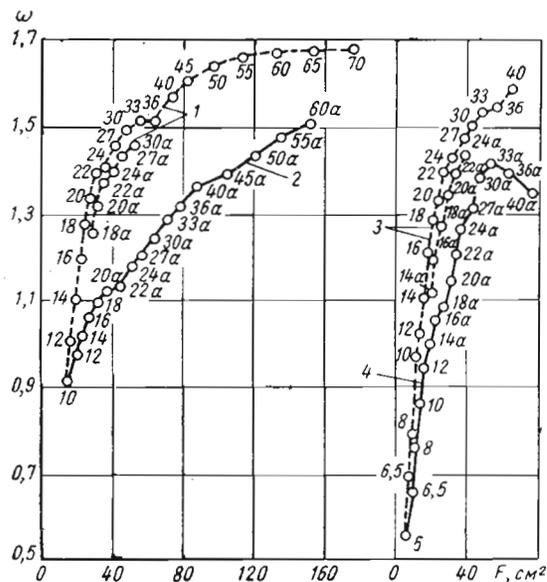


Рис. 2. Удельные моменты сопротивления изгибу  $\omega$  и площади сечения  $F$  двутавровых балок и швеллеров по новым и старым стандартам:

1 — двутавровые балки; по ГОСТ 8239—56; 2 — то же, по ОСТ 16—39; 3 — швеллеры по ГОСТ 8240—56; 4 — то же, по ОСТ 10017—39. Цифры на кривых — номера балок и швеллеров

Величину перерасхода металла при использовании профиля с удельным показателем  $\omega_1$  вместо профиля с показателем  $\omega_2$  можно определить по формуле [7]:

$$\Delta_{\text{п}} = 100 \left[ \sqrt{\left( \frac{\omega_2}{\omega_1} \right)^2 - 1} \right], \quad (3)$$

где  $\Delta_{\text{п}}$  — перерасход металла, %.

Величины удельных моментов сопротивления зависят от соотношения размеров профиля. Удельные размеры для двутавровых балок и швеллеров определяют следующим образом [8]:  
 удельная толщина стенки

$$m_c = \frac{d}{h};$$

удельная толщина полки

$$m_{\text{п}} = \frac{t}{b};$$

удельная площадь стенки

$$\alpha = \frac{F_c}{F},$$

где  $d$  и  $h$  — толщина и высота стенки;

$t$  и  $b$  — толщина и ширина полки;

$F_c$  и  $F$  — площадь стенки и полная площадь сечения.

Расчеты показывают, что максимальная экономия металла будет при минимальных значениях удельной толщины элементов профиля и удельной площади стенки  $\alpha = 0,5$ .

На рис. 3 представлены освоенные нашими заводами облегченные профили специального назначения. Экономия металла,

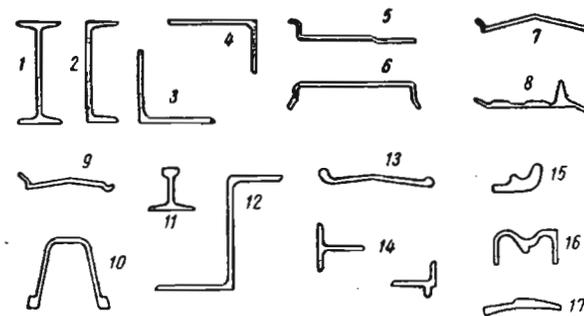


Рис. 3. Экономичные профили, прокатка которых освоена металлургическими заводами:

1 — балки двутавровые; 2 — швеллеры; 3 — уголки равнобокие; 4 — уголки неравнобокие; 5 — обод 10 ОРГ-20; 6 — автообод МАЗ-502; 7 — автообод МАЗ-200; 8 — тракторный башмак; 9 — автоободы ГАЗ-51 и ЗИЛ-164; 10 — стойка; 11 — вагонная стойка; 12 — зетовая сталь; 13 — петля ЗИЛ-164; 14 — оконнорамные профили; 15 — бортовое кольцо колеса автомобиля; 16 — корытный профиль; 17 — лемешная полка

вызванная улучшением формы и более совершенной градацией облегченных профилей, составляет для двутавровых балок  $\sim 13,5\%$  и для швеллеров  $\sim 10,5\%$ . Уменьшение толщины стенки мелких тавровых профилей для оконных и фонарных переплетов промышленных зданий дало до  $20\%$  экономии металла.

Толщина элементов нового профиля облегченной зетовой балки уменьшена по сравнению со старым профилем на 18%, изготовление этого профиля из стали 09Г2Д вместо стали Ст.3кп повысило несущую способность балки на 25,3%. Облегченный профиль бортового кольца колеса автомобиля легче обычного бортового кольца на 18,6%.

Применение корытного профиля КСП-630 для боковины секции скребкового конвейера позволяет использовать вместо двух профилей один и уменьшить расход металла на 30%. Значительно сокращена масса и других профилей. Характеристика некоторых периодических профилей, получивших широкое распространение, приведена в табл. 3.

Таблица 3

Характеристика периодических профилей

Заготовка	Длина кратности	Ширина профиля	Толщина профиля, мм		Количество участков на одной кратности	
			максимальная	минимальная	постоянного сечения	переменного сечения
Передняя ось автомобиля ЗИЛ-150	1420	83	86	68/16	7	6
Передняя ось автомобиля ЗИЛ-355М	1286	76	79	64/14	7	6
Задняя ось пароконной повозки	1620	50	50	40/9	5	4
Передняя ось пароконной повозки	1620	50	50	40/9	7	6
Передняя ось автомобиля ГАЗ-51	1320	70	70	53/8	7	6
Передняя ось автоприцепа «Ирбитская»	1812	73	65	65/8	5	4
Передняя ось автоприцепа «Ишимская»	1940	82	82	80/17	5	4
Коленчатый вал автомобиля М-20	607	95—125	95	45	4	3
Коленчатый вал трактора ДТ-54	545	80—120	100	40*	3	2
Распределительный вал трактора	1260	60—90	80	30*	5	4
Распределительный вал автомобиля ЗИЛ-150	885	60—69	55	25*	5	4

\* Форма сечения овальная, в остальных случаях балочная

Для производства экономичных периодических профилей следует наряду со строительством новых станов модернизировать существующие станы небольшой производительности. В США, например, количество линейных станов мощностью 100—150 тыс. т в год составляет 30—40% от общего числа прокатных станов, а объем их продукции в общем выпуске проката не превышает 1—2%. Целесообразно на линейных станах методом холодной прокатки освоить выпуск тонкостенных экономичных профилей специального назначения.

Технико-экономическими расчетами, выполненными ЦНИИЧМ и ВНИИОЧМ, установлено, что включение в сортамент проката 230 новых экономичных профилей массой ~1 млн. т может дать экономию металла ~200 тыс. т и денежную экономию в размере 30 млн. руб. [4].

#### КАЛИБРОВАНИЕ ГОРЯЧЕКАТАНЫХ ПРОФИЛЕЙ

Калиброванную сталь (круги, квадраты, шестигранники и другие профили толщиной от 6 до 100 мм) получают главным образом холодным волочением из проката. Калиброванная сталь

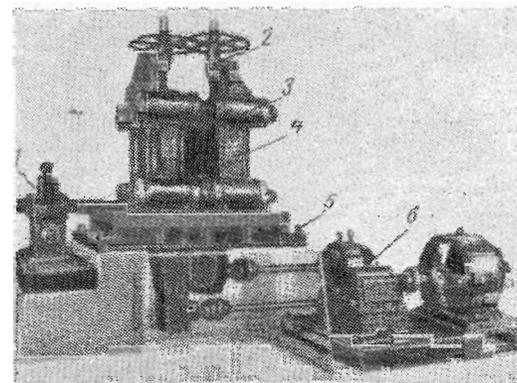


Рис. 4. Калибрующая клетка с вертикальными валками:

1 — механизм горизонтального перемещения клетки; 2 — механизм вертикального перемещения валков; 3 — винтовое устройство для установки валков; 4 — станина; 5 — плитовина; 6 — привод валков

отличается от горячекатаной более точными размерами и повышенными механическими свойствами, что позволяет использовать ее в машиностроении без дополнительной механической обработки. Применение калиброванной стали взамен горячекатаной дает снижение расхода металла на 10—30% [13].

Производство калиброванной стали в СССР растет и составляет примерно 5% по отношению к производству горячекатаной.

Помимо холодного волочения калиброванную сталь можно получить более дешевым способом — горячей прокаткой.

При горячей прокатке калиброванной стали за чистовой клетью стана устанавливают специальные калибрующие ролики или дополнительную клетку. Приводные калибрующие ролики на задней стороне клетки установлены, например, на проволочном стане завода КНР. Привод двух пар вертикальных роликов осуществлен через ременную передачу от горизонтальных валков. Две пары вертикальных роликов позволяют производить небольшое обжатие полосы и получать точный профиль катанки.

В США работают прокатные станы с прецизионными калибрующими клетями. Фирмой Makintosh построен сортовой стан 300, предназначенный для прокатки круга диаметром 9,5—38 мм

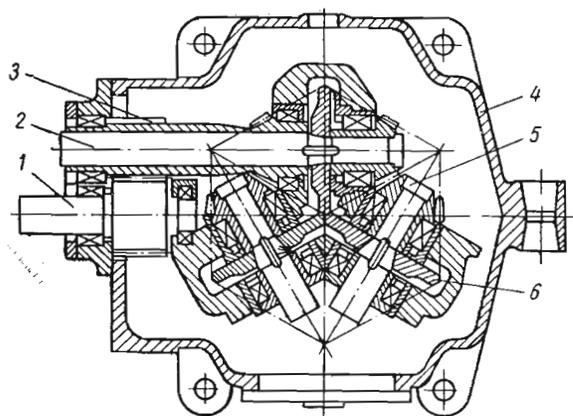


Рис. 5. Трехвалковая клеть:  
1 — приводной вал — шестерня; 2 — промежуточный вал;  
3 — промежуточная шестерня; 4 — корпус клетки; 5 — ось валка; 6 — рабочий диск валка

в пределах допусков холодного волочения [9]. На этом стане за последней чистовой клетью установлена специальная клеть (рис. 4), имеющая приводные вертикальные валки диаметром 304 мм при длине бочки 380 мм. Подшипники валков вмонтированы в стальные подушки, которые могут перемещаться по вертикали относительно литых станин. Расстояние между станинами, а следовательно, и между валками регулируется винтовыми устройствами, гайки которых расположены с обеих сторон клетки. Клеть установлена на плитовинах и при настройке стана перемещается в горизонтальном направлении отдельным механизмом. Рабочие валки соединены с двигателем постоянного тока мощностью 73,5 квт (100 л. с.) через шестеренную клеть и коническую передачу.

На других станах за чистовыми клетями установлены добавочные клетки с двумя парами приводных горизонтальных и вертикальных валков.

Для получения точных размеров катанки диаметром 5—10 мм западногерманская фирма «Kocks» разработала новую непрерывную группу проволочного стана, состоящую из 13 трехвалковых клеток. Прокатку в чистовой группе ведут в одну нитку без кантовки и с минимальным натяжением металла. Отклонения размеров готового проката составляют  $\pm 0,1$  мм при овальности 0,1 мм. Среднечасовая производительность стана для катанки диаметром 5 мм достигает 15 т. Максимальная скорость прокат-

ки 30 м/сек [10, 11]. Рабочие клетки чистовой группы сконструированы отдельными блоками. Смена всех клеток производится одновременно в течение 5—10 мин.

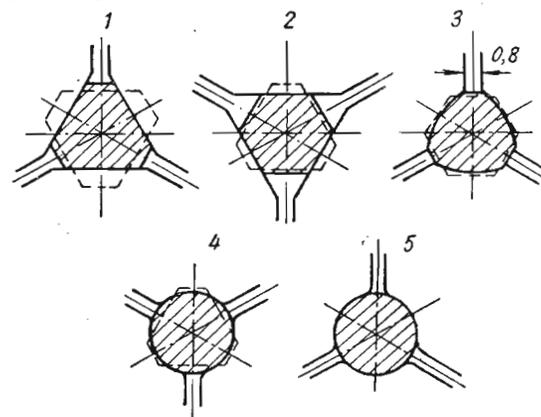


Рис. 6. Схема калибровки в трехвалковых клетях:

1 — неправильный шестигранник; 2 — правильный шестигранник; 3 — черновой круг; 4 — предчистовой круг; 5 — чистовой круг. Пунктиром обозначена конфигурация входящего профиля

Рабочая клеть (рис. 5) выполнена в виде кассеты закрытого типа, в которой установлены составные валки под углом  $120^\circ$  друг к другу. Калибр образуется тремя дисками диаметром 290 мм, регулировка которых невозможна ни в осевом, ни в радиальном направлениях. Диски валков укреплены на вставных осях, опирающихся на роликовые подшипники. Благодаря применению трех валков и повороту клеток на  $180^\circ$  относительно друг друга прокатываемая заготовка не требует кантовки.

Схема деформации металла в трехвалковых клетях показана на рис. 6. Диски валков калибруют таким образом, чтобы между натяжения было небольшое натяжение металла ( $\sim 1\%$ ). Своеобразная калибровка валков чистовой группы стана (рис. 7) позволяет

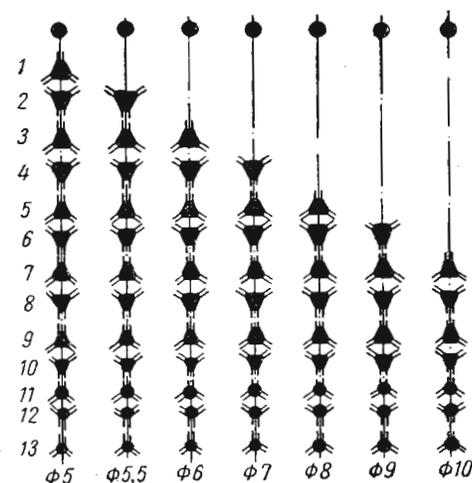


Рис. 7. Схема калибровки валков 13-клетевой чистовой проволочной группы. Диаметр подката 16 мм



вести прокатку круглого профиля диаметром от 5 до 10 мм из одной и той же заготовки. Обжатия составляют: в первом проходе 12%, во втором — девятом проходах 23%. В десятом проходе происходит переход от неправильного шестигранника к равностороннему при обжатии 8%. Затем равносторонний шестигранник задается в калибр с вогнутыми стенками. Обжатие в этом проходе составляет 6%. В 12 и 13 проходах обжатие уменьшается до 3—4% и профиль приобретает форму чистового круга. Чистовая прокатка катанки всех размеров ведется в 11—13 клетях. При переходе на ближайший больший размер число клетей уменьшается на одну.

К преимуществам трехвалковых клетей следует отнести их компактность, простоту в обслуживании (нет регулировки валков), незначительное время смены клетей, а также возможность их использования на существующих станах для получения проката точных размеров.

Весьма перспективно получение профилей в потоке непрерывных сортовых станов с отклонениями размеров, соответствующими отклонениям калиброванной стали по 4—5-му классу точности (табл. 4). Непрерывные мелкосортные станы — самые

Таблица 4

Допускаемые отклонения (мм) по диаметру круглой горячекатаной и калиброванной стали

Диаметр, мм	Горячекатаная (ГОСТ 2590—57) при точности проката		Калиброванная (ГОСТ 7417—57) для класса точности	
	обычной	повышенной	4	5
10—18	+0,3 -0,5	+0,2 -0,3	-0,12	-0,24
18,5—19,0	+0,3 -0,5	+0,2 -0,3	-0,14	-0,28
20—25	+0,4 -0,5	+0,2 -0,4	-0,14	-0,28
26—30	+0,4 -0,7	+0,2 -0,6	-0,14	-0,28
31,5—48	+0,4 -0,7	+0,2 -0,6	-0,17	-0,34
50	+0,4 -1,0	+0,2 -1,0	-0,17	-0,34

совершенные и высокопроизводительные станы, работающие в настоящее время. Значительную долю сортамента этих станов составляет круглая сталь в прутках и в бунтах диаметром 10—

30 мм. Специализация непрерывных мелкосортных станов на металлургических заводах МЧМ УССР позволила отработать технологию, квалифицированно вести настройку клетей, улучшить качество готовой продукции и достигнуть устойчивой работы агрегатов при прокатке круглой стали диаметром 10—14 мм со скоростью 15 м/сек [12]. Однако износ калибров чугунных

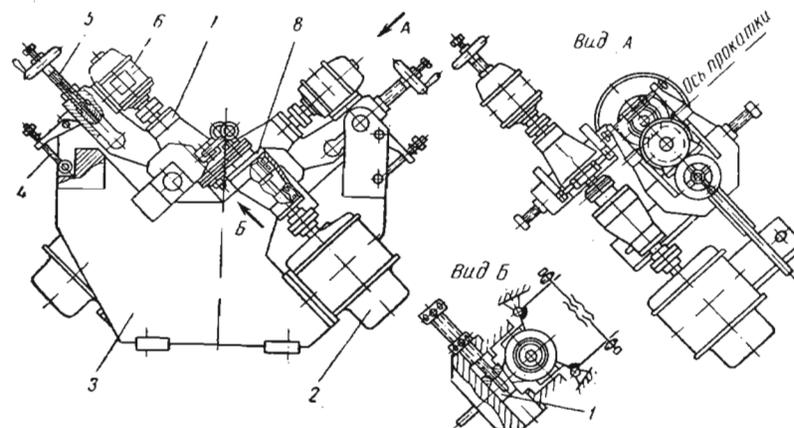


Рис. 8. Калибрующее устройство:

1 — механизм установки нижнего вала; 2 — главный электродвигатель; 3 — станция; 4 — прижимное устройство; 5 — механизм осевой регулировки; 6 — разгонный электродвигатель; 7 — узел нижнего вала; 8 — узел верхнего вала

валков и колебания упругой деформации рабочих клетей снижают точность и искажают геометрические размеры профиля.

Исследования, проведенные на мелкосортных непрерывных станах 250 металлургического завода «Криворожсталь» и на линейных станах 250 и 350 Донецкого металлургического завода, показали, что наибольшая выработка чистового калибра происходит по его «плечам», т. е. под углом 45° к оси рабочих валков. Поэтому диаметр чистового круга по диагонали больше горизонтального и вертикального диаметров.

Чтобы получить правильную геометрическую форму и точные размеры готового круга, целесообразно производить калибрование перед холодильником. С этой целью Институт черной металлургии совместно с металлургическим заводом «Криворожсталь» разработал устройство для горячего калибрования круглых профилей в потоке непрерывных мелкосортных станов.

Калибрующее устройство (рис. 8) состоит из двух пар рабочих валков, расположенных под углом 45° к горизонту. Привод валков осуществляется от индивидуальных электродвигателей постоянного тока. Один из валков каждой пары является холостым и в момент захвата полосы, во избежание пробуксовки, приводится в движение «разгонным» двигателем. Консольно

расположенные валки имеют сменные кольца диаметром 180 мм, изготовленные из специальной износостойкой стали. Устройство для калибрования снабжено установочным механизмом настройки валков и роликовой проводковой арматурой.

На схеме калибровки валков (рис. 9) видно, что направление деформации металла в валках устройства не совпадает с направлением деформации в предыдущих клетях стана. Деформация металла рабочими валками устройства для калибрования происходит в направлении диагоналей чистового круга, что дает

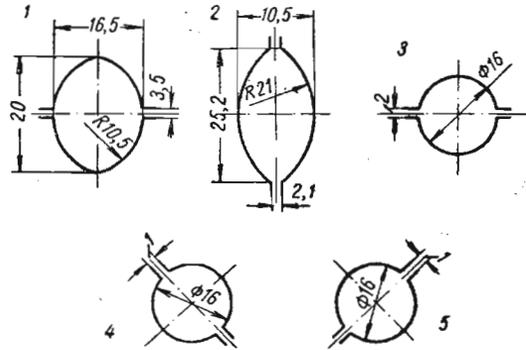


Рис. 9. Схема калибровки валков трех последних клетей чистовой группы непрерывного стана 250 и калибрующего устройства:  
1 — предчистовой круг; 2 — предчистовой овал;  
3 — чистовой круг; 4, 5 — чистовые круги калибрующего устройства

возможность при незначительных обжатиях (0,2—0,5 мм) улучшить поверхность и получить точные геометрические размеры проката. Следует также отметить, что установка устройства для калибрования в потоке позволит уменьшить число перевалок на чистовой группе клетей и повысить производительность стана. Калиброванную сталь, изготовленную методом горячей прокатки, не следует зачищать шлифовальными кругами, поскольку при этом значительно искажается форма сечения прутка, а отклонения по диаметру в месте зачистки получаются выше допустимых. Таким образом, горячей прокаткой можно получить углеродистую калиброванную сталь, не требующую зачистки поверхностных дефектов.

#### ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТОЧНОЙ ПРОКАТКИ НА СОРТОВЫХ СТАНАХ

Практика показала, что станы, позволяющие получать прокат повышенной точности, работают с наибольшей экономической эффективностью. Подсчитано, что уменьшение допусков на прокат в 1,5—2 раза позволяет сэкономить 3—5% металла. Если

прокатывать круглую сталь только с повышенной точностью, экономия металла за счет уменьшения плюсовых допусков составит для стали диаметром 5—9 мм 6% и для стали диаметром 10—19 мм — 1,3%. Горячая прокатка круглых профилей точных размеров частично или полностью исключает последующую обработку стали, стоимость которой в зависимости от марки колеблется в пределах 8—13% от стоимости калиброванной стали. Использование поля минусовых допусков значительно снижает расходные коэффициенты металла [14, 15].

Производство сортовых профилей точных размеров в нашей стране сдерживается тем, что некоторые линейные, а также ряд непрерывных сортовых и проволочных станов оборудованы устаревшими рабочими клетями. Значительные упругие деформации клетей снижают точность и качество готовой продукции. Исследования, проведенные Украинским научно-исследовательским институтом металлов, показали, что установка жестких клетей только на 19 станах заводов УССР экономит за год более 53 тыс. т металла. Даже без учета приплат за увеличенное количество проката повышенной точности (2,5 млн. руб.) денежная экономия составит 3,2 млн. руб. в год. Сравнение получаемой экономии с затратами на изготовление и установку жестких клетей подтверждает целесообразность этого мероприятия. При оборудовании станов двойным комплектом жестких клетей для ускорения перевалок затраты окупаются примерно за полгода, а без учета приплат за повышенную точность — в течение 1 года [16].

Применение жестких клетей на сортовом стане 350 Донецкого металлургического завода для точной прокатки рессорной полосы размером 45×6÷7 мм из стали 50ХГА позволило снизить брак с 8,23 до 2—3% и сэкономить около 40 тыс. руб. в год. Установка клетей более жестких конструкций дает возможность осуществить в пределах допусков двухниточную прокатку сортовых профилей в чистовых клетях стана и увеличить его производительность. Опытная проверка в работе жестких клетей на мелкосортном стане 250 показала, что при двухниточной прокатке полос размером 20—25×6—8 мм и арматурного профиля № 14 производительность стана увеличилась на 5%.

Для мелкосортного стана 260 металлургического завода им. Коминтерна изготовлены жесткие качающиеся клетки; установка их позволит получить прокат по суженным допускам и сэкономить 2—3% металла. Экономия 2% металла равнозначна увеличению выпуска проката на стане с 174 000 до 177 480 т. Годовой экономический эффект за счет экономии металла определится в сумме

$$\mathcal{E}_1 = (177480 - 174000) \times 59,45 = 206\,876 \text{ руб.},$$

где 59,45 — себестоимость 1 т проката, руб.

Снижение себестоимости проката за счет изменения условно-постоянной части расходов по переделу при увеличении производства на 20% составит

$$8,83 \times 0,515 - \frac{8,83 \times 0,515}{1,02} = 0,09 \text{ руб.},$$

где 8,83 — расходы по переделу, руб.;

1,02 — индекс увеличения объема производства;

0,515 — удельный вес условно-постоянных расходов в затратах по переделу.

Наряду со снижением себестоимости продукции получится некоторое ее повышение за счет увеличения амортизационных отчислений, вызванных капиталовложениями (30 тыс. руб.) на изготовление и монтаж жестких клетей. Суммарное снижение себестоимости можно определить по формуле<sup>1</sup>:

$$\Delta_2 = [(C_c - C_n) - EK_d] A_n \quad (4)$$

где  $C_c$  и  $C_n$  — себестоимость 1 т продукции до и после внедрения жестких клетей, руб.;

$E$  — нормативный коэффициент сравнительной эффективности капитальных затрат;

$K_d$  — новые капитальные затраты в производственные фонды, отнесенные к единице годового выпуска продукции после внедрения жестких клетей;

$A_n$  — годовой объем производства после внедрения жестких клетей, т,

$$\Delta_2 = [0,09 - 0,15 \times 0,17] \times 177480 = 10649 \text{ руб.}$$

Жесткие клетки позволят снизить выход вторых сортов на стане в год на 1073 т, что даст экономию

$$\Delta_3 = 1073 (59,45 - 47,3) = 13037 \text{ руб.},$$

где 47,3 — себестоимость второго сорта, руб.

Суммарный годовой эффект на стане при этом составит

$$\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 = 206876 + 10649 + 13073 = 230600 \text{ руб.}$$

Экономическая эффективность производства проката точных размеров подтверждается также практикой работы зарубежных станов Швеции, Англии, ФРГ, Польши и других стран.

В Швеции, например, большинство проволочных, мелкосортных и среднесортных станов оснащено жесткими рабочими клетями, позволяющими прокатывать катанку и сортовые профили с допусками  $\pm 0,1$  мм.

На отечественных металлургических заводах находится в эксплуатации более 60 станов, на которых можно установить жесткие клетки и получить прокат по суженным допускам. К та-

<sup>1</sup> Методика определения годового экономического эффекта, получаемого в результате внедрения новой техники. Госгортехиздат. 1961.

ким станам относятся проволочные 240—260, мелкосортные 250—350, среднесортные 400—550 и другие станы с линейным и непрерывным расположением клетей. Расчетные данные, представленные в табл. 5, подтверждают экономическую целесообразность частичной реконструкции 66 действующих станов с

Таблица 5

Экономический эффект от применения жестких клетей на прокатных станех

Станы	Число станов	Годовое производство проката, тыс. т		Экономия металла за счет		Годовой экономический эффект, тыс. руб. за счет		
		до установки жестких клетей	после установки жестких клетей	прокатки по суженным допускам, тыс. т	установки облегченных жестких клетей	экономии металла при прокатке по суженным допускам	снижения расходов по переделу	всего
Проволочные	11	2260,4	2344,3	83,9	66	3230,0	338,8	3569,0
Мелкосортные	34	4703,1	4893,1	190	136	7315,0	749,2	8064,2
Среднесортные	15	3146,4	3270,0	123,6	75	4759,0	457,0	5216,0
Крупносортные	6	1892,3	1970,4	78,1	30	3007,0	286,2	3293,0
Всего . .	66	12002,2	12477,8	475,6	307	18311,0	1831,1	20142,2

целью получения катанки, сортового и фасонного проката точных размеров. Годовой экономический эффект на металлургических заводах за счет экономии металла и снижения расходов по переделу составит более 20 млн. руб.

## Глава II

### ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ТОЧНОСТЬ РАЗМЕРОВ ПРОКАТА

#### РАСЧЕТ МИНИМАЛЬНОГО ПОЛЯ ДОПУСКОВ

Действительные размеры чистового калибра работающей прокатной клетки отличаются от идеальных, соответствующих точному номинальному размеру профиля. Отклонения заданных размеров и конфигурации могут быть как случайного, так и закономерного характера. Для рабочих клеток стана важно знать, какие отклонения размеров калибра следует допускать, чтобы обеспечить надлежащую точность прокатываемого профиля [18].

Под воздействием многочисленных факторов практически невозможно сохранить постоянство заданных размеров калибра. Поэтому конечные размеры проката также не остаются постоянными.

Прокатку профиля в пределах допускаемых отклонений проводят, периодически подстраивая рабочую клетку.

Время работы клетки без настройки ограничивается интенсивностью изменения размеров калибра. На рис. 10 схематически представлены постепенное нарастание высоты проката, вызванное выработкой калибра, и изменение высоты

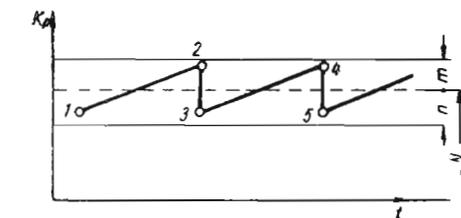


Рис. 10. Нарастание высоты проката за время работы стана:  
 $t$  — время работы стана;  $K_p$  — рабочая высота калибра

при настройке стана через определенные промежутки времени. Наклонные участки 1—2 и 3—4 показывают увеличение высоты калибра, а следовательно, и увеличение толщины прокатываемой полосы за счет его износа; вертикальные участки 2—3 и 4—5 — уменьшение высоты калибра и толщины полосы при настройке стана.

Для неработающей клетки высота калибра определяется размерами ручьев и величиной зазора между валками

$$K = h_{p_1} + h_{p_2} + s + H_{с.к.} \quad (5)$$

где  $K$  — установочная высота калибра;  
 $h_{p_1}$  и  $h_{p_2}$  — фактическая глубина нижнего и верхнего ручьев с учетом допусков на их расточку;  
 $s$  — зазор между валками с учетом люфтов между соприкасающимися деталями;  
 $H_{с.к.}$  — среднее квадратичное отклонение неровностей поверхности калибра.

Глубина ручьев изменяется в зависимости от степени неровности поверхности (чистоты механической обработки) и допусков при их изготовлении. Эту глубину и зазор между валками можно непосредственно измерить.

Обычно для точеных валков чистовых клеток, обработанных по второй группе чистоты, неровности поверхности изменяются в пределах 1,6—12,5 мкм. По мере износа калибра его поверхность становится более шероховатой и неровности достигают 12,5—100 мкм, что соответствует обработке по I группе чистоты.

Среднее квадратичное отклонение неровностей поверхности можно выразить следующей формулой<sup>1</sup>

$$H_{с.к.} = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l h^2 dl}$$

или приближенно

$$H_{с.к.} = \frac{1}{h} \left( h_1^2 + h_2^2 + h_3^2 + \dots + h_n^2 \right),$$

где  $h$  — расстояние от средней линии профиля до поверхности;  
 $l$  — длина участка поверхности.

Среднее квадратичное отклонение неровностей поверхности от средней линии в цеховых условиях можно определить контактным электродинамическим профилометром.

Во время работы стана глубина и конфигурация ручьев подвержены постоянному изменению, которое является следствием неравномерного износа. Кроме того, происходят износ подшипников и деформация деталей элементов клетки, а также наблюдается биение и термическое расширение валков. Высота калибра в определенный момент работы стана будет равна [20]

$$K_p = K + f_k + \Delta h_t + \Delta h_p + \Delta h_n + \Delta c, \quad (6)$$

где  $K$  — установочная высота калибра;  
 $f_k$  — упругая деформация клетки;  
 $\Delta h_t$  — изменение высоты калибра из-за нагрева валков;  
 $\Delta h_p$  — износ калибра по высоте;  
 $\Delta h_n$  — износ подшипников и других деталей клетки;  
 $\Delta c$  — изменение высоты калибра, вызванное радиальным биением валков.

ГОСТ 2789—59

На рис. 11 схематически представлены составляющие высоты калибра, оказывающие влияние на конечные размеры профиля. Из рисунка видно, что изменение высоты калибра вследствие износа ручьев, подшипников и нагруженных деталей происходит

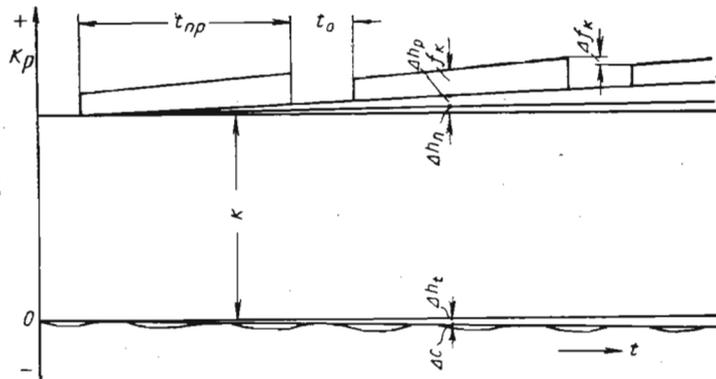


Рис. 11. Составляющие рабочей высоты калибра:  $K$  — установочная высота калибра;  $t$  — время работы калибра

равномерно. Биение валков и неравномерная деформация клетки в начале и в конце прокатки полосы вызывают периодические колебания размеров калибра.

Во время работы стана температура рабочих валков увеличивается, что вызывает уменьшение высоты калибра. При нормальной работе стана (равномерная подача полосы без длительных пауз) устанавливается определенная температура валков и высота калибра остается постоянной.

Для определения предельных отклонений размеров проката следует найти минимальное поле допусков профиля, учитывая при этом технологию прокатки и конструктивные особенности рабочих клеток. Минимально возможным полем допусков будем называть такое поле, величина которого равна алгебраической сумме погрешностей калибра при прокатке одной полосы.

Обозначим минимальное возможное поле допусков

$$\delta_{\text{мин}} = m' + n', \quad (7)$$

где  $m'$  и  $n'$  — соответственно абсолютные значения наименьшего плюсового и наименьшего минусового допусков.

Рабочим полем допусков будет такое поле, которое обеспечивает устойчивую работу клетки в течение 1 ч без ее подстройки.

Обозначим рабочее поле допусков

$$\delta_{\text{раб}} = m + n. \quad (8)$$

где  $m$  и  $n$  — абсолютные значения плюсового и минусового допусков.

Очевидно,

$$\delta_{\text{раб}} = k \delta_{\text{мин}}, \quad (9)$$

где  $k$  — коэффициент, зависящий от степени совершенства стана и особенностей технологического процесса.

Для определения минимально возможного поля допусков найдем изменение первоначальной высоты калибра

$$\delta = K_p - K. \quad (10)$$

Подставляя в уравнение (10) значения  $K_p$  и  $K$ , получим

$$\delta = f_k + \Delta h_t + \Delta h_p + \Delta h_n + \Delta c. \quad (11)$$

За время прокатки одной полосы изменяется упругая деформация клетки, и под действием биения валков возникает периодическая разнотолщинность по длине раската. В это же время происходит износ калибра, деталей клетки, а также термическое расширение валков. Величина износа и термического расширения валков настолько малы, что их влиянием на высоту калибра можно пренебречь. В этом случае изменение высоты калибра будет минимальным, т. е.

$$\delta_{\text{мин}} = \Delta f_k + \Delta c, \quad (12)$$

где  $\Delta f_k$  — изменение упругой деформации клетки.

Величина  $\delta_{\text{мин}}$  является минимально возможным полем допусков при прокатке данного профиля. Из равенства (12) следует, что биение валков оказывает существенное влияние на точность прокатки. Поэтому повышение жесткости рабочей клетки при значительных величинах биения валков нецелесообразно.

Рабочее поле допусков, обеспечивающее работу стана без подстройки в течение 1 ч, будет

$$\delta_{\text{раб}} = \delta_{\text{мин}} + \Delta h_t + \Delta h_p + \Delta h_n, \quad (13)$$

где  $\Delta h_t$  — изменение высоты калибра, вызванное нагревом валков;

$\Delta h_p$  — износ калибра по высоте, мм/ч;

$\Delta h_n$  — износ подшипников и других нагруженных деталей клетки, мм/ч.

Разделив правую и левую части равенства (13) на  $\delta_{\text{мин}}$ , получим

$$k = 1 + \frac{\Delta h_t + \Delta h_p + \Delta h_n}{\delta_{\text{мин}}}. \quad (14)$$

Из равенства (14) следует, что коэффициент  $k$  всегда больше единицы.

Пример. Произвести расчет минимального и рабочего поля допусков для угловой стали  $32 \times 32 \times 4$  мм, прокатываемой в чистой клетке мелкосортного стана 280.

Температура прокатки переднего конца полосы 1050°C, заднего конца 980°C. Радиальное биение верхнего вала  $c_1=0,03$  мм, нижнего вала —  $c_2=0,06$  мм. Расчетное давление металла на валки составляет для переднего конца полосы 255 кН (26 Т), для заднего конца 314 кН (32 Т).

Общую упругую деформацию клетки определяем как сумму упругих деформаций всех нагруженных деталей: валков, подшипников, подушек, предохранительных стаканов, нажимных винтов, гаек, станин. Деформация отдельных деталей клетки, рассчитанная по известным формулам [18, 21], представлена в табл. 6.

Таблица 6

Упругая деформация чистовой клетки мелкосортного стана 280

Детали клетки	Деформация (в мм) деталей клетки при давлении прокатки, кН (Т)		Детали клетки	Деформации (в мм) деталей клетки при давлении прокатки, кН (Т)	
	255 (26)	314 (32)		255 (26)	314 (32)
Валки . . . . .	0,150	0,180	Винты . . . . .	0,035	0,045
Подшипники . . . . .	0,090	0,110	Гайки . . . . .	0,004	0,005
Подушки . . . . .	0,040	0,055	Станины . . . . .	0,056	0,070
Стаканы . . . . .	0,110	0,135	Полная деформация	0,485	0,600

Изменение упругой деформации клетки равно разности ее упругих деформаций в конце и в начале прокатки полосы, т. е.

$$\Delta f_k = 0,600 - 0,485 = 0,115 \text{ мм.}$$

Так как рабочие валки могут быть установлены относительно друг друга в любом положении, то величина изменения высоты калибра, вызванная радиальным биением валков, будет находиться в пределах от  $c_2-c_1$  до  $c_1+c_2$ . Максимальное изменение высоты калибра от радиального биения валков составит

$$\Delta c = c_1 + c_2 = 0,03 + 0,06 = 0,09 \text{ мм.}$$

Подставляя в равенство (12) значения  $\Delta f_k$  и  $\Delta c$ , найдем минимальное поле допусков:

$$\delta_{\text{мин}} = \Delta f_k + \Delta c = 0,115 + 0,09 = 0,205 \text{ мм.}$$

Изменение высоты калибра, вызванное нагревом валков, найдем по формуле

$$\Delta h_t = \alpha (d_k \Delta t_1 + d_{\text{ш}} \Delta t_2),$$

где  $d_k$  — диаметр по дну калибра;

$d_{\text{ш}}$  — диаметр шейки вала;

$\alpha$  — коэффициент линейного расширения материала валков;

$\Delta t_1$  и  $\Delta t_2$  — изменение температуры бочки и шейки вала соответственно.

Принимая колебания температуры чугунных валков вследствие неравномерной подачи полос и возможных задержек в работе стана равными 20°C для бочки и 15°C для шейки, определим изменение высоты калибра:

$$\Delta h_t = 0,0000104 (300 \cdot 20 + 150 \cdot 15) = 0,086 \text{ мм.}$$

Износ калибров примем равным 0,025 мм/ч и износ текстолитовых подшипников 0,03 мм/ч [3]. Тогда рабочее поле допусков, обеспечивающее работу клетки в течение 1 ч без подстройки, будет

$$\delta_{\text{раб}} = \delta_{\text{мин}} + \Delta h_t + \Delta h_p + \Delta h_{\text{п}} = 0,205 + 0,086 + 0,025 + 0,03 = 0,35 \text{ мм.}$$

Так как плюсовой допуск составляет примерно 40% от величины поля допусков, то из равенства (8) получим

$$m = +0,15 \text{ мм и } n = -0,20 \text{ мм.}$$

Допускаемое отклонение размеров по толщине полки уголка, согласно ГОСТ 8509—57, составляет  $\pm 0,4$  мм.

Расчет по приведенной методике позволяет определить, в каких случаях целесообразно повышение жесткости рабочих клетей при одно- и многократной прокатке.

ЖЕСТКОСТЬ РАБОЧИХ КЛЕТЕЙ

Зависимость толщины полосы от условий прокатки и конструкции стана выражается формулой [22]

$$h = s + f_k = s + \frac{P}{c}, \quad (15)$$

где  $s$  — начальный зазор между валками;

$f_k$  — упругая деформация рабочей клетки;

$c$  — коэффициент жесткости клетки, представляющий величину давления, необходимую для увеличения зазора между валками за счет упругих деформаций на 1 мм;

$P$  — давление металла на валки.

Из формулы (15) следует, что толщину полосы можно регулировать в процессе прокатки изменением:

- а) зазора между валками;
- б) коэффициента жесткости клетки;
- в) величины давления металла на валки.

Тогда толщина полосы будет:

при изменении зазора между валками

$$h_1 = s_1 + \frac{P}{c} = h + (s_1 - s); \quad (16)$$

при изменении жесткости рабочей клетки

$$h_1 = s + \frac{P}{c_1} = h + \frac{P(c - c_1)}{cc_1}; \quad (17)$$

при изменении давления металла на валки

$$h_1 = s + \frac{P_1}{c} = h + \frac{P_1 - P}{c}. \quad (18)$$

Коэффициент жесткости прокатной клетки — величина постоянная и зависит от конструктивных особенностей узлов и деталей, воспринимающих усилие прокатки. Чем меньше упругая деформация клетки при заданной нагрузке, тем выше ее жесткость.

На рис. 12 представлены графики зависимости упругой деформации прокатных клетей 1 и 2 от усилия прокатки. Из рисунка следует

$$c_1 = \frac{P_2 - P_1}{f_2 - f_1} \text{ и } c_2 = \frac{P_4 - P_3}{f_2 - f_1}$$

или

$$\frac{P_2 - P_1}{c_1} = \frac{P_4 - P_3}{c_2},$$

откуда

$$c_2 = \frac{(P_4 - P_3) c_1}{P_2 - P_1} = \frac{\operatorname{tg} \alpha_2}{\operatorname{tg} \alpha_1} c_1, \quad (19)$$

т. е. коэффициент жесткости пропорционален тангенсу угла наклона прямой графика упругой деформации клетки.

Для обычных прокатных клеток коэффициент жесткости на станах составляет:

	Коэффициент жесткости Мн/м (Т/мм)
Проволочных 240—260	390—685 (40—70)
Мелкосортных 250—350	590—981 (60—100)
Среднесортных 500—600	685—1270 (70—130)
Крупносортных	780—1560 (80—160)

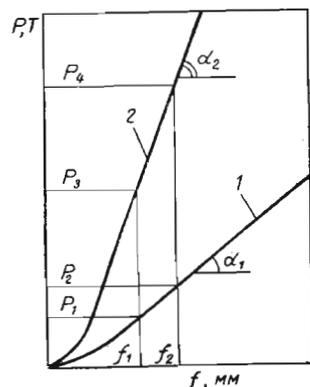


Рис. 12. Зависимость упругой деформации клеток 1 и 2 от усилия прокатки

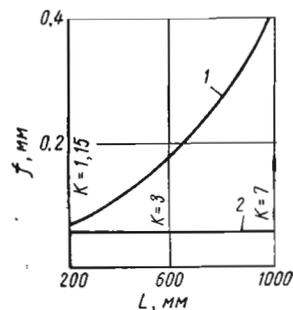


Рис. 13. Деформация валков и станин чистой клетки стана 280 при давлении 30 т:  
1 — валки; 2 — станины;  $K = f_B / f_C$ ;  
 $L$  — длина бочки

Приближенное значение коэффициента жесткости можно определить, пользуясь упрощенной формулой Королева [2 3] для расчета общей упругой деформации клетки дуо при отношениях длины бочки валка к диаметру, равных  $2 \div 3$

$$f_k = 39 \div 52 \frac{P}{DE}, \quad (20)$$

откуда

$$\frac{P}{f_k} = \frac{DE}{39 - 52}, \quad (21)$$

где  $D$  — диаметр рабочего валка;  
 $E$  — модуль упругости материала валка.

30

Упругая деформация клеток изменяется в широких пределах. Чем несовершенней стан, тем больше упругая деформация и тем меньше точность размеров проката. Поэтому с точки зрения повышения точности прокатки предпочтение нужно отдать клетям, имеющим сравнительно короткие валки, жесткие станины, совершенные установочные механизмы и современные подшипники. Необходимо учитывать, что плохая обработка соприкасающихся поверхностей отдельных деталей и наличие зазоров в соединениях также увеличивают деформацию клетки.

В табл. 7 приведены расчетные данные упругих деформаций чистовых клеток некоторых прокатных станков. Деформации подушек и клиньев (ввиду их незначительности) в таблице не указаны.

Расчеты показывают, что при обычных колебаниях давления изменение упругой деформации клетки старой конструкции составляет примерно 0,2—0,5 мм для сортовых станков и 0,5—0,9 мм для многониточных проволочных станков.

Значительную часть упругой деформации клетки составляет прогиб валков, достигающий 40—60% от общей деформации. Поэтому невозможно резко повысить жесткость клетки дуо за счет улучшения отдельных ее узлов без сокращения длины рабочих валков.

Например, при удлинении бочки от 200 до 1000 мм (рис. 13) отношение деформации валков к деформации станин возрастает в шесть раз.

На современных сортовых и проволочных станах особое внимание уделяют жесткости конструкций рабочих клеток. В каждой клетке, как правило, прокатку ведут в одну нитку. В клетях с консольными валками и в трехвалковых клетях длину бочки валка рассчитывают под нарезку только одного калибра. Для повышения стойкости калибров и сокращения затрат времени при перестройках рабочие валки изготавливают из специальных износостойких сталей. Громоздкие станины клеток заменяют предварительно напряженными и ненапряженными подушками. Для уменьшения прогиба многоручьевых рабочих валков применяют опорные валки. В качестве опор валков используют многорядные подшипники качения и подшипники жидкостного трения.

#### ТЕМПЕРАТУРА ПРОКАТКИ И РАБОЧИХ ВАЛКОВ

Температура прокатываемых полос изменяется в широких пределах в зависимости от равномерности нагрева металла, ритма прокатки, длины раската и типа стана. Перед подачей металла в чистовую клетку температура различна не только по длине полос, но и между смежными полосами, следующими друг за другом (табл. 8).

31

## Упругая деформация прокатных клетей

Стан	Диаметр валков	Длина бочки	Давление, кг (Т)	Деформация деталей клетки, мм						Изменение деформации, мм	Кoeffициент жесткости, Мн/м (Т/мм)	
				Валков	Станы	Винта	Гайки	Стакана	Подшипников			Полная
Крупносортный	550	800	686 (70) 1080 (110)	0,18 0,28	0,13 0,20	0,05 0,08	0,01 0,02	0,42—0,14 0,60—0,20	0,06 0,09	0,85—0,57 1,25—0,87	0,42—0,30	981 (100)
	320	1000	147 (15) 226 (23)	0,25 0,41	0,06 0,09	0,06 0,09	0,004 0,005	0,21—0,06 0,30—0,09	0,02 0,03	0,62—0,47 0,92—0,71	0,30—0,24	294 (30)
Проволочный (1 нитка) То же (6 ниток)	300	600	294 (30)	0,17	0,07	0,042	0,005	0,22—0,07	0,10	0,61—0,46	—	588 (60)
	300	850	41 (4,2) 247 (25,2)	0,04 0,175	0,02 0,12	0,004 0,024	0,0007 0,004	0,04—0,015 0,24—0,09	0,011 0,066	0,11—0,09 0,63—0,48	0,52—0,39	440 (45)

На проволочных линейных станах снижение температуры по длине раската составляет 100—150°C, а изменение температуры металла, вызванное неравномерностью нагрева заготовки в печи

Таблица 8

## Температура переднего конца раската при прокатке в чистовой клетке

Профиль	Размер (мм) и номер профиля	Стан	Температура прокатки, °С	Изменение температуры, град	Расположение клетей стана
Катанка	6,5	Проволочный	260	850—900	50
»	6,5	»	250	1070—1100	30
Круг	12	Мелкосортный	250	1020—1070	50
»	12	»	260	920—980	60
Квадрат	14	»	260	905—960	55
Полоса	36×6	»	260	920—980	60
Оконнорамный	№ 4	»	260	880—930	50
Уголок	25×25×3	»	280	1025—1090	65
»	30×45×4	»	330	990—1050	60
Круг	30	»	350	1000—1055	55
Уголок	75×75×6	Среднесортный	500	980—1025	45
Швеллер	№ 8	»	500	890—940	50

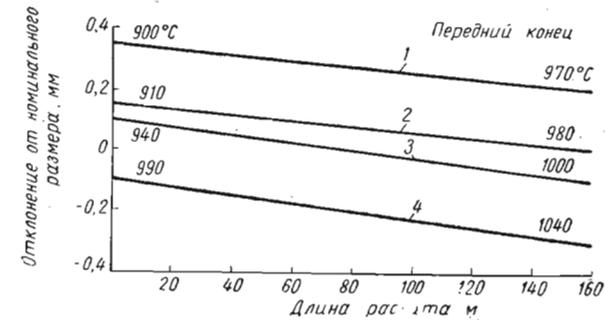


Рис. 14. Изменение высоты круга различных диаметров, мм, в зависимости от температуры и длины раската:

1 — 16; 2 — 18; 3 — 25; 4 — 30

и задержек раската на стане — от 30 до 70 град. На сортовых линейных станах неравномерность нагрева отдельных полос составляет 20—60 град, а снижение температуры по длине раската от 30 до 100 град. На сортовых непрерывных станах, где применяются высокие скорости прокатки, разница температур переднего и заднего концов полосы несколько уменьшается и лежит в пределах 20—70 град.

С изменением температуры по длине раската изменяется высота профиля, снижается его точность (рис. 14). Замеры, выполненные при прокатке кругов диаметром 25, 30 и 32 мм, показали, что разница температур переднего и заднего концов раската перед чистой клетью составляет 30—55 град, а перепад температуры от первой к последней клетки стана 350 достигает 170—290°С.

На рис. 15 представлены частотные кривые отклонений размеров по высоте и ширине чистового круга. Из графиков следует, что изменения температуры раската по длине и между последовательно прокатываемыми полосами вызывают отклонения вертикального диаметра на 0,3—0,45 мм.

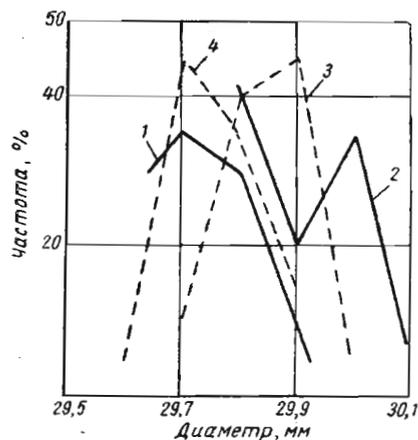


Рис. 15. Частотные кривые отклонений размеров круга диаметром 30 мм: 1 и 2 — вертикальные диаметры переднего и заднего концов раската; 3 и 4 — горизонтальные диаметры переднего и заднего концов раската

Для уменьшения влияния температуры нагрева металла на точность прокатки необходимо осуществлять равномерный нагрев заготовки. Кроме того, температура прокатки полос должна быть по возможности одинаковой. Уменьшение разницы в температуре нагрева отдельных заготовок перед прокаткой может быть достигнуто специальными устройствами для автоматического регулирования работы нагревательных печей.

Улучшение технологии прокатки и равномерность нагрева металла позволяют значительно уменьшить колебания давления металла на валки до 10—20%.

На размеры калибра, а следовательно, и точность размеров проката оказывает влияние температура рабочих валков, нагрев которых происходит под действием тепла нагретых полос, а также под действием тепла, выделяющегося при пластической деформации. Изменения размеров валка по диаметру, вызванные колебанием температуры, могут быть определены по формуле [24]

$$\Delta D = D \alpha (t_2 - t_1), \quad (22)$$

где  $D$  — диаметр бочки валка;  
 $\alpha$  — коэффициент линейного расширения материала валка;

$t_1$  и  $t_2$  — начальная и конечная температуры валка.

При всех прочих равных условиях в клетях дуо под действием нагрева зазор между валками уменьшается на величину  $\Delta D$ .

Изменение высоты калибра, вызванное изменением температуры бочек и шеек валков, может быть найдено по формуле

$$\Delta h_t = \alpha (d_k \Delta t_1 + d_{ш} \Delta t_2), \quad (23)$$

где  $d_k$  и  $d_{ш}$  — диаметры по калибру и шейке валка;

$\Delta t_1$  — среднее изменение температуры валка по калибру;

$\Delta t_2$  — среднее изменение температуры шеек валка.

При нормальной работе стана устанавливается определенная температура валков, если приток тепла компенсируется охлаждением. В случае частых остановок стана или работы с перерывами температура валков меняется, вызывая изменения размеров профиля. Обычно температура валков устанавливается через 40—50 мин после начала прокатки. При установившейся работе колебания температуры валков вызваны неравномерностью подачи полос и не превышают 10 град. Расчетные данные изменения высоты калибра при нагреве валков на 10 град приведены в табл. 9.

Таблица 9

Изменение высоты калибра при нагреве валков на 10 град

Диаметр валков, мм	Изменение высоты калибра валков, мм		Диаметр валков, мм	Изменение высоты калибра валков, мм	
	чугунных	стальных		чугунных	стальных
250	0,045	0,050	450	0,083	0,092
280	0,051	0,059	500	0,091	0,101
300	0,056	0,062	650	0,120	0,135
350	0,066	0,074	800	0,150	0,170
400	0,075	0,085			

Влияние термического расширения чугунных валков на их профиль при прокатке полос определяли экспериментально с помощью передвижного микрометра [25]. Диаметры извлеченных из клетки рабочих валков измеряли по всей длине бочки с интервалом 100 мм. Первую серию замеров производили непосредственно после удаления валков из клетки, вторую — после охлаждения в течение 1 ч и третью — после охлаждения валков до температуры окружающей среды. Разница между замерами диаметров в первой и третьей сериях определяла расширение валков во время прокатки. Разница, полученная между замерами диаметров первой и второй серии, характеризовала скорость охлаждения.

Было принято, что охлаждение валков происходит по закону Ньютона, согласно которому скорость охлаждения тела пропор-

циональна разности температур тела и окружающей среды. Применительно к охлаждению валков

$$\frac{dE}{dt} = kE.$$

После интегрирования этого выражения в пределах от  $E_0$  до  $E$  формула имеет вид

$$E = E_0 e^{-kt_0}, \quad (24)$$

где  $E$  — расширение в момент  $t$ ;  
 $E_0$  — начальное расширение;  
 $t_0$  — время охлаждения, мин;  
 $e$  — основание натуральных логарифмов;  
 $k$  — постоянный коэффициент.

Статистическая обработка замеров на 175 валках показала, что приведенное уравнение применимо для различных станов. При этом коэффициент  $k$ , зависящий от природы материала, размеров и условий охлаждения валков, должен быть определен в каждом конкретном случае. Значение этого коэффициента для сортовых станов может быть принято ориентировочно 0,2—0,4.

### ИЗНОС ВАЛКОВ И ДЕТАЛЕЙ КЛЕТИ

Отклонения размеров калибра от номинальных, вызываемые износом валков, приводят к изменению размеров прокатываемого профиля. Общий износ калибра складывается из равномерного износа по высоте, местного износа по высоте и по ширине калибра [26].

В процессе прокатки поверхность калибра периодически нагревается и охлаждается под воздействием горячего металла и охлаждающей жидкости. Температура валка вне зоны деформации выше температуры окружающей среды не более чем на 50 град. В очаге деформации температура поверхности ручья близка к температуре прокатываемого металла. В результате периодического нагрева и охлаждения поверхности ручья на ней

Таблица 10

Износ калибров чугунных валков по высоте

Профиль	Размер (мм) и номер профиля	Коэффициент вытяжки	Количество прокатанного металла, т	Износ калибров валков, мм	
				верхнего	нижнего
Швеллер . . . . .	№ 10	1,24	252	0,10—0,15	0,30—0,75
Балка . . . . .	№ 10	1,25	126	0,10—0,20	0,25—0,35
Уголок . . . . .	90×90×10	1,1—1,16	556	0,10—0,35	0,10—0,25
Круг . . . . .	90	1,12	750	0,08—0,2	0,08—0,15
Квадрат . . . . .	16×16	1,1—1,17	164	0,17—0,36	0,20—0,32
Катанка . . . . .	6,5	1,14—1,18	105	0,30—0,50	0,28—0,47

появляется сетка трещин, которая способствует механическому износу калибра.

Срок службы калибра повышается при его тщательной обработке, хорошем охлаждении, равномерной деформации металла, увеличении твердости рабочей поверхности валка, уменьшении удельного давления и рациональной калибровке валка. Ясно, что износ чистового калибра непосредственно сказывается на точности размеров готового проката.

В табл. 10 приведены данные замеров абсолютного износа калибров чугунных валков чистовых клетей при прокатке некоторых сортовых и фасонных профилей.

На рис. 16 показана схема износа калибров верхнего и нижнего чистовых валков проволочного стана 260. Выработка ка-

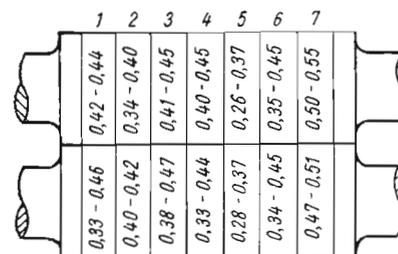


Рис. 16. Схема износа калибров по высоте ручья верхнего и нижнего чистовых валков проволочного стана 260:

1—7 — номера секций калиброванной части валка

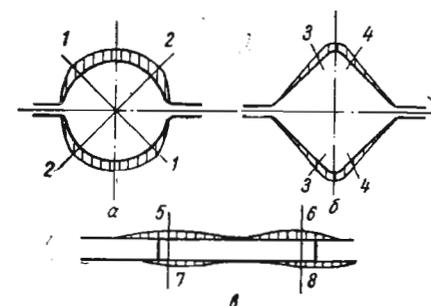


Рис. 17. Характер износа чистовых калибров:

а — круглый; б — квадратный; в — гладкая бочка

либров в течение 16 ч работы составляла 0,26—0,55 мм по высоте ручья. Наибольшая выработка наблюдается в секции 7, т. е. со стороны привода валков. Эту секцию наиболее часто используют в работе.

Равномерный по высоте износ калибров легко устранить периодической настройкой стана. Однако местный износ, образование сетки трещин, а также износ по ширине этим методом устранить невозможно.

На рис. 17 представлен характер износа круглого и квадратного чистовых калибров, а также износ поверхности бочки валка при прокатке колосы. Наибольший износ круглого калибра наблюдается в точках 1 и 2, которые расположены на диагоналях, наклоненных к вертикали под углом примерно 45°. Одна из причин такого износа объясняется тем, что входящий в круглый калибр овальный раскат под действием пары сил, возникающей при отклонении его от вертикали, стремится быть опрокинутым, но удерживается вводными пропусками. Такое же явление может наблюдаться при искажении формы раската. В результате

поворота овала на некоторый угол максимальное обжатие осуществляется не по центру круглого калибра, что ведет к повышенному его износу. При износе калибра размер круга по диагонали в точках 1 и 2 больше горизонтального и вертикального диаметров.

Для уменьшения такого износа круглого калибра необходимо правильное заполнение предотделочного овала и более тщательная установка вводных пропусков, материал которых должен обладать высокой износостойкостью.

Наибольший износ квадратного калибра (рис. 17,б) наблюдается в точках 3 и 4, отстоящих от вершины примерно на одну

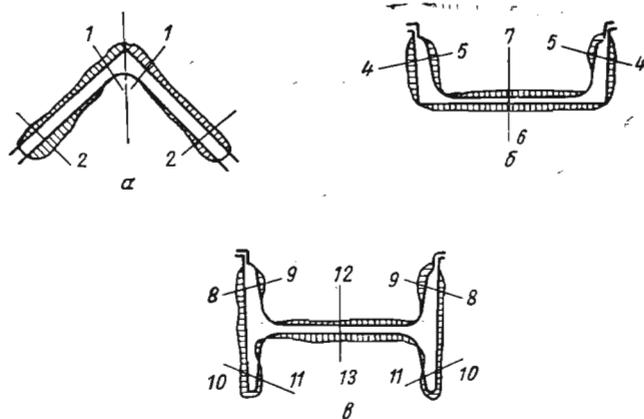


Рис. 18. Характер износа чистовых фасонных калибров: а — угольный; б — швеллерный; в — балочный

треть длины стороны квадрата. Характер такого износа можно объяснить в некоторой степени тем, что форма задаваемого ромбического раската имеет несколько притупленный угол. Чем точнее заполнен предотделочный ромб, тем меньше износ в точках 3 и 4 чистового квадрата.

Износ чистовых валков с гладкой бочкой (рис. 17,в) происходит главным образом в точках 5 и 7, 6 и 8, которые расположены по краям прокатываемой полосы. Этот факт можно объяснить значительным снижением температуры краев полосы по сравнению с температурой ее середины, а также уширением металла. На чистовых валках наблюдается местный и несимметричный износ, вызываемый недостаточно тщательной настройкой стана. Для компенсации образующегося во время прокатки неравномерного износа чистовых валков следует увеличить их диаметр приблизительно на величину минусового допуска в местах их прикосновения с краями прокатываемой полосы.

Значительная неравномерность износа калибров существует и при прокатке фасонных профилей (рис. 18). Износ углового калибра (рис. 18,а) происходит под действием разности окруж-

ных скоростей верхнего и нижнего валков, особенно в точках 1 и 2. Исследования показали, что опережение металла при прокатке уголка  $90 \times 90 \times 10$  мм составляет на вершине калибра 24,3%, на внутренней стороне конца полки 13,5%, а на наружной стороне полки — 1,97%; здесь происходит отставание металла.

Чрезмерный износ чистового калибра приводит к тому, что угольный профиль не укладывается в районе точек 1 и 2 в пределы допусков (рис. 18,а). В этих местах при расточке валков целесообразно создать некоторый запас.

Наибольший износ швеллерного калибра (рис. 18,б) происходит в центральной части (стойки) в точках 6 и 7 и на концах фланцев в точках 4 и 5. Повышенный износ калибра в точках 6 и 7 образуется за счет понижения температуры шейки (стойки), как наиболее тонкой части профиля. Замерами установлено, что температура середины шейки на 50—70 град ниже температуры у основания фланца. Края фланцев на 30—40°C холоднее их основания.

Для повышения точности размеров профиля и увеличения срока службы чистового швеллерного калибра целесообразно дно ручья верхнего валка сделать выпуклым, а у вершины фланцев предусмотреть утонения. Величины выпуклости в центре шейки и утонения на фланцах калибра должны обеспечить прокатку швеллера в пределах допусков. Такое изменение формы калибров создает запас тела валков в местах повышенного износа.

Износ балочного калибра (рис. 18,в) весьма неравномерный. Большому износу подвержены закрытые ручьи в точках 10 и 11. Износ гребней несколько меньше и почти одинаков по всей ширине. Закрытый ручей по поверхности гребня (точка 13) изнашивается больше, чем открытый (точка 12), так как твердость его значительно меньше. Износ боковых поверхностей гребня увеличивается с уменьшением диаметра валков и в непосредственной близости от края полки (в точках 9 и 11) достигает максимальной величины. Износ боковых наружных поверхностей ручья возрастает под действием скольжения в направлении от точки 10 до точки 8, т. е. от вершины закрытой полки к вершине открытой полки.

Срок службы балочных калибров можно удлинить утонением шейки и концов фланцев в чистовом и предчистовом калибрах.

Опытные данные по выработке угольных, швеллерных, круглых, квадратных и других калибров позволяют считать, что местный износ, а также износ по ширине может быть уменьшен за счет изменения конфигурации ручьев при калибровке валков. Калибровка прокатных валков, проводимая с учетом их износа, обеспечивает не только повышение стойкости калибров, но и повышение точности прокатываемого профиля.

Из деталей рабочей клетки, подверженных износу, следует отметить подшипники. Износ подшипников зависит от их конструкции, материала, качества монтажа, рода смазки, интенсивности охлаждения и величины воспринимаемой нагрузки. Современные подшипники качения и жидкостного трения при нормальных условиях эксплуатации имеют настолько незначительный износ, что он фактически не сказывается на размерах проката. Особенно перспективны для прокатных станом подшипники жидкостного трения, поскольку они обеспечивают возможность увеличения скорости прокатки и давления металла на валки. Правильно рассчитанные подшипники при качественном изготовлении и надлежащей эксплуатации могут служить в продолжение 10—15 лет без заметного износа.

Существенное влияние на точность профиля оказывает износ бронзовых, текстолитовых и других типов подшипников скольжения. По данным С. Н. Филипова [3], для чистовых клетей сортовых станом быстрота износа приближенно составляет: бронзовых подшипников 0,2 мм/ч, лигностоновых подшипников 0,05 мм/ч, текстолитовых подшипников 0,03 мм/ч. Износ подшипников, так же как и износ калибров, нарастает постепенно, и его влияние на точность проката может быть устранено периодической настройкой стана.

Износ калибров и подшипников можно своевременно компенсировать контролем и поддержанием заданного зазора между валками с помощью автоматически действующих устройств.

#### ДАВЛЕНИЕ МЕТАЛЛА НА ВАЛКИ

При прокатке сортовых и фасонных профилей давление на валки рабочих клетей непрерывно изменяется, вызывая колебания размеров проката.

В табл. 11 приведены данные экспериментальных замеров давления при прокатке сортовых и фасонных профилей в предчистовых и чистовых клетях прокатных станом 250, 260, 280, 350 и 650 [27—29].

Для каждого профиля в табл. 11 указана средняя величина полного давления при средних значениях коэффициента вытяжки, температуры и скорости прокатки. Давление при прокатке круглых, квадратных, угловых и швеллерных профилей в предчистовых клетях выше, чем в чистовых. Для тонкостенных оконнорамных, балочных профилей и полос наблюдается повышение давления в чистовых клетях.

Замеры показали, что разница между фактическими значениями максимальных и минимальных давлений составляет 20—30%, что вызывает соответствующее изменение упругой деформации рабочих клетей.

Например (рис. 19), при прокатке круга диаметром 14 мм среднее давление понижается с 152 кн (15,5 Т) в первой клетке

Таблица 11

Параметры прокатки сортовых и фасонных профилей

Стан	Профиль	Размер (мм) и номер профиля	Предчистовая клетка				Чистовая клетка					
			коэффициент вытяжки	температура, °С	скорость прокатки, м/сек	Давление кн	Т	коэффициент вытяжки	температура, °С	скорость прокатки, м/сек	Давление кн	Т
Линейный 260 То же	Круг (диам.)	12	1,29	1030	5,7	74,6	7,6	1,12	990	6,1	66,5	6,8
			1,24	980	6,4	59,8	6,1	1,14	910	6,7	64,3	6,5
Непрерывный 250 Линейный 280	Квадрат (сторона)	16	1,19	1035	10,8	78,5	8,0	1,15	1030	12,3	40,2	4,1
			1,25	1100	6,0	59,8	6,1	1,15	1070	6,5	34,2	3,5
Непрерывный 250 Шахматный 350	Круг	19	1,16	1060	8,7	118	12,0	1,12	1050	9,8	78,5	8,0
			1,31	1000	5,6	364	37,0	1,16	960	5,8	167	17,0
То же	»	40	1,16	1060	4,3	397	40,5	1,21	1030	5,2	206	21,0
			1,25	1080	3,09	314	32,0	1,16	1050	3,9	264	27,0
Линейный 260 Непрерывный 250	Полоса	36×6	1,11	1020	4,7	19,6	2,0	1,32	1010	3,2	177	18,1
			1,3	1040	6,25	298	30,2	1,23	1030	9,85	278	28,4
Линейный 260	Оконнорамный	№ 4	1,3	970	4,6	206	21,0	1,19	900	4,7	137	14,0
			1,25	965	4,2	158	16,1	1,16	910	4,5	167	17,0
Шахматный 350 То же	Уголок	65×65×6	1,2	1060	6,3	550	56,1	1,13	1010	6,6	573	58,5
			1,14	1010	5,9	354	36,0	1,13	960	6,2	244	25,0
Линейный 650 То же	Швеллер № 6, 5	№ 6, 5	1,11	890	6,0	1230	125	1,1	830	5,45	1108	113
			1,05	930	5,3	1000	102	1,07	860	6,5	1962	200
То же	Двутавровая балка	№ 16	1,05	930	5,3	1000	102	1,07	860	6,5	1962	200
			1,3	1070	5,0	2380	242	1,16	940	4,8	1668	170
»	Уголок	160×160×10	1,3	1070	5,0	2380	242	1,16	940	4,8	1668	170
			1,3	1070	5,0	2380	242	1,16	940	4,8	1668	170

до 88 кН (9 Т) в пятой клетке. Разность между максимальным и минимальным давлениями в предчистовой и чистой клетях составляет 19,6 кН (2 Т), т. е. более 20% от средней величины полного давления.

При прокатке полосы 36×5 мм давление во 2-м и 4-м проходах (ребровые калибры) резко уменьшается и возрастает в 5-м

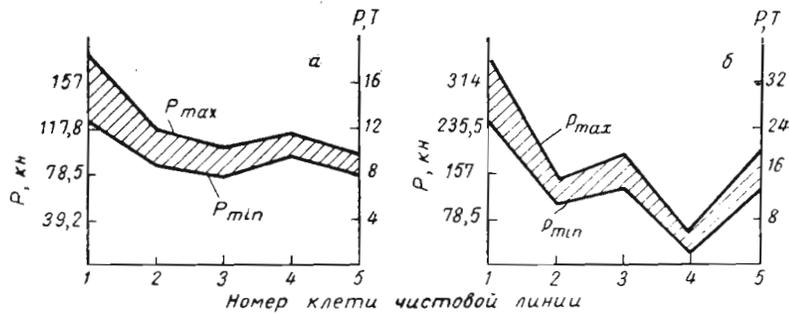


Рис. 19. Давление металла на валки при прокатке сортовых профилей:  
а — круг диаметром 14 мм; б — полоса 36×5 мм

проходе. Разность между максимальным и минимальным давлением в чистой клетке составляет 68,6 кН (7 Т) при среднем полном давлении 157 кН (16 Т).

Общая упругая деформация чистой клетки мелкосортного стана 260 при давлении 98 кН (10 Т) равна 0,26 мм. Изменение упругой деформации клетки, а следовательно, и размера профиля по высоте, вызываемое колебанием давления, будет

$$\Delta f_k = \frac{P_{\max} - P_{\min}}{P} f_k$$

где  $P_{\max}$  и  $P_{\min}$  — максимальное давление, кН;  
 $f_k$  — упругая деформация чистой клетки (в мм) при давлении  $P=98$  кН.

Подставляя в формулу значения  $P_{\max}$ ,  $P_{\min}$ ,  $P$  и  $f_k$ , получим: для круга диаметром 14 мм

$$\Delta f_k = \frac{19,6 \cdot 0,26}{98} = 0,052 \text{ мм};$$

для полосы 36×5 мм

$$\Delta f_k = \frac{68,6 \cdot 0,26}{98} = 0,18 \text{ мм}.$$

Биение валков чистой клетки колеблется в пределах 0,08—0,12 мм. С учетом биения валков изменение высоты полосы

$$\delta = \Delta f_k + \Delta c = 0,18 + 0,1 = 0,28 \text{ мм}.$$

Допускаемые отклонения по толщине полосы согласно ГОСТ 103—57 равны +0,3 и —0,5 мм. Таким образом, изменение высоты полосы, вызванное биением валков и колебанием давления, составляет 35% общего поля допусков.

На рис. 20 представлены графики изменения давления по проходам при прокатке двутавровой балки № 10, швеллера № 12 и автомобильного обода «Урал-375» на среднесортном стане 550.

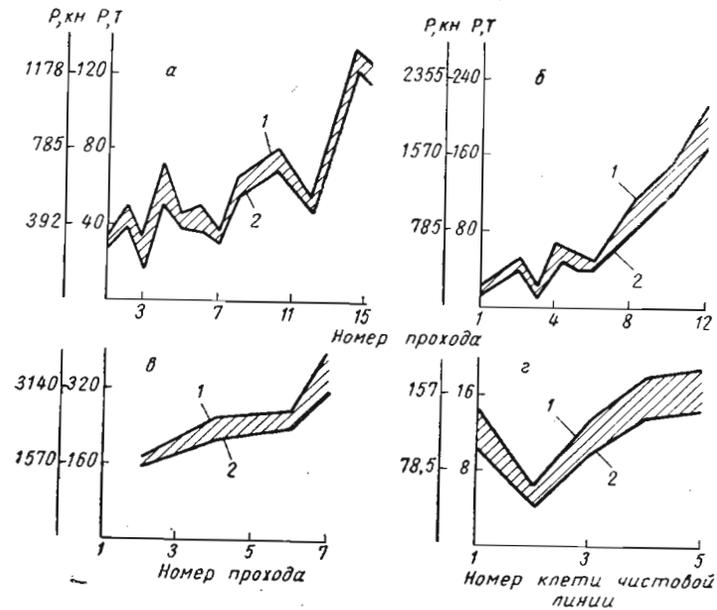


Рис. 20. Давление металла на валки при прокатке фасонных профилей в различных проходах:  
а — двутавровая балка № 10; б — швеллер № 12; в — автомобильный обод «Урал-375»; г — оконнорамный № 6; 1 —  $P_{\max}$ ; 2 —  $P_{\min}$

Повышение давления при прокатке балки № 10 (рис. 20, а) происходит в предчистовом и чистовом проходах, что объясняется сравнительно низкой температурой конца прокатки. Колебания давления в чистой клетке достигают 196 кН (20 Т).

При прокатке швеллера № 12 (рис. 20, б) давление постепенно растет в последних клетях, достигая в предчистовой клетке 2158 кН (220 Т) и в чистой 1962 кН (200 Т). Разница между максимальным и минимальным давлением в предчистовой клетке составляет 490 кН (50 Т), т. е. около 25% среднего полного давления.

Для автомобильного обода «Урал-375» давление значительно больше, чем при прокатке других профилей, и достигает 2550 кН

(260 T) в предчистовой и 3924 кн (400 T) в чистовой клетях (рис. 20, в). Колебания давления в последнем проходе достигают 883 кн (90 T).

Изменение давления по клетям при прокатке оконнорамного профиля № 6 в чистовой линии мелкосортного стана 260 показано на рис. 20, г. Наибольшее давление наблюдается в чистовой клетке 5 и составляет 172 кн (17,5 T). Разница между максимальным и минимальным давлением в чистовом проходе достигает 44 кн (4,4 T), т. е. почти 27% среднего полного давления.

Приведенные экспериментальные данные показывают, что значительные изменения давления металла на валки происходят за счет неравномерного нагрева прокатываемых полос в предчистовых и чистовых клетях сортовых станов. Разность между максимальным и минимальным давлениями в чистовых проходах достигает 25% от полного давления, что оказывает существенное влияние на точность размеров готового проката.

Возможные отклонения размеров готового проката могут быть найдены расчетным путем, если известна упругая деформация чистовой клетки, биение валков и полное усилие прокатки:

$$\delta = \frac{P_{\max} - P_{\min}}{P} \bar{f}_k + \Delta c, \quad (25)$$

где  $\bar{f}_k$  — упругая деформация клетки при давлении  $P$ , кн;  
 $\Delta c$  — биение валков, мм.

Полное давление металла на валки выражается формулой

$$P = F p_c, \quad (26)$$

где  $F$  — площадь контактной поверхности;  
 $p_c$  — среднее удельное давление.

Контактную поверхность можно определить по уравнениям, приведенным в работах [30, 31]. При прокатке полосы на гладких валках и в ящичных калибрах

$$F = \frac{b_0 + b_1}{2} \sqrt{R \Delta h}, \quad (27)$$

где  $b_0$  и  $b_1$  — ширина полосы до и после прокатки;  
 $R$  — радиус валка по дну калибра;  
 $\Delta h$  — линейное обжатие.

При прокатке квадратной полосы в овальном калибре

$$F = 0,54 (b_0 + b_1) \sqrt{R \Delta h}. \quad (28)$$

При прокатке овальной полосы в квадратном и круглом калибрах

$$F = 0,75 b_1 \sqrt{R \Delta h}. \quad (29)$$

При прокатке ромбической полосы в квадратном калибре и квадратной полосы в ромбическом калибре

$$F = (0,67 \div 0,78) b_1 \sqrt{R \Delta h}. \quad (30)$$

При прокатке в угловых и зетовых калибрах

$$F = \frac{b_0 + b_1}{2} \sqrt{R_c \Delta h_c}, \quad (31)$$

где  $R_c$  — средний радиус валка;  
 $\Delta h_c$  — среднее вертикальное обжатие.

При прокатке в швеллерных и балочных калибрах

$$F = 0,85 \frac{b_0 + b_1}{2} \sqrt{R_c \Delta h_c}. \quad (32)$$

Трудности при использовании формулы (26) возникают в связи с определением среднего удельного давления, так как оно представляет собой сложную функцию многих переменных: предела текучести металла, скорости и степени деформации, угла захвата, радиуса валков, коэффициента внешнего трения, величины обжатия и другие. Для определения удельного давления как при прокатке на гладкой бочке, так и в калибрах Целиковым [21], Гелеи [32], Королевым [33], Чекмаревым [34] и другими исследователями предложен ряд формул, полученных теоретическим путем.

В общем случае формула для определения среднего удельного давления имеет вид

$$p_c = \beta \sigma_s n_\sigma n_v n_n, \quad (33)$$

где  $\sigma_s$  — предел текучести при линейном статическом растяжении (сжатии);

$n_\sigma$  — коэффициент напряженного состояния, учитывающий влияние внешнего трения, внешних недеформируемых зон и натяжения;

$n_v$  — коэффициент, учитывающий влияние скорости прокатки и степени деформации на предел текучести;

$n_n$  — коэффициент, учитывающий упрочнение металла (наклеп) при деформации;

$\beta$  — коэффициент, учитывающий влияние среднего главного напряжения.

Произведение  $\sigma_s$  на коэффициенты  $n_v$  и  $n_n$  представляет собой не что иное, как истинный предел текучести (сопротивление деформации), т. е.

$$\sigma_n = \sigma_s n_v n_n.$$

При подстановке истинного предела текучести в формулу (33) получим

$$p_c = \beta \sigma_n n_\sigma. \quad (34)$$

Все известные формулы сложны по своей структуре и не позволяют быстро и с достаточной степенью точности рассчитать среднее удельное давление. Приближенное значение среднего

удельного давления может быть найдено по известной формуле А. И. Целикова, а также по предложенной А. П. Чекмаревым и И. А. Чекмаревым формуле

$$p_{\text{ср}} = 2k \left\{ 1 + \frac{1,5 R \alpha}{H + 2h} \left[ f' - \alpha \left( \frac{1}{3} + \frac{1}{4} \frac{\alpha}{f'} \right) \right] \right\}, \quad (35)$$

где  $\alpha$  — угол захвата, рад;  
 $H$  и  $h$  — начальная и конечная высота прокатываемой полосы, мм;  
 $f'$  — коэффициент трения, определяемый по закону Зинбеля и не превышающий 0,5.

Значение  $k$  определяют из выражения  $2k = \beta \sigma_n$ .

Полное давление металла на валки можно определить экспериментальным путем с помощью месдоз, устанавливаемых под нажимными винтами. Некоторые рабочие клетки обычной конструкции подвергаются предварительному нагружению для устранения люфтов между соприкасающимися деталями. Замеры полного давления в таких клетях имеют ряд особенностей. Так, например, в чистовой клетке (рис. 21) мелкосортного стана верхний валок фиксируется относительно выступов стоек станин 7 винтовым установочным механизмом. При этом средние 9 и верхние 5 подушки с подшипниками 6 и 8, подставки 4, предохранительные стаканы (месдозы) 3, винты 1 и гайки 2 предварительно сжимаются с силой  $P_c$ . При установке месдоз между верхними подушками и нажимными винтами они подвергаются предварительному сжатию и нагружению от

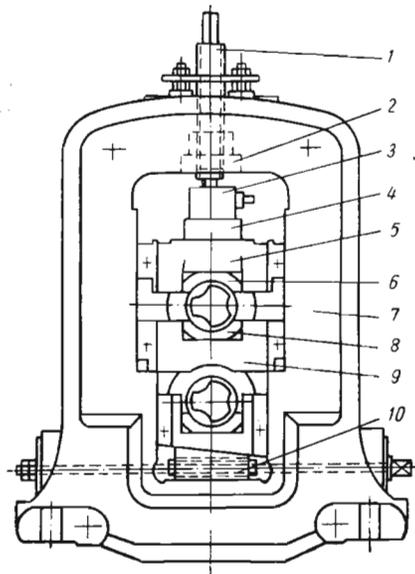


Рис. 21. Чистовая клетка мелкосортного стана

давления прокатки. Поэтому усилие, воспринимаемое месдозами, зависит от величины предварительного сжатия и от давления прокатываемого металла. Зазор между рабочими валками регулируется нижним клиновым установочным механизмом 10.

Под действием предварительного нагружения верхняя часть станин растягивается. Суммарная деформация нагруженных деталей, кроме средних подушек 9 с подшипниками 8, составит

$$f = \sum_{i=1}^n f_i = P_c \left( \frac{H_1}{F_1 E_1} + \frac{H_2}{F_2 E_2} + \dots + \frac{H_n}{F_n E_n} \right), \quad (36)$$

где  $H$ ,  $F$  и  $E$  — соответственно высота, площадь поперечного сечения и модуль упругости материала данной детали.

Выражая коэффициент жесткости детали через  $c_i = \frac{F_i E_i}{H_i}$

и подставляя его в уравнение (36), получим

$$f = P_c \left( \frac{1}{c_1} + \frac{1}{c_2} + \dots + \frac{1}{c_n} \right) = P_c \frac{1}{c_{\text{сб}}}, \quad (37)$$

где  $c_{\text{сб}}$  — общий коэффициент жесткости всех нагруженных деталей.

Деформация средних подушек с подшипниками будет

$$f_{\text{п.в}} = P_c \left( \frac{1}{c_{\text{п}}} + \frac{1}{c_{\text{в}}} \right) = P_c \frac{1}{c_{\text{п.в}}}, \quad (38)$$

где  $c_{\text{п}}$  — коэффициент жесткости подушек;

$c_{\text{в}}$  — коэффициент жесткости текстолитовых вкладышей;

$c_{\text{п.в}}$  — общий коэффициент жесткости подушек с подшипниками.

Во время прокатки под действием давления металла на валки  $P$  происходит разгрузка средних подушек подшипников и дополнительная нагрузка на винты, стаканы и другие детали. Усилие, сжимающее эти детали и растягивающее станины, будет

$$P_{\text{сб}} = (f + f') c_{\text{сб}} = P_c + \Delta P, \quad (39)$$

где  $f'$  — изменение суммарной деформации предварительно напряженных деталей (изменение упругой деформации средних подушек с подшипниками);

$\Delta P$  — приращение усилия, действующего на напряженные детали:

$$\Delta P = f' c_{\text{сб}}. \quad (40)$$

В этом случае средние подушки с подшипниками будут сжаты силой

$$P_{\text{п.в}} = P_{\text{сб}} - P = P_c + \Delta P - P, \quad (41)$$

а их упругая деформация составит

$$f_{\text{п.в}} - f' = \frac{P_{\text{п.в}}}{c_{\text{п.в}}} = \frac{P_c + \Delta P - P}{c_{\text{п.в}}}. \quad (42)$$

Из уравнения (42) найдем изменение упругой деформации средних подушек с подшипниками

$$f' = \frac{P}{c_{\text{п.в}} + c_{\text{сб}}}. \quad (43)$$

Подставляя в уравнение (40) значение  $f'$ , получим

$$P = \Delta P \frac{c_{\text{п.в}} + c_{\text{сб}}}{c_{\text{сб}}}. \quad (44)$$

Следовательно, давление металла на валки из уравнения (41) будет равно

$$P = P_c + \Delta P - P_{п.в}. \quad (45)$$

Так как в процессе работы стана необходимо производить подстройку измерительной аппаратуры, то, следовательно, первоначальное нагружение деталей клетки должно быть зафиксировано до начала прокатки. В момент нахождения полосы в рабочих валках фиксируется только приращение давления  $\Delta P$ , а не давление прокатки.

На практике имеют место два случая предварительного нагружения деталей клетки:

1.  $P_c < P$ . Средние подушки во время прокатки находятся в свободном состоянии, т. е.  $P_{п.в} = 0$ . Тогда давление металла на валки согласно уравнению (45) будет

$$P = P_c + \Delta P.$$

Этот случай наиболее характерен для рабочих клеток сортовых станов.

2.  $P_c \geq P$ . Средние подушки при прокатке находятся в сжатом состоянии. Так как усилие их сжатия обычно не измеряется, то давление металла на валки может быть определено по формуле (44).

Общие коэффициенты жесткости  $c_{п.в}$  и  $c_{сб}$  находят расчетным путем из выражений

$$\frac{1}{c_{п.в}} = \frac{1}{c_п} + \frac{1}{c_в} \quad \text{и} \quad \frac{1}{c_{сб}} = \frac{1}{c_1} + \frac{1}{c_2} + \dots + \frac{1}{c_n}.$$

Опыты показали, что предварительное нагружение деталей, воспринимающих усилие прокатки в клетях мелкосортных и проволочных станов, соизмеримо с величиной полного давления металла на валки и должно быть учтено при его замерах.

#### МЕЖКЛЕТЕВОЕ НАТЯЖЕНИЕ МЕТАЛЛА

Существенное влияние на точность прокатываемого профиля оказывает натяжение, которое вызывает понижение давления металла на валки и уменьшение поперечного сечения средней части полосы по сравнению с передним и задним концами. Нередко утяжка средней части полосы превышает минусовой допуск, что снижает сортность прокатной продукции.

Изменение давления металла на валки под действием натяжения может быть приближенно рассчитано по упрощенной формуле Целикова [21, 35].

$$\Delta P = P - P_n = \frac{e^m - 1}{2f} Q, \quad (46)$$

где  $P_n$  — давление металла на валки при наличии натяжения;  
 $e$  — основание натуральных логарифмов;  
 $Q$  — сила натяжения;  
 $f$  — коэффициент трения;  
 $m$  — коэффициент, определяемый из выражения

$$m = \frac{2fl}{h_0 + h_1},$$

здесь  $l$  — длина дуги захвата;  
 $h_0$  и  $h_1$  — начальная и конечная толщина полосы.

Мерой рассогласования скоростного режима непрерывной прокатки является соотношение

$$\varepsilon = \left( \frac{\Delta V_{i+1}}{V_{i+1}} - \frac{\Delta V_i}{V_i} \right) 100\%, \quad (47)$$

где  $\varepsilon$  — коэффициент рассогласования;  
 $V_i$  — окружная скорость валков предыдущей клетки;  
 $V_{i+1}$  — окружная скорость валков последующей по ходу прокатки клетки.

На практике для выражения рассогласования скоростного режима удобнее пользоваться соотношением чисел оборотов рабочих валков. Рассогласование скоростей вращения валков двух смежных клеток определяют из соотношения

$$\varepsilon = \left( \frac{\Delta n_{i+1}}{n_{i+1}} - \frac{\Delta n_i}{n_i} \right) 100\%, \quad (48)$$

где  $n_i$  и  $n_{i+1}$  — соответственно числа оборотов валков предыдущей и последующей клеток, при которых процесс непрерывной прокатки протекает без натяжения и петлеобразования, т. е.  $\varepsilon = 0$ ;

$\Delta n_i$  и  $\Delta n_{i+1}$  — приращения чисел оборотов валков предыдущей и последующей клеток, вызывающие натяжение.

В частном случае, когда число оборотов валков предыдущей клетки не изменяется, рассогласование скоростей валков будет

$$\varepsilon = \frac{\Delta n_{i+1}}{n_{i+1}} 100\%. \quad (49)$$

Экспериментальное исследование влияния натяжения на точность размеров проката проведено на мелкосортном стане 260, чистовая и предчистовая клетки которого представляют собой непрерывную группу. При различных рассогласованиях скоростей вращения валков прокатывали квадрат 16 мм, круг 16 мм и полосу 36 × 6 мм. Исследования показали, что с увеличением рассогласования скоростей вращения валков в чистовой и предчистовой клетях падает давление металла на валки и уменьшается высота и ширина готового профиля.

На рис. 22,а представлены построенные по усредненным данным графики изменения высоты диагонали квадрата 16 мм, вертикального диаметра круга 16 мм и толщины полосы 36×6 мм. Фактические отклонения размеров по высоте наблюдались в интервале от 21,75 до 22,2 мм для квадрата, от 16,2 до 16,35 мм для круга и от 6,25 до 6,4 мм для полосы.

Более существенное влияние оказывает межклетевое натяжение на ширину профиля (рис. 22,б). Так, утяжка горизонтальной диагонали квадрата 16 мм при рассогласовании  $\varepsilon=8\%$  достигала 2 мм. Для круга 16 мм и полосы 36×6 мм при рассогласовании  $\varepsilon=12\%$  утяжка составляла соответственно 1,7 и 2,1 мм. Оп-

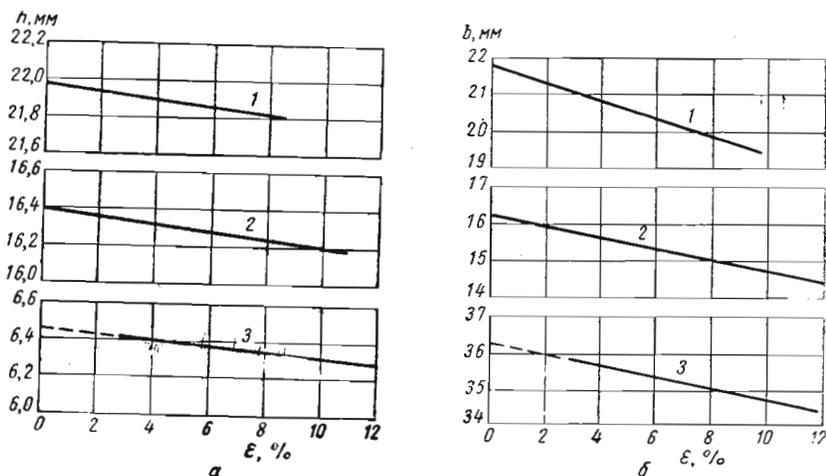


Рис. 22. Влияние рассогласования скоростей вращения валков на высоту проката (а) и ширину проката (б):

1 — квадрат 16 мм; 2 — круг 16 мм; 3 — полоса 36×6 мм

тимальная величина рассогласования скоростей валков, при которой утяжка профиля не превышает 0,4 мм, и в случае, если процесс прокатки с натяжением протекает устойчиво, составляет 2—4%.

Данные замеров усилия прокатки в отделочных клетях подтверждают положение о том, что с увеличением натяжения уменьшается давление металла на валки. Так, например, при прокатке квадрата 16 мм снижение полного и среднего удельного давления в предчистовой клетке составляло 12—15% и в чистой клетке 8—10%.

Исследования режима натяжения на непрерывном мелко-сортном стане 300, проведенные Выдриным, Бойко и др. [29, с. 189—195], показали, что в результате натяжения отклонения по толщине полок уголка 45×45×3 мм составляли —0,2 и +0,3 мм. Разница в толщинах переднего и заднего концов поло-

сы достигала 0,07 мм. Прокатанные с натяжением в чистой клетке круги диаметром 19 мм и полосы 50×8 мм замеряли на холодильнике при 200—300°C. Данные замеров свидетельствуют о том, что в зависимости от величины рассогласования скоростей вращения валков, а следовательно, и натяжения полос существует значительная разница по ширине. Так, для круга диаметром 19 мм при рассогласовании в чистой клетке свыше 2% размер профиля по ширине выходит за минусовой допуск.

Прокатка с натяжением круга диаметром 20 мм и квадрата стороной 16 мм на непрерывном мелко-сортном стане 250 показала, что размеры чистового круга при напряжении растяжения не более 8,8 кн (0,88 кг/мм<sup>2</sup>) были в пределах поля допусков, утяжка горизонтального диаметра по отношению к номинальному размеру составляла 0,4 мм. При прокатке квадрата натяжение оказывает более заметное влияние на заполнение чистового калибра — утяжка горизонтальной диагонали квадрата достигает 1 мм [36]. Таким образом, получение профиля точных размеров по всей длине раската на непрерывном стане возможно при прокатке с петлей или с регулируемым натяжением.

Значительный практический интерес представляет разработка и внедрение на станах непрерывной и бесконечной прокатки постоянно действующих устройств для контроля межклетевого натяжения проката. Постоянный контроль натяжения позволит учесть межклетевую деформацию металла, внести необходимые поправки в калибровку валков, ускорить освоение прокатки фасонных профилей на высокопроизводительных станах и разработать рациональные системы автоматического регулирования размеров проката.

### Глава III

## УПРУГАЯ ДЕФОРМАЦИЯ ПРОКАТНОЙ КЛЕТИ

### ДОПУСКАЕМАЯ УПРУГАЯ ДЕФОРМАЦИЯ КЛЕТИ

Учитывая, что прокатка профиля должна производиться в пределах допускаемых отклонений от номинала, связь между высотой калибра, деформацией чистой клетки и размером готового профиля можно выразить неравенством

$$N - n < K + f_k < N + m, \quad (50)$$

где  $K$  — установочная высота калибра с учетом усадки профиля;  
 $f_k$  — общая упругая деформация клетки, изменяющаяся в процессе прокатки;  
 $N$  — номинальный размер профиля по высоте;  
 $m$  и  $n$  — абсолютные величины плюсового и минусового допусков для данного размера профиля соответственно.

Из неравенства (50) следует, что в процессе прокатки сумма высоты калибра и упругой деформации клетки должна быть больше минимального и меньше максимального допускаемого размера профиля по высоте. Предусмотренные ГОСТом отклонения размеров профиля позволяют вести прокатку как с плюсовыми, так и с минусовыми допусками.

Вести прокатку с плюсовым допуском экономически нецелесообразно. Однако в силу некоторых технических и технологических причин на многих заводах применяется прокатка с плюсовыми допусками. При этом связь между высотой калибра, деформацией клетки и размером профиля будет выглядеть следующим образом:

$$N < K + f_k < N + m, \quad (51)$$

откуда следует, что величина упругой деформации клетки может находиться в следующих границах:

$$N - K < f_k < N + m - K. \quad (52)$$

Рассмотрим возможные значения допускаемой величины  $f_k$  в зависимости от установочной высоты калибра (рис. 23).

1. Если  $K = N + m$ , то

$$f_k < 0. \quad (52a)$$

Так как упругая деформация клетки не может быть меньше нуля, то размер прокатываемого профиля выйдет за пределы плюсового допуска.

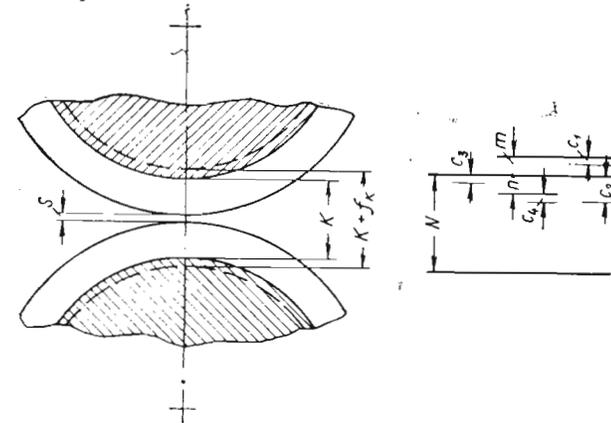


Рис. 23. Схема к расчету допускаемой величины упругой деформации клетки

2. Если  $K < N + m$  и  $N + m - K = c_1$ , где  $m > c_1 > 0$ , то

$$c_1 - m < f_k < c_1$$

или

$$0 < f_k < c_1. \quad (52б)$$

3. Если  $K = N$ , то

$$0 < f_k < m. \quad (52в)$$

Так же, как и во втором случае, упругая деформация клетки не должна превышать плюсовой допуск.

4. Если  $K < N$  и  $N - K = c_2$ , где  $s > c_2 > 0$ , а  $s$  — зазор между валками, то

$$c_2 < f_k < m + c_2. \quad (52г)$$

Для этого случая характерна наиболее часто встречающаяся настройка рабочих валков при прокатке с плюсовым допуском. Это вызвано тем, что общая упругая деформация чистой клетки обычно превышает величину плюсового допуска, предусмотренного для проката данного размера.

Прокатка профилей с минусовыми допусками (кроме инструментальных сталей, имеющих только плюсовой допуск) может дать народному хозяйству очень большую экономию металла.

Однако для перехода на такую прокатку необходимы более жесткие прокатные клетки.

Связь между высотой калибра, деформацией клетки и размером профиля при прокатке с минусовыми допусками можно выразить неравенством

$$N > K + f_k > N - n, \quad (53)$$

из которого следует, что величина упругой деформации клетки может лежать в следующих пределах:

$$N - K > f_k > N - n - K. \quad (54)$$

Рассмотрим возможные значения допускаемой величины  $f_k$  в зависимости от установочной высоты калибра.

1. Если  $K=N$ , то

$$0 > f_k > -n, \quad (54a)$$

т. е. прокатка невозможна.

2. Если  $K < N$  и  $N - K = c_3$ , где  $n > c_3 > 0$ , то

$$c_3 > f_k > c_3 - n. \quad (54б)$$

3. Если  $K = N - n$ , то

$$n > f_k > 0. \quad (54в)$$

Здесь, как и во втором случае, упругая деформация клетки не должна превышать минусового допуска.

4. Если  $K < N - n$  и  $N - n - K = c_4$ , где  $s > c_4 > 0$ , то

$$n + c_4 > f_k > c_4. \quad (54г)$$

Этот случай наиболее часто встречается при прокатке по минусовому допуску.

Неравенства (52г) и (54г) показывают, что при значительной деформации клетки минимальная установочная высота калибра ограничена величиной зазора между валками. Прокатка без зазора возможна в листовом производстве, где допускается соприкосновение рабочих валков, один из которых неприводной.

Для повышения точности проката необходимо уменьшение упругой деформации клетки, которая, как правило, превышает поле допусков. Поскольку отношение величины упругой деформации клетки к допускаемым отклонениям определяет точность проката, то это отношение характеризует и жесткость конструкции клетки.

По жесткости сортовые прокатные клетки могут быть разделены на три группы: обычные клетки, у которых

$$f_k > m + n, \quad (55)$$

полужесткие клетки, у которых

$$m + n \geq f_k \geq 0,5(m + n), \quad (56)$$

и жесткие, у которых

$$f_k < 0,5(m + n). \quad (57)$$

Коэффициент жесткости прокатной клетки

$$c = \frac{P}{f_k}, \quad (58)$$

где  $P$  — полное давление металла на валки.

Подставляя значение  $f_k$  из неравенства (57), получим для жесткой клетки

$$c > \frac{P}{0,5(m + n)}. \quad (59)$$

Жесткая клетка должна обеспечить прокатку профиля в пределах допускаемых отклонений при установочной высоте калибра

$$K = N + 0,5(m + n), \quad (60)$$

а в случае прокатки инструментальных сталей ( $n=0$ ) при

$$K = N + 0,5m.$$

Анализ допускаемых отклонений по ГОСТу для различных профилей показывает, что отношение поля допусков к высоте профиля изменяется в широких пределах (рис. 24). Это отношение уменьшается с увеличением размера профиля и составляет: для квадрата — от 5 до 1,7%, для круга — от 8 до 1,7%, для рессорно-пружинной полосы — от 14 до 2,2%, для уголка — от 23 до 4,3% и т. д.

Обозначим отношение поля допусков к высоте профиля

$$\frac{m + n}{N} 100 = A, \%$$

тогда

$$m + n = \frac{AN}{100}. \quad (61)$$

Подставляя в неравенство (57) значение поля допусков, получим для жесткой клетки

$$f_k < 0,5 \frac{AN}{100}. \quad (62)$$

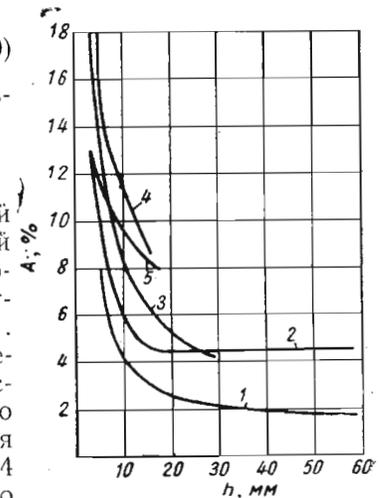


Рис. 24. Изменение отношения поля допусков к высоте в зависимости от высоты профиля:

1 — круглые и квадратные профили; 2 — полосы; 3 — уголки равнобокие; 4 — балки двутавровые; 5 — швеллеры

Дальнейшее уменьшение отношения поля допуска к высоте профиля, очевидно, целесообразно при увеличении жесткости рабочих клетей, поскольку только в таких клетях возможно будет получать прокат с минимальными отклонениями размеров.

Количество одновременно прокатываемых полос в одной клетке на точность профиля оказывает наибольшее влияние в проволочных и мелкосортных станах. С изменением числа полос изменяется давление металла на валки и общая упругая деформация клетки. На проволочных линейных станах при прокатке одной нитки высота калибра уменьшается, так что вертикальный диаметр катанки может выйти за минимальный размер. При прокатке пяти—шести ниток, наоборот, высота калибра увеличивается и вертикальный диаметр более холодного заднего конца полосы может превысить максимальный размер. Исследования, проведенные на проволочном стане линейного типа, где прокатку ведут в одну—четыре нитки, показали, что при добавке одной нитки площадь сечения каждой из прокатываемых полос увеличивается примерно на  $1 \text{ мм}^2$  [37].

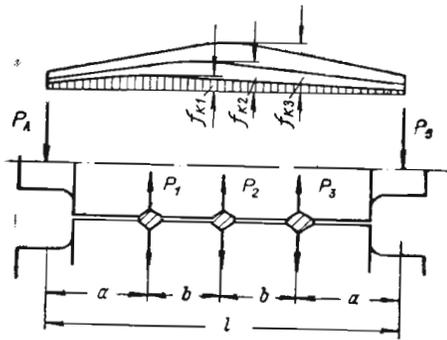


Рис. 25. Схема прокатки в три нитки ( $f_{к1}$ ,  $f_{к2}$  и  $f_{к3}$  — упругая деформация клетки при прокатке одной, двух и трех ниток)

Прокатку сортовых профилей на действующих станах в две—три нитки по суммарным допускам трудно осуществить ввиду недостаточной жесткости конструкций отделочных клетей и нерационального их расположения. По этой же причине на линейных проволочных станах невозможно получить катанку точных размеров.

При одновременной прокатке трех ниток, симметрично расположенных относительно оси клетки (рис. 25), упругая деформация последней достигает максимума, а отклонения размеров профиля могут выйти за плюсовой допуск. В этом случае нагрузка на шейки валка будет

$$P_A = P_B = \frac{P_1 + P_2 + P_3}{2}, \quad (63)$$

где  $P_1$ ,  $P_2$  и  $P_3$  — давление металла на валки при прокатке первой, второй и третьей ниток.

В момент выхода из валков одной из ниток нагрузка на шейки изменяется в зависимости от места расположения оставшихся ниток. Так, если из валков вышла средняя нитка, то

$$P_A = P_B = \frac{P_1 + P_3}{2}, \quad (64)$$

а если вышла крайняя, например третья нитка, тогда

$$P_A = (P_1 + P_2) \frac{a + 1,5b}{l}; \quad (65)$$

$$P_B = (P_1 + P_2) \frac{a + 0,5b}{l}. \quad (66)$$

Упругая деформация клетки будет минимальной, когда прокатывается только одна из крайних ниток. В этом случае отклонения размеров профиля могут выйти за минусовой допуск. Нагрузка на шейки валка при прокатке одной, например первой нитки, будет

$$P_A = P_1 \frac{2b + a}{l}; \quad (67)$$

$$P_B = P_1 \frac{a}{l}. \quad (68)$$

При многониточной прокатке изменение упругой деформации клетки возрастает с увеличением числа прокатываемых ниток. Величина этого изменения составит:

для двух ниток

$$\Delta f_k = \Delta f_1 + f_2;$$

для трех ниток

$$\Delta f_k = \Delta f_1 + f_2 + f_3;$$

для  $n$  ниток

$$\Delta f_k = \Delta f_1 + f_2 + \dots + f_n$$

или

$$\Delta f_k = \Delta f_1 + \sum_{i=2}^n f_i \quad (69)$$

где  $\Delta f_1$  — изменение упругой деформации клетки при прокатке одной нитки;

$f_i$  — упругая деформация клетки при прокатке  $i$ -той нитки.

Принимая  $f_2 = f_3 = \dots = f_n = f$ , получим

$$\Delta f_k = \Delta f_1 + (n - 1)f. \quad (70)$$

Подставляя значение  $\Delta f_k$  в уравнение (12), найдем минимальное поле допусков

$$\delta_{\min} = \Delta f_1 + (n - 1)f + \Delta c. \quad (71)$$

Рабочее поле допусков при многониточной прокатке будет

$$\delta_{\text{раб}} = \Delta f_1 + (n - 1)f + \Delta c + \Delta h_t + \Delta h_p + \Delta h_n, \quad (72)$$

где  $n$  — число одновременно прокатываемых ниток.

Из уравнения (72) следует, что с увеличением числа ниток резко возрастает рабочее поле допусков. Точность размеров существенно снижается при изменении числа прокатываемых ниток.

Допускаемое количество одновременно прокатываемых ниток найдем следующим образом. Полагая, что во время прокатки изменение упругой деформации чистовой клетки не должно превышать величины рабочего поля допусков, получим

$$\Delta f_k \leq \delta_{\text{раб}}, \quad (73)$$

поскольку в противном случае профиль выйдет в брак по размерам.

Подставляя в неравенство (73) значение  $\Delta f_k$  из уравнения (70), получим

$$\Delta f_1 + (n - 1)f \leq \delta_{\text{раб}},$$

откуда

$$n \leq \frac{\delta_{\text{раб}} - \Delta f_1}{f} + 1. \quad (74)$$

Из неравенства (74) следует, что количество одновременно прокатываемых ниток, при прочих равных условиях, зависит от жесткости конструкции клетки.

Возможность многониточной прокатки того или иного профиля на действующем стане может быть определена на основе стандартных допусков на размеры проката. В этом случае неравенство (73) примет вид

$$\Delta f_k \leq \delta_{\text{ст}}, \quad (75)$$

где  $\delta_{\text{ст}}$  — абсолютная величина стандартного допуска.

Подставляя в неравенство (75) значение  $\Delta f_k$  из уравнения (70), после преобразования получим

$$n \leq \frac{\delta_{\text{ст}} - \Delta f_1}{f} + 1. \quad (76)$$

Пример. Определить количество ниток уголка  $32 \times 32 \times 4$  мм, которые можно одновременно прокатать в чистовой клетке мелкосортного стана 280. Упругая деформация клетки колеблется в пределах  $0,485 \div 0,6$  мм. Допускаемые отклонения размеров по толщине полки уголка составляет  $\pm 0,4$  мм.

Изменение упругой деформации клетки при прокатке одной нитки будет

$$\Delta f_k = 0,6 - 0,485 = 0,115 \text{ мм.}$$

Абсолютная величина поля допусков составит

$$\delta_{\text{ст}} = 2 \times 0,4 = 0,8 \text{ мм.}$$

По формуле (76) найдем

$$n \leq \frac{0,8 - 0,115}{0,6} + 1 = 2,14.$$

Таким образом, в чистовой клетке допускается прокатка двух ниток уголка  $32 \times 32 \times 4$  мм.

Возможность двухниточной прокатки угловых профилей с толщиной полки 3—5 мм из сталей Ст.3 и Ст.5 подтверждена исследованиями, проведенными на мелкосортном стане 280 [38]. При прокатке тонкостенного уголка  $32 \times 32 \times 3$  мм из Ст.5 продольная разнотолщинность не выходит за пределы допуска. Чтобы уменьшить перерасход металла и обеспечить устойчивую работу стана, следует заменить предчистовую и чистовую клетки более жесткими.

## МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УПРУГОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Толщина полосы, выходящей из рабочих валков, увеличивается по сравнению с первоначальной высотой калибра на величину упругой деформации клетки. Поэтому рабочие валки должны быть установлены так, чтобы при изменениях давления прокатки размеры полосы не вышли за пределы допуска. При известной величине упругой деформации клетки можно быстро произвести настройку стана, избежать брака по толщине профиля, устранить недостаточно жесткие детали клетки и повысить точность размеров проката. Для определения упругой деформации рабочей клетки существует несколько методов.

### Эмпирический метод

Упругая деформация клетки при сравнительно больших обжатиях приблизительно равна 1% от диаметра валка

$$f_k = 0,01 D, \quad (77)$$

где  $D$  — диаметр валка, мм.

При этом подразумевается, что с увеличением диаметра валка пропорционально растет его длина и полное давление прокатки, т. е. соблюдается геометрическое подобие [39].

Этот метод является сугубо ориентировочным и не применим для чистовых клетей сортовых станов.

Опытные замеры и расчеты показывают, что упругая деформация чистовых клетей значительно меньше и может быть приближенно определена по формуле

$$f_k = (0,002 - 0,004) D. \quad (78)$$

### Прокатка свинцовых полос

Упругую деформацию клетки определяют по разности высот свинцовых полос, прокатанных в одном и том же калибре на холостом ходу и полной нагрузке стана. Прокатку полос на холостом ходу желательно вести с обжатием, достаточным для устранения зазоров и люфтов между соприкасающимися деталями. Общую упругую деформацию клетки можно определить как

$$f_k = h_2 - h_1, \quad (79)$$

где  $h_1$  — средняя высота полос при холостом ходе стана, мм;

$h_2$  — средняя высота полос, прокатанных одновременно с основным профилем, мм.

К недостаткам этого метода следует отнести трудности при устранении зазоров и люфтов между деталями, что значительно снижает точность замеров.

### Опытно-расчетный метод

Общую упругую деформацию клетки определяют замером 30—40 полос, прокатанных в последних калибрах. Замеры производят по переднему концу полос с фиксацией температуры прокатки. Необходимо, чтобы во время наблюдения колебания температуры отдельных полос лежали в широких пределах. Полученные опытные данные наносят на график (рис. 26). Пользуясь графиком, определяют изменение размеров профиля в пределах замеренных температур.

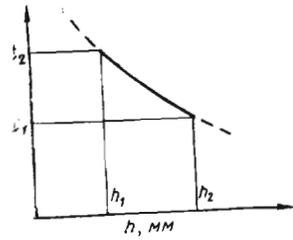


Рис. 26. График зависимости высоты профиля от температуры прокатки

По формуле Экелунда [21] рассчитывают величину падения давления прокатки  $\Delta P$ , %, при повышении температуры полос от  $t_1$  до  $t_2$ . Зная изменение размеров профиля, находят общую упругую деформацию клетки при температуре полосы  $t_1$  по уравнению [3]

$$f_k = \frac{100(h_2 - h_1)}{\Delta P}, \quad (80)$$

где  $f_k$  — упругая деформация клетки при температуре полосы  $t_1$ ;

$h_2 - h_1$  — изменение высоты профиля при понижении температуры полосы от  $t_2$  до  $t_1$ .

Упругая деформация клетки, определенная изложенным методом, является недостаточно точной, так как формула Экелунда для расчета давления металла на валки имеет ряд допущений.

### Расчетный метод

Детали клетки во время прокатки подвергнуты сжатию (подшипники, подушки, нажимные винты, гайки), растяжению (стойки станин, стяжные болты) и изгибу (поперечины станин, рабочие валки). Величина деформации отдельных деталей зависит от величины и характера приложения нагрузки. Общая упругая деформация клетки равна сумме упругих деформаций всех ее деталей:

$$f_k = \sum_{i=1}^n f_i. \quad (81)$$

Расчетные формулы для определения упругой деформации отдельных узлов и деталей клетки приведены в следующем параграфе.

### Метод нагружения клетки нажимным устройством

Упругую деформацию определяют опытным путем на неработающей клетке. Для замера давления между нажимными винтами и подушками устанавливают месдозы. Нагружение клетки производят посредством нажимных винтов при неподвижных валках, между которыми помещают полосу, соответствующую форме калибра для учета прогиба валков. В момент соприкосновения валков с полосой фиксируют показания лимба нажимного устройства. Для того чтобы выбрать зазоры между сопряженными деталями, после соприкосновения валков с полосой нагружают на 9,8—19,6 кН (1—2 Т). Это положение принимается за начало отсчета. При дальнейшем сближении валков периодически фиксируют показания лимба и усилия, воспринимаемые месдозами. По результатам замеров строят график, на котором по оси ординат откладывают усилие сжатия валков, а по оси абсцисс — общую упругую деформацию клетки.

Деформация прокатных клетей, определяемая описанным методом, может быть замерена с достаточной степенью точности при надежной работе применяемой измерительной аппаратуры.

### Метод нагружения валков клиновым устройством

Упругую деформацию определяют при установке клетки на стенде или непосредственно на стане. Нагружение клетки производят перемещением клина между рабочими валками при помощи винтового или гидравлического устройства. Величину нагрузки замеряют с помощью месдоз, установленных под нажимными винтами, или определяют пересчетом усилия, действующего на клин со стороны гидравлического устройства. По мере перемещения клина нагрузка на клеть возрастает, следовательно, увеличивается высота щели между рабочими валками. Эту щель замеряют щупом или индикаторным нутромером. Фиксируя периодически давление и соответствующее ему перемещение валков, находят общую упругую деформацию клетки.

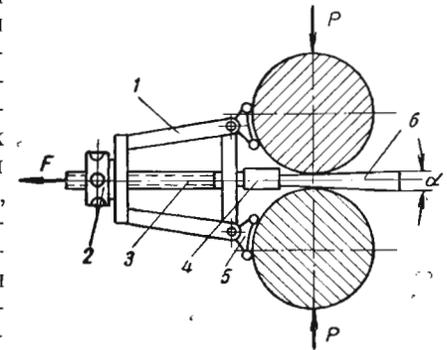


Рис. 27. Устройство для измерения упругой деформации прокатной клетки

На рис. 27 показано устройство для измерения упругой деформации клети [40], состоящее из рамы 1, натяжного винта 3 и распорного клина 6. Раму на рабочих валках устанавливают при помощи опорных башмаков 5, снабженных роликами. Между распорным клином и натяжным винтом вмонтирован датчик 4 силоизмерительного прибора. Перемещение распорного клина, имитирующее процесс прокатки, производится вращением гайки 2, опирающейся на переднюю стенку рамы.

При измерении деформации клети фиксируют усилие нагрузки и разгрузки клина силоизмерительным прибором. Давление на валки определяют на основе формы клина и усилия, требуемого для удержания клина между валками, по формуле

$$P = \frac{F_A + F_B}{2a}, \quad (82)$$

где  $F_A$  и  $F_B$  — соответственно усилие, действующее на клин при нагрузке и разгрузке;  
 $a$  — угол клина, рад.

Изменение зазора между валками, равное упругой деформации клети, рассчитывают по уравнению

$$f = 2nt \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}, \quad (83)$$

где  $n$  — число оборотов гайки;  
 $t$  — шаг резьбы винта.

Метод определения общей деформации клети при помощи нагружения рабочих валков клиновым устройством дает более точные результаты по сравнению с другими известными методами. К недостаткам указанного метода следует отнести неизбежность погрешностей при замере высоты щели между валками.

Необходимо отметить, что в технической литературе недостаточно освещены вопросы экспериментальных замеров упругой деформации сортопрокатных клетей, что, по-видимому, объясняется сложностью постановки опытов, а также отсутствием специальной измерительной аппаратуры.

#### РАСЧЕТ УПРУГОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРОКАТНОЙ КЛЕТИ

Упругая деформация отдельных узлов и деталей клети может быть определена приближенно по известным расчетным формулам. Общую деформацию клети, как отмечалось выше, находят суммированием упругих деформаций всех ее деталей (рис. 28), воспринимающих усилие прокатки.

**Рабочие валки.** Стрелу прогиба валка (рис. 28,а) можно определить по уравнению [21]

$$f = f_1 + f_2, \quad (84)$$

где  $f_1$  — стрела прогиба от действия изгибающих моментов;  
 $f_2$  — стрела прогиба от действия поперечных сил.

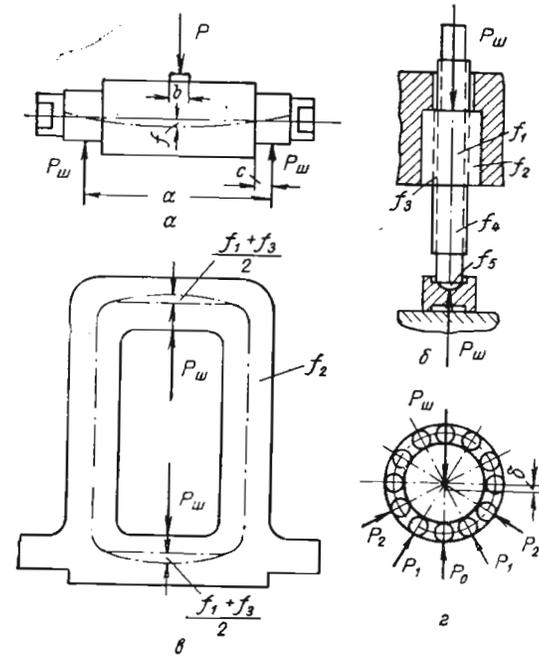


Рис. 28. Деформация деталей прокатной клети:  
 $a$  — валка;  $b$  — винтовой пары;  $\delta$  — станины;  $z$  — подшипника качения

$$f_1 = \frac{P}{18,8 ED^4} \left\{ 8a^3 - 4ab^2 + b^3 + 64c^2 \left[ \left( \frac{D}{d} \right)^4 - 1 \right] \right\}, \quad (85)$$

здесь  $D$  — диаметр бочки;  
 $d$  — диаметр шейки;  
 $P$  — давление на валок;  
 $E$  — модуль упругости материала валка;  
 $a$  — расстояние между точками приложения реакций обоих подшипников;  
 $b$  — ширина прокатываемой полосы;  
 $c$  — расстояние от точки приложения равнодействующей реакции подшипника до края бочки.

$$f_2 = \frac{P}{G\pi D^2} \left\{ a - \frac{b}{2} + 2c \left[ \left( \frac{D}{d} \right)^2 - 1 \right] \right\}, \quad (86)$$

где  $G$  — модуль сдвига.

Стрела прогиба двух валков будет

$$f_B = 2(f_1 + f_2).$$

**Подшипники.** Упругую деформацию подшипника качения (рис. 28,а) определяют по величине смещения центров внутреннего и наружного колец в направлении внешней нагрузки. Величина смещения для роликоферического подшипника может быть найдена по формуле [41]

$$\delta = \frac{300}{10^7} \sqrt[3]{\left(\frac{5R}{nz}\right)^2 \frac{1}{d_p}}, \quad (87)$$

где  $R$  — давление на подшипник;  
 $n$  — число рядов роликов;  
 $z$  — число роликов в одном ряду;  
 $d_p$  — диаметр ролика.

Упругая деформация двух подшипников качения будет

$$f_n = 2\delta.$$

Деформация сжатия подшипника скольжения определяется по формуле

$$f = \frac{Rh}{FE}, \quad (88)$$

где  $h$  — высота вкладыша;  
 $F$  — проекция площади соприкосновения вкладыша с подушкой;  
 $E$  — модуль упругости материала вкладыша.

Для двух подшипников скольжения (верхнего и нижнего) получим

$$f_n = 2f.$$

**Станины.** Расчет деформации станины закрытого типа (рис. 28,б) с учетом изгибающих моментов и поперечных сил производят по уравнению [21]

$$f_c = f_1 + f_2 + f_3, \quad (89)$$

где  $f_1$  — деформация обеих поперечин от действия изгибающих моментов;

$f_2$  — деформация стоек от действия продольных сил;

$f_3$  — деформация поперечин от действия поперечных сил.

$$f_1 = \frac{P l_1^3}{24 E I_1} - \frac{M_0 l_1^2}{4 E I_1}. \quad (90)$$

Величина удлинения стоек станины

$$f_2 = \frac{P l_2}{2 E F_2}. \quad (91)$$

Деформация от действия поперечных сил

$$f_3 = k \frac{P l_1}{2 G F_1}, \quad (92)$$

здесь  $P$  — усилие, растягивающее станину;  
 $l_1$  и  $l_2$  — длина поперечин и стоек, считая между нейтральными осями;  
 $M_0$  и  $I_1$  — изгибающий момент и момент инерции поперечины;  
 $F_1$  и  $F_2$  — площадь сечения поперечины и стойки;  
 $k$  — коэффициент, зависящий от формы сечения поперечины; для прямоугольного сечения он равен 1,2.

**Нажимные винты и гайки.** Общую деформацию винтовой пары (рис. 28,б) в вертикальном направлении можно определить по уравнению

$$f_{вп} = f_1 + f_2 + f_3 + f_4 + f_5, \quad (93)$$

где  $f_1$  — деформация тела винта на участке соприкосновения с гайкой;

$f_2$  — деформация тела гайки;

$f_3$  — деформация витков резьбы винта и гайки;

$f_4$  — деформация тела винта на участке между пятдой и гайкой;

$f_5$  — упругое сжатие пяты нажимного винта.

Величины  $f_1$ ,  $f_2$  и  $f_3$  могут быть рассчитаны по следующим формулам [42]:

$$f_1 + f_2 = \frac{2P_{ш} H}{E_r (2F_B + F_r)}, \quad (94)$$

где  $P_{ш}$  — давление на шейку валка;

$H$  — высота гайки;

$E_r$  — модуль упругости материала гайки;

$F_B$  и  $F_r$  — площади поперечного сечения винта и гайки;

$$f_3 = 1,5 q \frac{s^2 \omega k}{E_r F_p}, \quad (95)$$

здесь  $q$  — интенсивность нагрузки по высоте винтовой пары;

$s$  — шаг резьбы;

$\omega$  — коэффициент, учитывающий геометрическую форму резьбы;

$k$  — коэффициент, учитывающий прогиб витка резьбы;

$F_p$  — площадь контакта одного витка резьбы.

Для относительно мелких резьб, когда отношение шага к наружному диаметру резьбы  $\frac{s}{d_0} = 0,01 \div 0,04$ , величиной  $f_3$  можно пренебречь; при  $\frac{s}{d_0} > 0,04$  деформацию витков резьбы рекомендуют учитывать коэффициентом 1,1—1,2, тогда

при  $\frac{s}{d_0} > 0,04$  деформацию витков резьбы рекомендуют учитывать коэффициентом 1,1—1,2, тогда

$$f_1 + f_2 + f_3 = (1,1 \div 1,2) \frac{2P_{ш} H}{E_r (2F_B + F_r)}. \quad (96)$$

Деформация тела винта на участке между пятой и гайкой

$$f_4 = \frac{P_{\text{ш}} l}{F_{\text{в}} E_{\text{в}}}, \quad (97)$$

где  $E_{\text{в}}$  — модуль упругости материала винта.

Упругое сжатие сферической пяты нажимного винта и соприкасающейся с ней плоской поверхности предохранительного стакана определяют по формуле<sup>1</sup>

$$f_5 = 0,77 \sqrt[3]{\frac{P_{\text{ш}}^2}{r} \left( \frac{1}{E_{\text{в}}} + \frac{1}{E_{\text{ст}}} \right)^2}, \quad (98)$$

где  $r$  — радиус сферы винта;

$E_{\text{ст}}$  — модуль упругости материала стакана.

**Подушки, прокладки и другие детали.** Упругая деформация подушек, клиньев, прокладок и подобных им деталей определяется, исходя из закона Гука, по формуле

$$f = \frac{PH}{FE}, \quad (99)$$

где  $P$  — усилие, воспринимаемое деталью;

$H$  и  $F$  — соответственно высота и поперечное сечение детали;

$E$  — модуль упругости материала детали.

Точное определение упругой деформации с помощью расчетов получить довольно трудно, поскольку распределение нагрузок по элементам конструкции стана заранее неизвестно. Кроме того, невозможно учесть зазоры между деталями и неровности соприкасающихся поверхностей.

По данным Королева [23], для работающих сортовых станов, у которых  $\frac{L}{D} = 2 : 3$ , прогиб стальных валков в 2,5—5 раз, а чугунных валков в 5—10 раз больше упругой деформации станин и нажимных винтов с гайками. Для повышения точности размеров проката необходимо уменьшить прогиб валков, уменьшив их длину или применив дополнительные опоры в середине бочки. Предварительное напряжение станин клетей дуо не может представлять собой эффективное средство для повышения точности размеров проката.

Величины упругих деформаций отдельных деталей рабочей клетки, полученные расчетным путем, можно проверить опытными замерами. Однако выполнение таких замеров в производственных условиях сопряжено с определенными трудностями. Сложность конфигураций отдельных деталей, неравномерное распределение нагрузки по их сечению, затруднительный доступ к ним во время работы ограничивают возможность использования для замеров упругой деформации известных измерительных приборов. Необходимо разработать такие приборы и устройства,

которые позволили бы производить как стендовые замеры, так и замеры во время работы стана. Измерение с достаточной степенью точности упругой деформации узлов и деталей позволит своевременно выявить и устранить причины, снижающие жесткость конструкции.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УПРУГОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРОКАТНЫХ КЛЕТЕЙ

### Измерительные приборы и аппаратура

Измерение жесткости клетки представляет собой сложную и длительную операцию. Наиболее трудной ее частью является моделирование давления металла на валки. Представляет интерес разработка таких экспериментальных методов, которые позволили бы достаточно быстро и точно определить деформацию как отдельных деталей, так и клетки в целом.

Для измерения упругой деформации прокатных клетей была разработана специальная аппаратура, блок-схема которой показана на рис. 29. Комплект измерительной аппаратуры состоял из месдоз 1 с проволочными датчиками сопротивления, коаксиального кабеля 3, электронного усилителя 4, блока питания 5, магнитоэлектрического переносного осциллографа 6 типа МПО-2, электроизмерителя 2 перемещения валков и индикаторов часового типа.

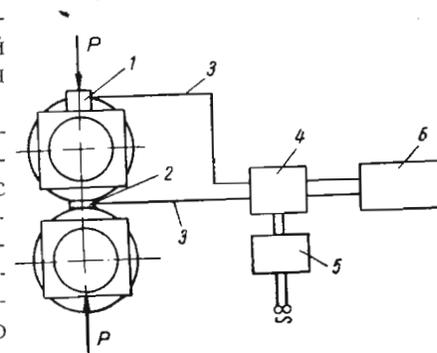


Рис. 29. Блок-схема аппаратуры для измерения упругой деформации рабочей клетки

Для измерения усилий в деталях клетки могут быть использованы месдозы различных типов (рис. 30). Форму и конструктивное исполнение месдоз определяют величиной нагружения и местом их установки.

На рис. 30, а, б показаны месдозы, выполненные в форме цилиндрических стаканов. Чувствительный упругий элемент изготовляют из стали (65Г, 5ХВ2С, 35ХГСА, 60ХН и др.) с последующей термической обработкой до твердости  $HRC = 35 : 45$ . На внутренней и наружной поверхностях чувствительного элемента наклеены рабочие и компенсационные тензодатчики, соединенные по мостовой схеме. Гидроизоляцию тензодатчиков производят эпоксидной или фурановой смолой. Месдозы аналогичной конструкции работают при нагрузках, достигающих нескольких тысяч тонн.

<sup>1</sup> Справочник «Машиностроение», т. II. Машгиз, 1948.

Месдозы цилиндрической формы, упругими чувствительными элементами которых служат мембраны с защемленными и свободными концами, показаны на рис. 30, в, г. Проволочные тензодатчики сопротивления наклеивают на внутреннюю поверхность круглых плоских мембран. Величина выходного сигнала в этих

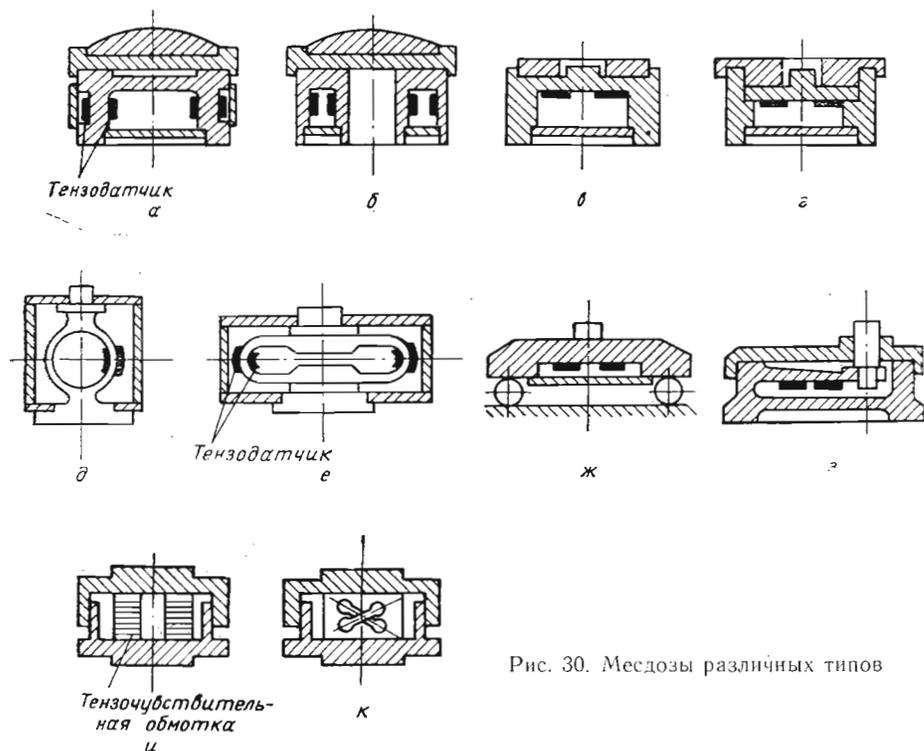


Рис. 30. Месдозы различных типов

месдозах зависит от соотношения между толщиной и диаметром мембраны, а также места наклейки базы и ориентации решеток тензодатчиков относительно направления главных напряжений на поверхности мембраны. Мембранные месдозы просты в изготовлении, надежны в работе и могут применяться для измерения усилий до 981,0 кН (100 Т).

На рис. 30, д—з представлены месдозы с кольцевыми, овальными и балочными упругими элементами, изготовленными из высоколегированных сталей. Рабочие тензодатчики наклеивают на поверхности упругого чувствительного элемента, который представляет собой одну деталь сложной конфигурации. Компенсационные датчики наклеивают на поверхность упругого элемента или на ненагруженную деталь. Месдозы с кольцевым упругим элементом применяют при небольших нагрузках — до 9,81 кН (1 Т), а с овальным элементом — до 147 кН (15 Т).

Упругие элементы балочных месдоз выполняют в виде балки, свободно лежащей на двух подвижных опорах, или консольной балки равного сопротивления. Месдозы с балочными упругими элементами имеют высокую чувствительность и могут применяться для измерения сравнительно небольших усилий, действующих на детали рабочей клетки.

Упругие элементы многостержневой месдозы (рис. 30, и) представляют собой стальные цилиндры с намотанной на них в один слой тензочувствительной проволокой. Обмотку цилиндров выполняют из константановой проволоки диаметром 0,2 мм и ее покрывают тонким слоем эмали. Обмотки двух упругих элементов соединяют последовательно так, что они образуют плечо уравновешенного моста. Под действием сжимающего усилия увеличивается диаметр цилиндров, что ведет к изменению сопротивления в обмотках и разбалансу в измерительной диагонали моста.

Упругий элемент месдозы (рис. 30, к) выполнен в виде пакета пластин из трансформаторной стали. Квадратный или прямоугольный пакет имеет симметрично расположенные по углам отверстия, через которые по диагоналям проходят первичная и вторичная обмотки проволочного датчика. Первичная намагничивающая обмотка подключена к источнику переменного тока, вторичная обмотка — к измерительному прибору. Под действием нагрузки происходит деформация упругого элемента, в результате чего изменяется направление магнитного потока, создаваемого первичной обмоткой. Переменный магнитный поток индуцирует в измерительной обмотке электродвижущую силу, которая фиксируется прибором.

Месдозы с упругими элементами, расположенными между сжимающими дисками, позволяют получить большую величину выходного сигнала. Их применяют для измерения усилий до 9810 кН (1000 Т). Для фиксирования усилия нагружения при измерении упругой деформации прокатных клеток были использованы месдозы с мембранным чувствительным элементом.

Во время замеров защемленная круговая мембрана месдозы была подвержена сосредоточенной нагрузке на определенной площадке. Величину наибольшего прогиба мембраны можно определить по уравнению [44]

$$\lambda = \frac{P \left( a - 0,75 b^2 - b^2 \ln \frac{a}{b} \right)}{\pi \frac{4Eh^3}{3(1-\mu)}} \text{ см}, \quad (100)$$

где  $P$  — нагрузка;  
 $a$  — радиус мембраны;  
 $b$  — радиус площадки нагружения;  
 $E$  — модуль упругости;  
 $h$  — толщина мембраны;  
 $\mu$  — коэффициент Пуассона.

Радиус площадки нагружения рассчитывали по следующей формуле

$$b = \sqrt{\frac{2P}{\pi\sigma_0}}, \quad (101)$$

где  $\sigma_0$  — предел упругости материала мембраны.

На нижней части мембраны были наклеены четыре рабочих и один компенсационный датчики сопротивлением по 200 ом каждый. Эти датчики составляли плечо измерительного моста переменного тока, который включали на входе электронного усилителя. Градуировка каждой мсдозы была произведена на гидравлическом прессе в интервале нагружения 0—245,3 кн (0—25 Т).

Для усиления сигналов малой мощности и низкого напряжения использовали четырехканальный тензометрический усилитель, разработанный прокатным отделом Института черной металлургии. Принципиальная схема усилителя показана на рис. 31.

При включении аппаратуры на питающую диагональ сбалансированного моста подается переменное напряжение звуковой частоты (5000 гц). Проволочные датчики, наклеенные на мембране мсдозы, воспринимают ее деформацию и соответственно изменяют свое сопротивление, вызывая при этом разбаланс моста.

Напряжение измерительной диагонали, фаза которого меняется на 180° в зависимости от знака деформации, передается через ступенчатый переключатель (П-1) на управляющую сетку первого каскада усилителя напряжения (1/2 6Н9С). Переменная составляющая сигнала передается с выхода первого каскада на вход каскада при помощи реостатно-емкостной связи. Усиленное напряжение вторым каскадом усилителя подается на вход усилителя мощности, работающего на пентоде 6П9.

В качестве детектора используется кольцевой фазочувствительный мост, состоящий из 4 селеновых шайб (ВС-45) с последовательно включенными сопротивлениями. На одну диагональ указанного моста подается коммутирующее напряжение буферного каскада через трансформатор (Тр-2), на другую — исследуемое напряжение с выходного каскада усилителя через трансформатор (Тр-1). Буферный каскад работает на пентоде 6П9. Для питания измерительного моста в выходном трансформаторе (Тр-2) предусмотрена обмотка, напряжение которой составляет 1,5—3 в с частотой генератора 5000 гц. Ток с кольцевого детектора через фильтр подается на гнезда ОСЦ и далее на шлейф осциллографа.

Генератор смонтирован на двух лампах: 6Ж4 — задающий генератор и 6П9 — выходной каскад, с которого сигнал подается на все буферные каскады.

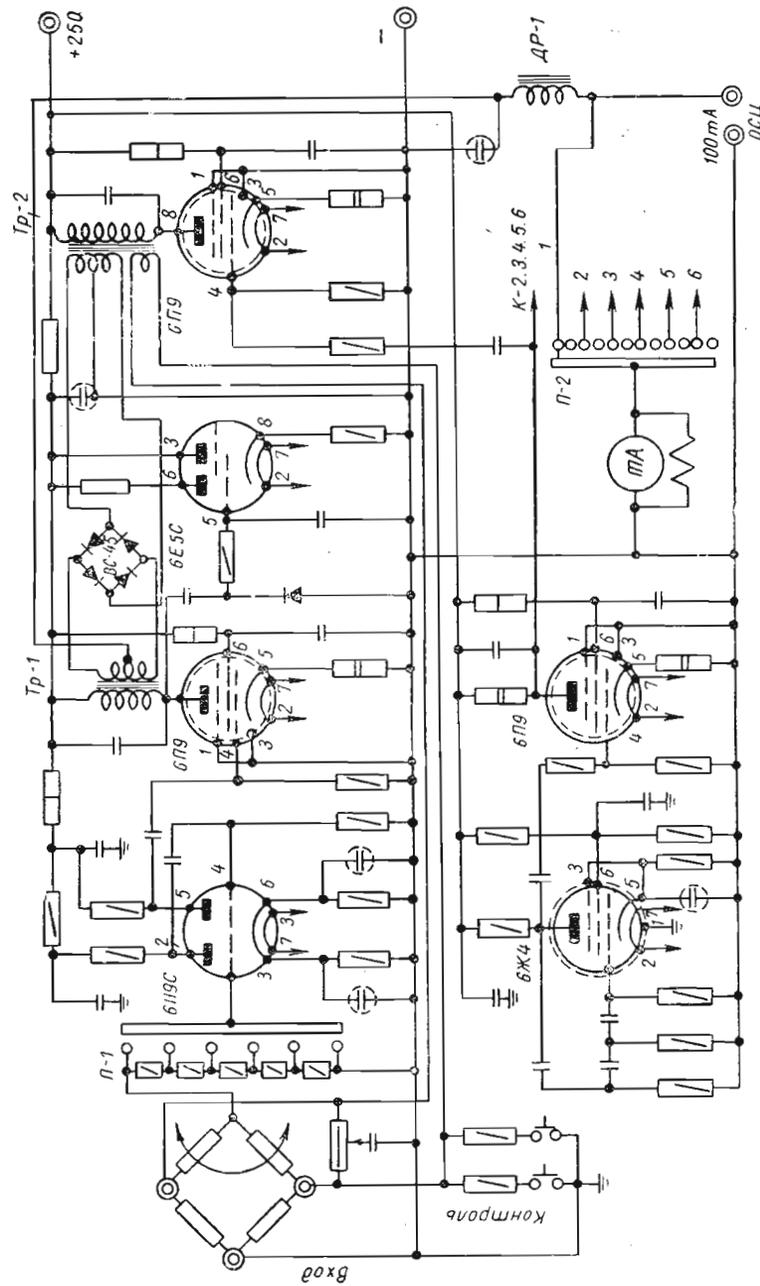


Рис. 31. Принципиальная схема электронного усилителя

Для облегчения балансировки измерительного моста и контроля работы тензометрического усилителя в каждом канале смонтирован оптический индикатор, работающий на лампе 6Е5С. Кроме этого, имеется миллиамперметр ( $mA$ ), который после настройки измерительного моста отключается переключателем ( $П-2$ ).

Питание усилителя осуществляется от сети переменного тока напряжением 220 в через блок питания, состоящий из ферро-резонансного стабилизатора с электронной стабилизацией выпрямленного напряжения.

Для измерения упругой деформации сортопрокатной клети (рис. 32) был разработан специальный электроизмеритель, основанный на фиксации перемещения валков (рис. 33); прибор, фиксирующий изменение зазора между валками, состоит из массивного стального корпуса  $б$ , внутри которого укреплена балка равного сопротивления 2. Корпус плотно закрыт крышкой 5, в центральном отверстии которой перемещается стержень 4 со сменным контактным винтом 3. Нижний конец стержня опирается на шарик балки. Постоянная фиксация шарика и стержня в крайнем верхнем положении обеспечивается пружиной 7. Вывод электрических проводов к усилителю от датчиков, наклеенных на балку, выполнен через отверстие

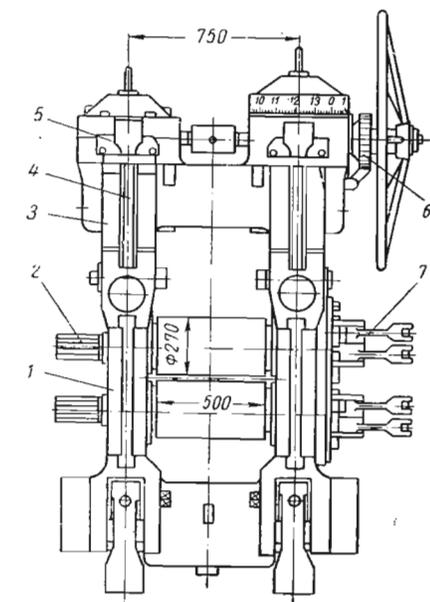


Рис. 32. Сортопрокатная клеть непрерывного стана 250:

1 — станина открытого типа; 2 — валок; 3 — крышка; 4 — стяжной болт; 5 — клин; 6 — пажимное устройство; 7 — механизм осевого регулирования валков

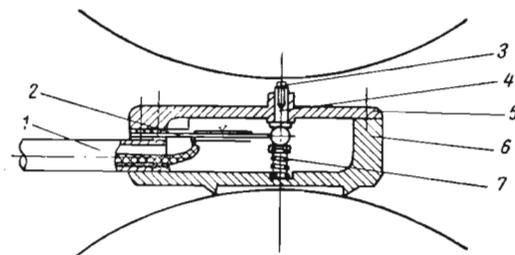


Рис. 33. Электроизмеритель упругой деформации прокатной клети

в рукоятке 1. Градуировка электроизмерителя производится непосредственно перед замером индикатором часового типа с точностью до 0,01 мм.

В качестве упругого чувствительного элемента в приборе используется консольная балка прямоугольного сечения из пружинной стали 65Г с постоянной высотой и переменной шириной.

Балка равного сопротивления имеет во всех поперечных сечениях одинаковую величину наибольшего напряжения в крайних волокнах:

$$\sigma = \frac{M_{(x)}}{W_{(x)}}, \quad (102)$$

где  $M_x$  — изгибающий момент;  
 $W_x$  — момент сопротивления в любом сечении.

Допускаемое при работе балки напряжение на изгиб не должно превышать предела упругости, т. е.

$$\frac{M_{(x)}}{W_{(x)}} \leq R_b. \quad (103)$$

В опорном сечении изгибающий момент балки равен

$$M = Pl, \quad (104)$$

а момент сопротивления

$$W = \frac{bh^2}{6}. \quad (105)$$

Подставляя значения  $M$  и  $W$  в уравнение (103), получим

$$R_b \geq \frac{6Pl}{bh^2}, \quad (106)$$

где  $P$  — усилие, приложенное к шарикку балки;

$l$  — длина пролета;

$b$  — ширина балки в опорном сечении;

$h$  — высота балки.

Для электроизмерителя принята балка высотой 1 мм и шириной в опорном сечении 12—15 мм. Длину балки определяют расчетным путем в зависимости от требуемого перемещения сменного контактного винта. Максимальный прогиб конца можно определить как [45]

$$f = \frac{6P}{Eb} \left( \frac{l}{h} \right)^{0,3}, \quad (107)$$

где  $E$  — модуль упругости материала.

При заданном зазоре валков максимальную величину отклонения балки можно установить при помощи контактного винта определенной высоты. В случае необходимости расширения пределов измерения вылет балки должен быть соответственно увеличен.

К достоинствам электроизмерителя следует отнести простоту конструкции, надежность в работе, высокую точность измерений и возможность одновременной записи на киноплёнке усилий, действующих на валки, и общей упругой деформации клети. Необходимо отметить, что по разности перемещений середины и

края бочки может быть определен прогиб рабочих валков по оси любого калибра.

### Определение упругой деформации при помощи индикаторов

Трудности, возникающие при получении тонкостенных экономичных профилей на существующих линейных и непрерывных

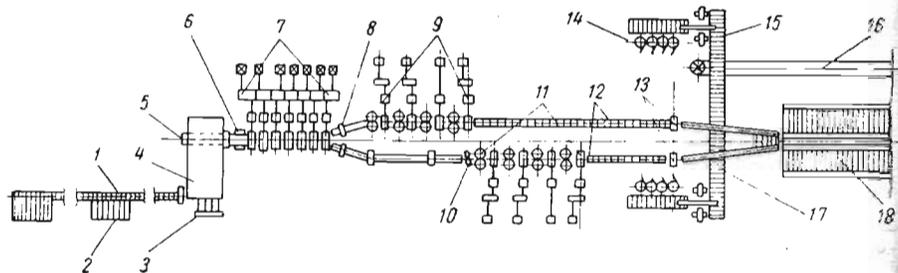


Рис. 34. Расположение оборудования непрерывного мелкосортного стана 250: 1 — рольганг; 2 — загрузочная решетка; 3 — толкатель; 4 — методическая печь; 5 — выталькиватель; 6 и 10 — ножницы; 7 — черновая группа; 8 и 13 — летучие ножницы; 9 и 11 — чистовая группа; 12 — рольганг; 14 — моталки; 15 — бракомоталки; 16 — конвейер; 17 — транспортер; 18 — холодильник

станах, обусловлены главным образом конструктивными особенностями рабочих клеток. Было проведено исследование жесткости клеток на непрерывном мелкосортном стане 250, расположение оборудования которого показано на рис. 34.

Стан 250 предназначен для прокатки равнобоких уголков из заготовок квадратного сечения. Кроме указанных профилирумеров, на стане освоена прокатка равнобоких тонкостенных уголков.

Основное оборудование стана состоит из 23 рабочих клеток, образующих одну черновую и две параллельно расположенные чистовые группы. Черновая группа стана состоит из семи клеток с горизонтальным расположением рабочих валков. Прокатка в этой группе ведется в две нитки. За черновой группой стана на каждой нитке установлены летучие ротационные кривошипные ножницы для обрезки передних концов полос, поступающих в чистовые группы. В случае неполадок на чистовых клетях эти ножницы используют для аварийной резки недоката, выходящего из черновой группы, на длину 1,5—2 м.

Перед первой чистовой клетью установлены аварийные обрывные ножницы для предотвращения поступления полосы в правую чистовую группу во время аварии. Обрывные ножницы начинают работать автоматически при включении ротационных

ножниц на аварийный режим. Каждая чистовая группа стана состоит из восьми чередующихся рабочих клеток с вертикальным и горизонтальным расположением рабочих валков, что устраняет необходимость кантовки полосы путем скручивания.

Прокатка угловых профилей на непрерывных станах имеет свои особенности. Когда раскат одновременно находится во всех рабочих клетях, важно выдержать условие равенства секундных объемов металла, проходящих через каждую клетку. Практически выдержать стабильность условий прокатки невозможно, и поэтому прокатка обычно идет с натяжением или с петлей. Натяжение вызывает утяжку полос уголка и отрицательно сказывается на точности прокатываемого профиля. Поэтому процесс прокатки ведут обычно с небольшим провисанием полосы между клетями. Улучшению режима прокатки, кроме того, способствует «мягкая» характеристика приводных двигателей. Отсюда угловой профиль имеет, как правило, несколько большую ширину полок на концах раската, так как концы прокатываются без натяжения. При значительной величине натяжения размеры средней части раската могут выйти за пределы минусового допуска.

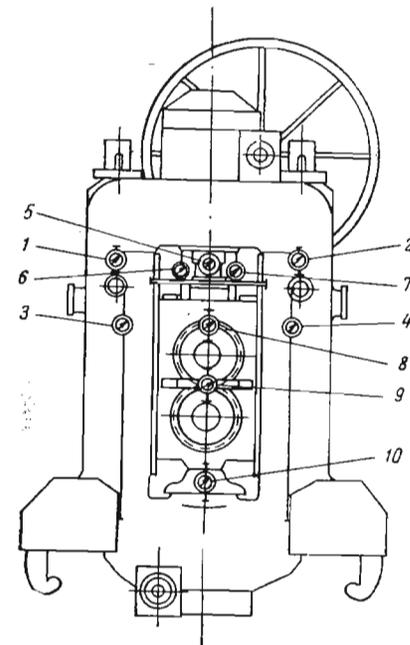


Рис. 35. Установка индикаторов на чистовой клетке стана 250

Температура конца прокатки угловых профилей равна 1020—1040°C. Скорость прокатки в последней клетке чистовой группы обычно находится в диапазоне 6—8 м/сек. Максимальная скорость прокатки может достигать 11 м/сек, однако ее ограничивает пропускная способность холодильника.

Исследование жесткости отдельных узлов и деталей было проведено на чистовой клетке № 13 с горизонтально расположенными валками. На станине и других деталях со стороны привода были укреплены индикаторы часового типа (рис. 35) с точностью отсчета 0,01 мм. Индикаторы 1 и 2, предназначенные для измерения деформации растяжения стержней болтов были укреплены неподвижно в верхних частях стоек станины. Ножки индикаторов упираются в тщательно обработанные площадки жестких кронштейнов, приваренных к съемной верхней поперечине.

Деформацию стоек станины фиксировали индикаторы 3 и 4, укрепленные в верхних частях стоек. Ножки индикаторов упираются в торцы штанг, приваренных противоположными концами к нижней поперечине. Суммарную деформацию изгиба верхней поперечины станины и растяжения стяжных болтов определяли индикатором 5, укрепленным на балке, концы которой были приварены к стойкам станины на уровне поворотных осей стяжных болтов. Шпindel индикатора упирался в обработанную площадку верхней поперечины.

Индикаторы 6 и 7, укрепленные неподвижно на верхней подушке с обеих сторон нажимного винта, были предназначены для замера перемещения подушки относительно верхней поперечины станины. Деформацию узла винт—гайка—месдоза определяли по разности величины хода нажимного винта и перемещения верхней подушки. При этом учитывали изгиб поперечины, а также растяжение стоек станин и стяжных болтов.

Деформацию смятия подшипников и частичный прогиб верхнего валка измеряли с помощью индикатора 8. Общий прогиб двух валков и смятие полосы, находящейся между валками, регистрировали индикатором 9. Оба индикатора были неподвижно установлены на тряфе верхнего валка.

Суммарную деформацию нижнего установочного винта, гайки и сферического колпака определяли индикатором 10, жестко

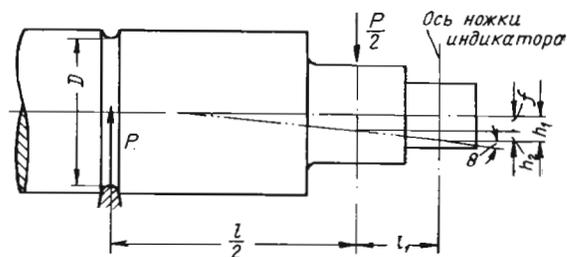


Рис. 36. Схема поворота шейки валка

укрепленным на нижней подушке. Ножки индикатора упираются в площадку кронштейна, приваренного к нижней поперечине.

Давление металла на валки измеряли с помощью двух мембранных месдоз, установленных вместо предохранительных стаканов между верхними подушками и нажимными винтами. Месдозы были предварительно проградуированы на гидравлическом прессе по миллиамперметру с интервалом нагружения 19,6 кН (2 Т).

Нагружение клетки производили на стенде с помощью нажимных винтов. Между неподвижными калиброванными валками диаметром 268 мм по оси клетки помещен стальной ребровой

овал, размеры которого соответствуют размерам калибра. После установки индикаторов в нулевое положение клетку нагружали до 39,2 кН (4 Т). При таком предварительном нагружении были устранены зазоры между сопряженными деталями. Показания индикаторов условно принимались за начало отсчета. Затем производили периодическое поджатие нажимных винтов через каждые 39,2 кН (4 Т) до 274,4 кН (28 Т). После каждого поджатия записывали показания индикаторов и лимба нажимного устройства.

По данным показаний всех индикаторов были определены упругие деформации отдельных узлов и деталей рабочей клетки (табл. 12).

Таблица 12

Упругая деформация деталей чистой клетки

Детали клетки	Деформация (мм) при усилиях на винт, кН (Т)					
	39,2 (4)	58,8 (6)	78,5 (8)	98,1 (10)	117,7 (12)	137,3 (14)
Стяжные болты . . . . .	0,01	0,015	0,02	0,025	0,03	0,04
Стойки станины . . . . .	0	0,010	0,01	0,015	0,02	0,02
Верхний винт, гайка, стакан . . . . .	0,05	0,065	0,07	0,120	0,17	0,21
Подшипники . . . . .	0,20	0,390	0,50	0,590	0,62	0,64
Рабочие валки с учетом поворота тряфов и смятия овала . . . . .	0,10	0,200	0,31	0,450	0,56	0,63
Нижний винт, гайка, сферический колпак . . . . .	0,03	0,050	0,07	0,090	0,10	0,10
Общая деформация . . . . .	0,39	0,730	0,98	1,290	1,50	1,65

Примечание. При усилиях на винт 19,6 кН (2Т) деформация деталей клетки принимается равной нулю.

Из приведенных данных следует, что большую часть деформации клетки составляют прогиб и смятие валков. При этом учитывали поворот тряфов и смятие стального овала, помещенного между валками. Велики также деформации подшипниковых узлов. Это объясняется тем, что подшипники подвержены не только упругому сжатию, но и осевому смещению вдоль конических шеек валка. Осевые смещения могут возникать в результате неточностей при сборке и не исключают работу подшипников с перекосом. Перекос приводит к неравномерному распределению нагрузки и к поломке подшипников. Значительна также упругая деформация верхнего и нижнего узлов нажимных механизмов. В то же время деформация растяжения стяжных болтов и стоек станины сравнительно невелика.

Фактический прогиб валков можно найти вычитанием из общего перемещения, фиксируемого индикатором 9 (см. рис. 35), полученного за счет поворота шеек и тряфов, и смятия ребрового овала, расположенного в калибре.

Для приближенного расчета будем рассматривать валок как балку равного сечения, нагруженную силой  $P$  в середине пролета (рис. 36). Найдем угол поворота сечения шейки по формуле [45]

$$\theta = \frac{Pl}{16EI}, \quad (108)$$

где  $\theta$  — угол поворота, рад;

$E$  — модуль упругости материала валка;

$I$  — момент инерции сечения валка.

Из геометрии валка имеем:  $l=750$  мм;  $l_1=150$  мм;  $D=250$  мм. Средняя величина смятия овала после разгрузки клетки составила  $h_c = 0,23$  мм.

Угол поворота сечения шейки валка при  $P=274,4$  кН (28Т)

$$\theta = \frac{28000 \cdot 75^2 \cdot 64}{16 \cdot 1,8 \cdot 10^6 \cdot 25^4 \cdot 3,14} = 0,0003 \text{ рад}$$

или

$$\theta = 0,003 \cdot 57 \cdot 60 = 1,0'$$

Перемещение шпинделя индикатора за счет поворота шейки

$$h_2 = l_1 \operatorname{tg} \theta = 150 \cdot 0,0003 = 0,045 \text{ мм.}$$

Фактический прогиб двух валков будет

$$f_B = 2(h_1 - h_2) - h_c = 2 \left( \frac{0,63}{2} - 0,045 \right) - 0,23 = 0,31 \text{ мм.}$$

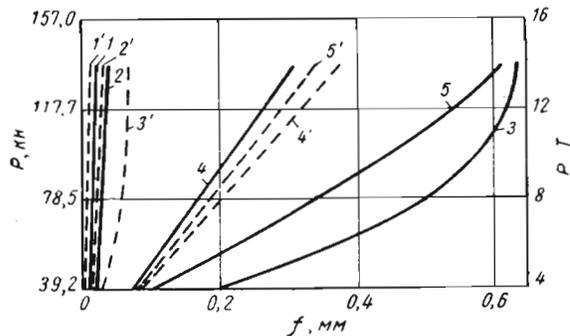


Рис. 37. Изменение деформации деталей клетки в зависимости от приложенной нагрузки (экспериментальные данные — сплошные линии, расчетные — пунктирные):

1 — станины; 2 — стяжные болты; 3 — подшипники; 4 — нажимные винты, гайки, стаканы; 5 — рабочие валки

Упругую деформацию деталей чистовой клетки, воспринимающих основные нагрузки, определяли также расчетным путем.

Графики изменения деформации деталей клетки в зависимости от приложенной нагрузки, построенные по экспериментальным и расчетным данным, представлены на рис. 37.

Результаты расчетов и экспериментальных исследований показывают, что чистовые клетки непрерывного мелкосортного стана 250 имеют недостаточную жесткость. Упругие деформации этих клеток превышают величину поля допускаемых отклонений проката. Для повышения жесткости клеток чистовой группы следует увеличить диаметры и сократить длину рабочих валков, а также заменить подшипники качения на подшипники жидкостного трения.

#### Определение упругой деформации с помощью электроизмерителя

Более точные результаты измерений упругой деформации клетки могут быть получены при непосредственном нагружении рабочих валков и записи их перемещений на киноплёнку. Фик-

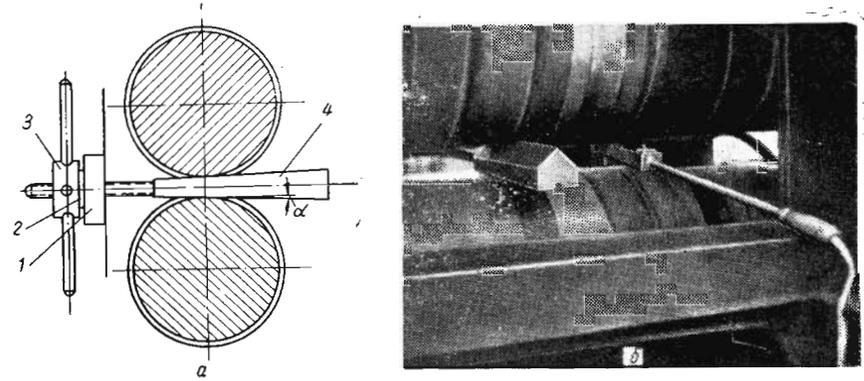


Рис. 38. Клинное устройство для нагружения клетки (а) и положение клина в момент нагружения (б)

сируя периодически давление, воспринимаемое валками, и соответствующее изменение зазора между ними, находят общую деформацию клетки.

Этим методом выполнены замеры упругой деформации чистовых клеток № 9 (диаметр валков 320 мм, длина бочки 600 мм) и № 15 (диаметр валков 267 мм, длина бочки 500 мм) непрерывного мелкосортного стана 250. Рабочие валки были скалиброваны для прокатки уголка  $40 \times 40 \times 3 \div 4$  мм. Нагружение каждой клетки проводили на стенде путем распора валков клиновым устройством (рис. 38,а), состоящим из упора 1, подшипника 2, гайки-штурвала 3 и двухскосного клина 4 с углом наклона рабочей грани  $\alpha = 30'$ .

Горизонтальное перемещение клина осуществлялось вращением гайки-штурвала, что обеспечивало равномерное нагружение валков от 0 до 294,3 кН (30 Т). Положение клина в момент нагружения клетки показано на рис. 38,б. Давление на валки измеряли при помощи мембранных мездоз, установленных под нажимными винтами. Люфты и зазоры между сопряженными деталями устраняли предварительным нагружением клетки на 19,6 кН (2 Т).

Общую упругую деформацию клетки после очередного нагружения определяли по изменению зазора между валками при помощи электроизмерителя (см. рис. 33). Замеры производили в четырех точках, расположенных симметрично относительно оси клетки. Величины изменения давления, действующего на клетку, и зазоров между валками записывали осциллографом МПО-2. В каждой точке производили по четыре замера при данной нагрузке.

Во время замеров электроизмеритель пропускали между валками. Корпус электроизмерителя опирается двумя установочными ребрами на нижний валок, а контактный винт стержня скользит по поверхности верхнего валка. Максимуму кривой перемещения на осциллограмме соответствовал момент, когда ось стержня совпала с линией, соединяющей центры валков. При

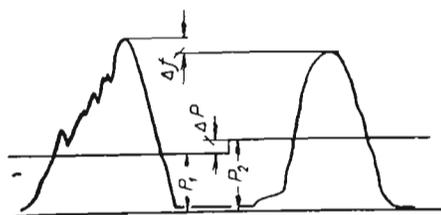


Рис. 39. Осциллограмма давлений и перемещений

этом изгиб балки достигал наибольшей величины. С увеличением нагрузки на клетку зазор между валками изменяется и уменьшается изгиб балки. Сопоставляя осциллограммы, полученные при различных нагрузках, определяли общую деформацию клетки.

На рис. 39 показана осциллограмма давлений и перемещений для двух смежных нагружений. Изменение давления на валки при обработке осциллограмм определяли по выражению

$$\Delta P = P_2 - P_1, \quad (109)$$

где  $P_1$  и  $P_2$  — давление на валки при первом и втором нагружениях.

Так как с увеличением зазора между валками изгиб балки электроизмерителя уменьшается, то изменение деформации клетки составит:

$$\Delta f = h_1 - h_2, \quad (110)$$

где  $h_1$  и  $h_2$  — максимальные ординаты осциллограмм при давлениях  $P_1$  и  $P_2$ .

Усредненные данные обработки осциллограмм приведены в табл. 13 и 14.

Таблица 13

Экспериментальные данные замеров в клетке № 9

Давление на валки		Деформация в точках измерения, мм			
кН	Т	I	II	III	IV
<i>Первое нагружение</i>					
59,8	6,1	0,07	0,13	0,17	0,10
119,7	12,2	0,13	0,26	0,30	0,18
201,1	20,5	0,26	0,47	0,50	0,29
281,5	28,7	0,48	0,74	0,78	0,51
319,8	32,6	0,62	0,92	0,95	0,66
<i>Второе нагружение</i>					
68,7	7,0	0,08	0,16	0,19	0,11
147,1	15,0	0,20	0,35	0,39	0,23
197,2	20,1	0,27	0,49	0,54	0,31
266,8	27,2	0,44	0,71	0,74	0,48
311,0	31,7	0,64	0,91	0,96	0,96

Таблица 14

Экспериментальные данные замеров в клетке № 15

Давление на валки		Деформация в точках измерения, мм			
кН	Т	I	II	III	IV
<i>Первое нагружение</i>					
78,5	8,0	0,13	0,22	0,25	0,16
124,6	12,7	0,24	0,38	0,42	0,29
178,5	18,2	0,36	0,54	0,59	0,41
206,0	21,0	0,45	0,67	0,71	0,50
<i>Второе нагружение</i>					
74,6	7,6	0,14	0,23	0,26	0,17
131,4	13,4	0,26	0,42	0,47	0,31
162,8	16,6	0,35	0,58	0,56	0,38
196,2	20,0	0,44	0,64	0,68	0,48
<i>Третье нагружение</i>					
79,5	8,1	0,15	0,24	0,29	0,20
142,2	14,5	0,27	0,43	0,47	0,32
174,6	17,8	0,37	0,54	0,59	0,42
206,0	21,0	0,5	0,70	0,74	0,53

По изменению зазора между крайними и средними буртами можно определить ту часть деформации клетки, которая соответствует прогибу рабочих валков. Так, для клетки № 9 разница перемещений при первом нагружении в середине бочки и у край-

них буртов, которая является прогибом валков (без учета изгиба шеек), будет равна:

$$f_1 = \frac{0,13 + 0,17}{2} - \frac{0,07 + 0,10}{2} = 0,07 \text{ мм};$$

$$f_3 = \frac{0,47 + 0,50}{2} - \frac{0,26 + 0,29}{2} = 0,21 \text{ мм};$$

$$f_5 = \frac{0,92 + 0,95}{2} - \frac{0,62 + 0,66}{2} = 0,3 \text{ мм}.$$

Аналогично для клетки № 15 получим:

$$f_1 = 0,09 \text{ мм}; f_2 = 0,13 \text{ мм}; f_3 = 0,18 \text{ мм}; f_4 = 0,27 \text{ мм}.$$

Из приведенных данных следует, что прогиб рабочих валков составляет от 32 до 46% общей деформации клетки.

На рис. 40 представлены кривые изменения упругой деформации клеток в зависимости от давления на валки. Из рис. 40 следует, что при одних и тех же нагрузках упругая деформация клетки № 15 превышает упругую деформацию клетки № 9. Это объясняется тем, что валки отделочной клетки имеют меньший диаметр и более глубокие врезы калибров.

Так, при давлении на валки 216—226 кН (22—23 Т) упругая деформация клетки № 15 составляет 0,8 мм. Таковую же деформацию испыты-

Рис. 40. Изменение упругой деформации клеток в зависимости от нагрузки (экспериментальные данные — сплошные линии, расчетные — пунктирные):

1 — клетка № 9; 2 — клетка № 15

тывает клетка № 9 при давлении 275—285 кН (28—29 Т).

Во время прокатки уголкового профиля давление металла на валки рабочих клеток чистой группы мелкосортного стана достигает значительной величины (табл. 15).

Таблица 15

Давление металла на валки при прокатке уголкового профиля

Размер уголкового профиля, мм	Давление по клетям, кН (Т)			
	№ 9	№ 11	№ 13	№ 15
40×40×3	440 (45,0)	560 (57,2)	310 (31,6)	426 (43,5)
40×40×4	295 (30,1)	517 (52,8)	268 (27,4)	402 (41,0)

При больших нагрузках упругая деформация клетки № 15 превышает допуск по толщине полки уголка, равный ± 0,4 мм. Изменение давления металла на валки в чистой клетке на 39—49 кН (4—5 Т) приводит к изменению ее упругой деформации, а следовательно, и к изменению размеров готового проката по толщине на 0,18—0,28 мм. Опытные данные подтверждают необходимость дальнейшего совершенствования конструкций рабочих клеток для повышения точности размеров проката.

Метод определения упругой деформации прокатных клеток при помощи электроизмерителей позволяет учесть все факторы, влияющие на жесткость, которые не могут быть точно учтены при расчетах. К этим факторам относятся неровности сопряженных поверхностей, механические свойства материала деталей, неравномерное распределение нагрузки по сечению элементов конструкции и другие. Данный метод может быть использован для определения общей упругой деформации клеток проволочных, мелкосортных и среднесортных станов.

Особенности деформации деталей рабочей клетки

Сопоставление экспериментальных и расчетных данных упругих деформаций рабочих клеток показывает, что действительная деформация части деталей не может быть точно определена расчетом, а применяемые расчетные формулы дают приближенные результаты. Кроме того, наличие постоянных ударов при работе стана и неравномерное распределение нагрузки приводит к значительным контактным напряжениям и местному износу станин, подушек, винтов, предохранительных стаканов. Более благоприятные условия для работы деталей клетки будут, по-видимому, тогда, когда их сопряженные поверхности тщательно обработаны, а вся клетка предварительно напряжена для устранения люфтов и зазоров. Изучение условий работы и опытные данные упругих деформаций прокатных клеток подтверждают необходимость изменения и улучшения конструкции непрерывных, а также линейных сортовых и проволочных станов.

Как отмечалось, значительную долю упругой деформации клетки составляет прогиб валков. Стремление расположить на валке большее число калибров для уменьшения количества перевалок приводит к увеличению длины рабочих валков и к резкому снижению жесткости клетки. Если рассматривать валок как балку равного поперечного сечения, то его прогиб под действием приложенной нагрузки приблизительно определится по уравнению<sup>1</sup>.

$$f = \frac{0,4 Pl^3}{ED^4}, \quad (111)$$

где  $l$  — расстояние между опорами.

<sup>1</sup> Справочник «Машиностроение» т. I, кн. 2, Машгиз, 1948.

Из уравнения (111) следует, что увеличение расстояния между опорами в 1,5 раза повышает деформацию валка в 3,5 раза, а увеличение расстояния между опорами в 2 раза дает повышение деформации в 8 раз. Прогиб валка уменьшается с увеличением его диаметра. Так, при увеличении диаметра на 10% стрела прогиба уменьшается в 1,5 раза, а при увеличении на 20% — в 2 раза.

Большая деформация подшипникового узла чистовой клетки № 13 стана 250 (см. рис. 37) объясняется сползанием втулки подшипника вдоль конической шейки валка и неравномерным распределением нагрузки между рядами роликов. Равномерность распределения нагрузки между роликами зависит от точности исполнения посадочных мест и самих подшипников. Валки, снабженные подшипниками качения, удерживаются в определенном положении с помощью регулирующего устройства.

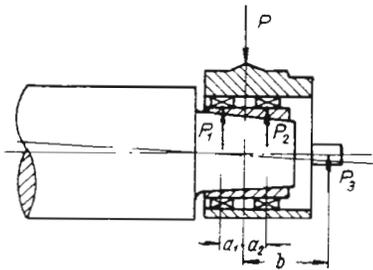


Рис. 41. Схема сил, действующих на подушку

Во время прокатки происходит прогиб валков и поворот шеек. При этом в регулирующем

устройстве возникают усилия, препятствующие повороту подушек и разгружающие в некоторой мере ряд роликов, расположенный со стороны устройства.

На рис. 41 показана схема сил, действующих на подушку при прогибе валка. Так как подшипниковый узел находится в равновесии, то сумма моментов всех сил относительно точки приложения силы  $P$  равна нулю, т. е.

$$\Sigma M = P_1 a_1 - P_2 a_2 - P_3 b = 0,$$

откуда

$$P_1 = \frac{P_2 a_2 + P_3 b}{a_1}. \quad (112)$$

При симметричном расположении роликов относительно оси нажимного винта  $a_1 = a_2 = a$ , тогда

$$P_1 = P_2 + P_3 \frac{b}{a}, \quad (113)$$

где  $P_1$  и  $P_2$  — силы, действующие на первый и на второй ряды роликов;

$P_3$  — сила, действующая на подушку со стороны регулирующего устройства.

Из уравнения (113) следует, что первый ряд роликов нагружен больше второго ряда, так как  $P_1 > P_2$ . Следовательно, деформация подшипника, рассчитанная для случая равномерного

распределения нагрузки между рядами роликов, не будет соответствовать действительной деформации.

Опытные данные свидетельствуют о значительной упругой деформации узла «нажимной винт — гайка — стакан». Большую часть ее составляет прогиб диафрагмы стакана и сжатие сферы

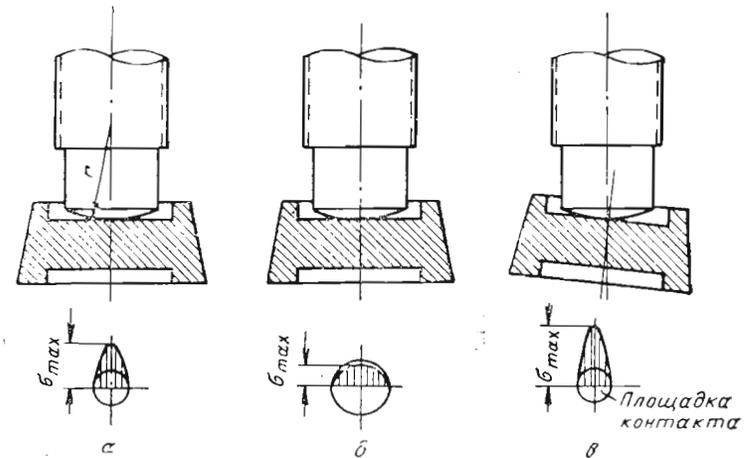


Рис. 42. Схема контакта сферы нажимного винта с диафрагмой предохранительного стакана:

а — при новом винте; б — после приработки сферы; в — при повороте стакана

нажимного винта. На поверхности контакта сферы с плоскостью возникают напряжения, приводящие к разрушению металла. В центре площадки контакта напряжения достигают максимума и равны

$$\sigma = 0,4 \sqrt[3]{\frac{P E_1 E_2}{r^2}}, \quad (114)$$

где  $r$  — радиус сферы винта;

$E_1$  и  $E_2$  — модули упругости материала винта и стакана.

При прогибе валков лодушки отклоняются от первоначального положения, а вместе с ними относительно пяты винта поворачивается диафрагма стакана (рис. 42). Наличие выработки и неровностей на поверхности сферы изменяют радиус кругового контура площадки соприкосновения, что приводит к увеличению деформации контактного сжатия. Этим, вероятно, объясняется тот факт, что расчетная деформация сферической части винта, подсчитанная по формуле (98), отличается от действительной. Следует отметить, что сопряжение винга с плоскостью диафрагмы стакана конструктивно несовершенно и в современных конструкциях жестких клеток не применяется.

Замеры деформации узла крепления (см. рис. 35) съемной крышки показали, что предварительное прижатие ее к стойкам обеспечивает достаточную жесткость станины открытого типа. Однако во время работы стана вследствие изменений давления металла на валки и вибрации в линии привода происходит смещение клиньев и снятие предварительной нагрузки. В результате этого между сопряженными деталями возникают зазоры, что увеличивает «игру валков» и приводит к интенсивному износу клиньев, прокладок, откидных болтов. Устранение зазоров в процессе работы можно достигнуть периодическим забиванием клиньев. Однако при этом предварительное растяжение стяжных болтов не контролируется. Для того чтобы съемная крышка стабильно была прижата к стойкам станины, целесообразно заменить клиновое крепление гидравлическими гайками. Это позволит устранить тяжелый физический труд при разборке и сборке клетки, а также добиться равномерного и контролируемого нагружения стяжных болтов.

Экспериментальные данные по замерам упругих деформаций клеток № 9, № 13 и № 15 современного непрерывного мелкосортного стана 250 показали, что при прокатке полос в две нитки в обычных чистовых клетях часто невозможно получить точные размеры проката. Так, например, если бы в чистовой клетке № 15 прокатывали одновременно в две нитки уголки размером  $40 \times 40 \times 4$  мм, то давление металла на валки достигло бы  $804 \text{ кн}$  ( $82 \text{ Т}$ ) (см. табл. 15). При выходе из валков одной нитки давление уменьшится в два раза. Это приведет к изменению упругой деформации клетки более чем на  $0,8 \text{ мм}$ . Очевидно, что многониточная прокатка сортовых профилей может быть осуществлена только в клетях с повышенной жесткостью.

## Глава IV

### ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ РАЗМЕРОВ ПРОКАТА

#### КАТАНКА

Влияние условий прокатки на точность размеров катанки исследовали на проволочных станах 260 с линейным расположением клеток. Исследования проводили для получения данных отклонения размеров катанки от номинала при изменении температуры прокатки, количества одновременно прокатываемых ниток, расположения калибра по длине валка и выработки чистовых калибров.

Проволочные станы 260 металлургических заводов им. Петровского и им. Дзержинского расположены в четыре линии. Прокатку катанки на станах ведут в несколько ниток, причем число их возрастает от одной в черновых до шести в чистовых клетях. Число одновременно прокатываемых ниток в чистовых клетях не постоянно. На проволочных станах прокатывают обыкновенную, телеграфную и сварочную катанки с номинальным диаметром  $6,5 \text{ мм}$ . Допускаемые отклонения по диаметру составляют  $\pm 0,5$  и по овальности  $0,5 \text{ мм}$ .

Прокатка одного бунта катанки в чистовой линии происходит в течение продолжительного времени. Наличие относительно большой петли между чистовой и предчистовой клетями, длительное соприкосновение прокатываемого металла с холодными плитами пола приводит к заметному перепаду температуры между передним и задним концами бунта. Этот перепад достигает  $110 \text{ град}$ , но обычно лежит в пределах  $60—80 \text{ град}$ . Замеры, произведенные оптическим пирометром, показали, что температура прокатки переднего конца бунта в чистовой клетке составляла  $1030—980^\circ\text{C}$ , а заднего конца  $970—900^\circ\text{C}$ .

Падение температуры заднего конца бунта на  $70 \text{ град}$  вызывает, при прочих равных условиях, увеличение вертикального диаметра профиля на  $0,08—0,11 \text{ мм}$ .

По мере изменения количества одновременно прокатываемых ниток изменяются и размеры катанки. Наглядное представление об изменении вертикального диаметра катанки на переднем и заднем концах бунта при прокатке в одну, две, три, че-

тыре и пять ниток дает рис. 43. Замеры показали, что увеличение количества прокатываемых ниток на одну вызывает увеличение вертикального диаметра катанки на 0,10—0,12 мм и площади поперечного сечения каждой нитки в среднем на 1 мм<sup>2</sup>

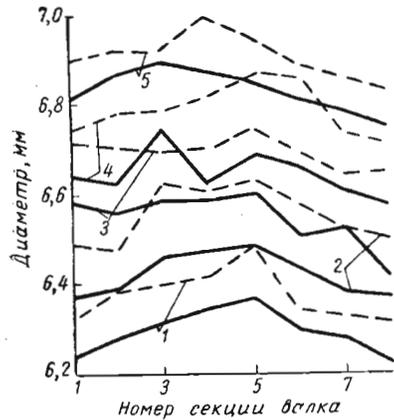


Рис. 43. Изменение вертикального диаметра переднего и заднего концов катанки в зависимости от места расположения калибра и числа прокатываемых ниток: 1—5 — передний конец; пунктирные кривые — задний конец

вертикали в начале работы калибра, а на рис. 44, б — те же кривые в конце работы калибра. Аналогичные частотные кривые отклонения диаметра катанки в начале и конце работы калибра получены на стане 260 завода им. Петровского.

Нагрузка, воспринимаемая рабочей клетью в зависимости от места расположения калибров, в которых ведется прокатка, количества и температуры прокатываемых полос изменяется. На проволочном стане 260 провели экспериментальные замеры давления металла на валки при прокатке 1—6 ниток чистового круга и предчистового овала. В качестве измерителей давления применяли мембранные месдозы с проволочными датчиками, которые устанавливали под нажимными винтами. Месдоза (рис. 45) состоит из корпуса 1, верхней крышки 2, на которую опирается пята нажимного винта, промежуточного диска 3, разрезной муфты 4 для фиксации кабеля, прокладки 5 и нижней крышки 6, которая крепится к корпусу винтами 7 и плотно закрывает полость месдозы от проникновения пыли, воды и масла. На внутренней поверхности мембраны наклеены рабочие датчики. Компенсационный датчик наклеен на стенке корпуса. Собранную месдозу выдерживали в термостате при 100°С, после чего внутреннюю полость заливали смолой, закрывали крышка-

(табл. 16). Во всех случаях прокатываемый профиль получается тем полнее, чем ближе к середине бочки валка находится рабочий калибр, так как прогиб валка достигает максимума именно в этом месте.

В процессе прокатки калибры валков постепенно изнашиваются. В среднем чистовые калибры работают одну—две смены. Вертикальная выработка калибров в чистовой клетке стана 260 завода им. Дзержинского в течение двух смен достигала 0,55 мм (см. рис. 16). Постоянный износ чистовых калибров, несмотря на подстройку клетки, вызывает изменение размеров профиля и понижает точность прокатки.

На рис. 44, а представлены частотные кривые отклонения диаметра катанки по разьему и по

ми 6 и 8 и подвергали испытанию на герметичность в водяной ванне в течение семи суток. Градуировку месдозы производили на гидравлическом прессе в интервале нагружения 19,6—158 кН (2—16 Т).

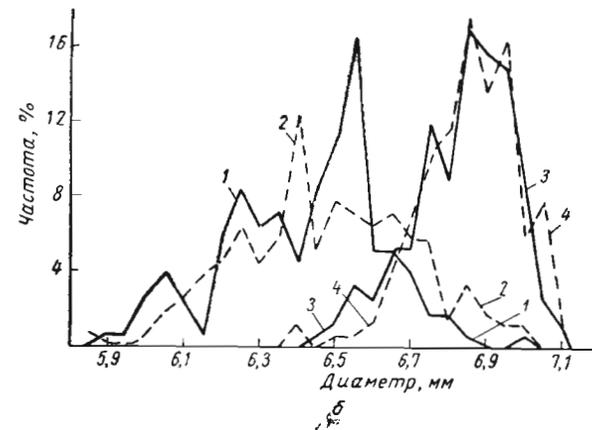
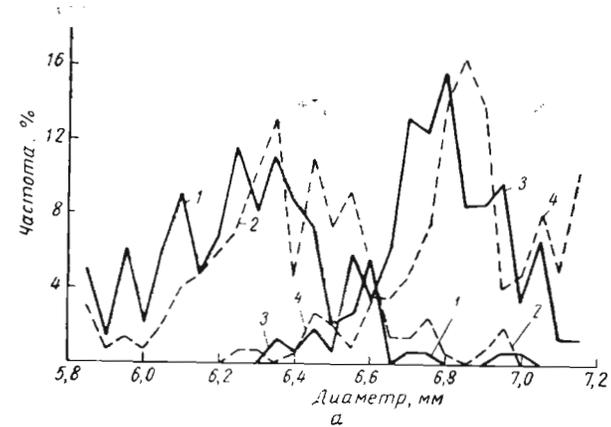


Рис. 44. Частотные кривые отклонения диаметра катанки в начале (а) и конце (б) работы калибра: 1 и 2 — диаметр переднего и заднего концов по разьему; 3 и 4 — диаметр переднего и заднего концов по вертикали

Измерительная аппаратура состояла из осциллографа МПО-2, электронного стабилизатора напряжения и тензометрических усилителей.

Экспериментальные данные замеров давления металла на валки предчистовой и чистовой клетей приведены в табл. 17.

Таблица 16

## Размеры катанки при прокатке в одну, три и пять ниток

Номер секции	Число ниток	Диаметр проволоки, мм		Площадь сечения, мм <sup>2</sup>	
		передний конец	задний конец	передний конец	задний конец
1	1	6,18	6,23	30,2	30,8
		6,23	6,34		
		6,13	6,18		
		6,27	6,39		
		6,17	6,16		
		6,30	6,40		
		6,14	6,21		
		6,34	6,42		
2	1	6,17	6,15	30,8	31,3
		6,36	6,48		
		6,18	6,26		
		6,29	6,34		
		6,09	6,27		
		6,28	6,32		
		6,17	6,28		
		6,22	6,31		
3	3	6,51	6,52	32,6	33,3
		6,58	6,71		
		6,53	6,56		
		6,56	6,70		
		6,53	6,53		
		6,58	6,69		
		6,55	6,52		
		6,58	6,70		
4	3	6,57	6,55	33,0	33,6
		6,60	6,74		
		6,57	6,52		
		6,50	6,68		
		6,62	6,63		
		6,51	6,64		
		6,62	6,61		
		6,41	6,64		
1	5	6,55	6,51	35,1	35,2
		6,81	6,89		
		6,53	6,52		
2	5	6,87	6,99	35,2	35,6
3	5	6,57	6,50	35,4	35,3
		6,89	6,92		

Продолжение табл. 16

Номер секции	Число ниток	Диаметр проволоки, мм		Площадь сечения, мм <sup>2</sup>	
		передний конец	задний конец	передний конец	задний конец
4	5	6,61	6,60	35,6	36,1
		6,87	6,99		
5	5	6,63	6,57	35,6	36,0
		6,85	6,96		
6	5	6,58	6,52	35,1	35,2
		6,81	6,89		
7	5	6,54	6,53	35,1	35,2
		6,82	6,88		
8	5	6,53	6,57	35,1	35,4
		6,86	6,89		

Примечание. В числителе — горизонтальный диаметр проволоки, в знаменателе — вертикальный.

Во время замеров температура прокатки составляла: переднего конца чистового круга 1000—1020°C, заднего конца 850—870°C, для предчистового овала соответственно 1020—1040 и 960—980°C. Анализ экспериментальных данных показал, что давление прокатки в чистовой клетке на одну нитку составляет 7,8—12,7 кН (0,8—1,3 Т), а в предчистовой клетке 49—68 кН (5—6,9 Т). Существенное влияние на показания мессдоз в чистовой клетке оказывает степень затяжки болтов и прижимных планок, фиксирующих валки в осевом направлении. Силы трения, возникающие между прижимными планками и подушками, препятствуют свободному перемещению последних, что снижает давление, воспринимаемое мессдозами, при прокатке небольшого числа ниток. Общее давление металла на валки в предчистовой клетке значительно превышает давление в чистовой клетке и достигает 362 кН (37 Т) при одновременной прокатке шести ниток. Так как высота овала определяет горизонтальный диаметр катанки, то для получения точных размеров проката предчистовая клетка, так же как и чистовая, должна быть достаточно жесткой.

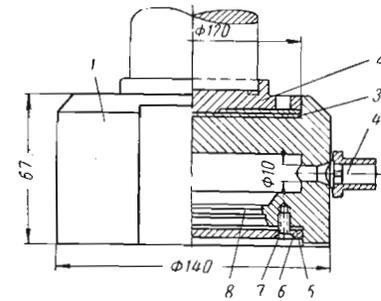


Рис. 45. Устройство мессдозы для усилия 248 кН (25 Т)

Исследования показали, что изменение числа прокатываемых ниток и температуры полос приводит к значительным колебаниям давления металла на валки. Это приводит к неравномер-

ности деформаций деталей рабочей клетки и отсюда к колебаниям размеров проката. По мере понижения температуры металла, увеличения числа прокатываемых ниток и времени работы калибров количество отклонений размеров проволоки от номинала в плюсовую сторону возрастает от 59 до 93%, а средний диаметр профиля увеличивается с 6,5 до 6,85 мм.

Таблица 17

Давление металла на валки при прокатке катанки диаметром 6,5 мм

Число ниток	Давление, кн (Т)	
	общее	на одну нитку
<i>Чистовая клеть</i>		
1	7,85—11,8 (0,8—1,2)	7,85—11,8 (0,8—1,2)
2	21,6—23,5 (2,2—2,4)	10,8—11,8 (1,1—1,2)
3	29,4—38,3 (3,0—3,9)	9,81—12,8 (1,0—1,3)
4	37,3—43,1 (3,8—4,4)	9,30—10,8 (0,95—1,1)
5	54,9—58,9 (5,6—6,0)	10,8—11,8 (1,1—1,2)
6	53,0—64,7 (5,4—6,6)	8,80—10,8 (0,9—1,1)
<i>Предчистовая клеть</i>		
1	49,0—59,8 (5,0—6,1)	49,0—59,8 (5,0—6,1)
2	98,1—125,5 (10,0—12,8)	49,0—62,8 (5,0—6,4)
3	155,0—189,0 (15,8—19,3)	52,0—62,7 (5,3—6,4)
4	260,0—272,0 (26,5—27,8)	64,7—67,5 (6,6—6,9)
5	270,0—322,0 (27,6—32,8)	53,9—64,7 (5,5—6,6)
6	306,0—365,0 (31,2—37,2)	50,9—60,7 (5,2—6,2)

Чистовые и предчистовые клетки проволочных станов имеют удлиненные стойки станин, громоздкие промежуточные стаканы, текстолитовые подшипники и чрезмерно длинные бочки рабочих валков. Несовершенная конструкция клетей, наличие зазоров между сопряженными деталями и значительная упругая деформация существенно снижают качество готовой продукции. В результате на проволочных станках с линейным расположением клетей получается ~3% брака, а количество вторых сортов составляет 1,5—2% от производства годного. Более точные размеры катанки получают на непрерывных станках, имеющих индивидуальные чистовые группы клетей для каждой нитки.

Замеры бунтов катанки на непрерывном проволочном стане 250 показали, что при общей длине раската около 1270 м изменение вертикального диаметра составляет в среднем 0,25—0,4 мм [47]. Продольная разнотолщинность катанки получается вследствие изменения межклетевого натяжения полосы. Дальнейшее повышение точности размеров катанки может быть достигнуто на современных непрерывных станках прокаткой без натяжения или прокаткой с регулируемым натяжением.

## КРУГЛАЯ СТАЛЬ

Исследования прокатки круглых профилей были проведены на линейных мелкосортных станках 250 и 350 [48].

Стан 250 предназначен для прокатки полос, шестигранника, круга, квадрата и периодических профилей. Исследование прокатки круга диаметром 16—18 мм провели при работе стана на обычных и жестких чистовых и предчистовых клетях. Замеры производили по высоте и ширине проб, отрезанных от переднего и заднего концов одной и той же штанги. Отклонения размеров переднего и заднего концов штанг, прокатанных на обычных клетях, сравнивали с отклонениями размеров таких же штанг, прокатанных в жестких клетях. В результате измерений установлено, что все круги, прокатанные на обычных и жестких клетях, находятся в пределах допусков повышенной точности по ГОСТ

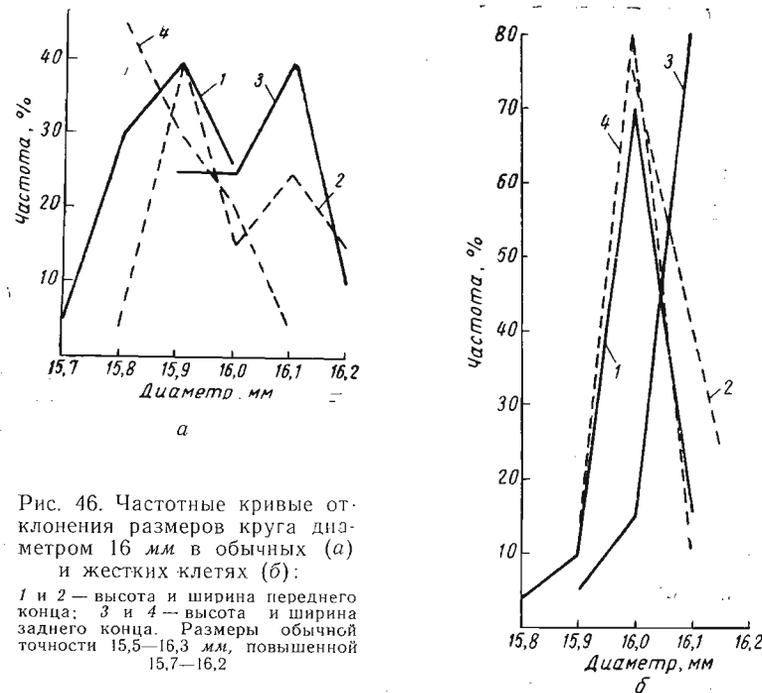


Рис. 46. Частотные кривые отклонения размеров круга диаметром 16 мм в обычных (а) и жестких клетях (б):

1 и 2 — высота и ширина переднего конца; 3 и 4 — высота и ширина заднего конца. Размеры обычной точности 15,5—16,3 мм, повышенной точности 15,7—16,2

2590—57. Причем для профилей, прокатанных на жестких клетях, интервал изменения высоты и ширины меньше, чем для профилей, прокатанных на обычных клетях.

Кривые отклонения размеров круга диаметром 16 мм представлены на рис. 46. Из рис. 46,а следует, что при прокатке в обычных клетях высота переднего конца полосы изменяется от 15,7 до 16 мм, высота заднего конца — от 15,9 до 16,2 мм; ширина переднего конца изменяется от 15,85 до 16,2 мм и заднего

Размеры (мм) круга при прокатке в обычных и жестких клетях на стане 350

конца — от 15,8 до 16,1 мм. Разность размеров по высоте переднего и заднего концов полосы изменяется от 0,1 до 0,25 мм, а по ширине — от 0,05 до 0,25 мм.

При прокатке круга диаметром 16 мм в жестких клетях основное число размеров колеблется в интервале 15,9—16,1 мм (см. рис. 46,б).

При этом число размеров по высоте переднего конца полосы в интервале 15,9—16 мм составляет 80% всех замеров (для обычных клетей 65%). Высота заднего конца полосы колеблется в интервале 16,0—16,1 мм, что составляет 95% всех замеров (для обычных клетей 65%). Разность замеров по высоте переднего и заднего концов полосы изменяется от 0,03 до 0,14 мм, а по ширине — от 0,02 до 0,11 мм. Аналогичные колебания размеров наблюдались при прокатке круга диаметром 17 и 18 мм.

Падение температуры раската от первой к последней клетке стана составляет 140—180 град, разность температуры переднего и заднего концов одной и той же полосы перед чистовой клетью равна 60—90 град. Подобные колебания температуры раската наблюдались как при прокатке в обычных, так и в жестких клетях.

Точность размеров круга, как показали опытные замеры, зависит не только от жесткости клетки и температуры раската, но также и от системы калибровки валков, своевременной подстройки чистовых и предчистовых клетей, типа и установки вводной арматуры, биения, износа и осевой фиксации валков. Использование подшипников качения в качестве опор валков и применение универсальных шпинделей для передачи валкам крутящего момента уменьшает вибрацию рабочих клетей, улучшает захват металла и повышает надежность работы стана.

В сортамент стана 350 входят следующие профили: круг диаметром 25—33 мм, квадрат 22—32 мм, шестигранник № 22 и 24, полоса гладкая 25 : 65 × 6 : 25 мм, полоса бульбовая 60 × 5 и 60 × 5 мм и другие. Для получения кругов точных размеров на чистовой линии стана вместо старых чистовой и предчистовой клетей установлены жесткие клетки; при прокатке рессорной полосы с параболическими кромками — одна жесткая чистовая клеть.

При работе стана на обычных и жестких клетях были произведены замеры круга диаметром 25, 28, 30 и 32 мм. Пробы отбирали от переднего и заднего концов одной и той же полосы после охлаждения. Усредненные данные замеров круглых профилей представлены в табл. 18. По результатам замеров строили частотные кривые отклонения размеров по высоте и ширине профиля. Анализ замеров показал, что размеры круга по вертикальному диаметру как в жестких, так и в обычных клетях имеют почти одинаковые отклонения. Колебания их размеров находились в пределах 0,1—0,24 мм и 0,1—0,3 мм.

Передний конец		Задний конец		Разность размеров	
высота	ширина	высота	ширина	по высоте	по ширине
Обычные клетки					
Круг диаметром 25 мм					
24,90	25,0	25,10	24,90	0,20	0,10
24,80	24,80	24,95	24,70	0,15	0,10
25,05	25,15	25,15	25,00	0,10	0,15
24,80	25,20	25,05	25,00	0,25	0,20
24,85	25,15	25,10	24,90	0,25	0,25
Круг диаметром 28 мм					
27,97	27,80	28,15	27,95	0,18	0,15
27,85	27,85	27,95	27,79	0,10	0,06
27,76	27,88	28,06	27,94	0,30	0,06
27,79	28,05	27,95	27,88	0,16	0,17
27,85	28,05	28,07	27,82	0,22	0,23
Круг диаметром 30 мм					
29,50	29,98	29,65	29,82	0,15	0,16
29,45	29,82	29,62	29,77	0,17	0,05
29,47	29,80	29,73	29,79	0,26	0,01
29,45	30,14	29,57	29,87	0,12	0,27
29,43	29,98	29,67	29,82	0,24	0,16
Жесткие клетки					
Круг диаметром 25 мм					
24,68	24,79	24,75	24,74	0,07	0,05
24,58	24,75	24,70	24,90	0,12	0,05
24,69	24,84	24,75	24,67	0,06	0,17
24,56	24,74	24,67	24,68	0,11	0,06
24,51	24,79	24,61	24,58	0,10	0,21
Круг диаметром 28 мм					
27,80	28,15	27,95	27,95	0,15	0,20
27,80	27,95	27,90	27,70	0,10	0,25
27,75	27,85	27,85	27,75	0,10	0,10
27,85	28,00	28,00	27,80	0,15	0,20
27,90	28,15	28,10	27,90	0,20	0,25
Круг диаметром 30 мм					
29,70	29,95	29,85	29,75	0,15	0,20
29,80	29,90	29,96	29,80	0,16	0,10
29,75	29,92	29,85	29,80	0,10	0,12
29,75	29,90	30,00	29,80	0,25	0,10
29,62	29,90	29,81	29,74	0,19	0,16

Разница в нагреве переднего и заднего концов раската перед чистовой клетью составляет 30—50 град. Пепепад температуры раската от первой к последней клетке стана 350 равен 170—290 град.

Существенное влияние на точность круглых профилей оказывает качество изготовления чистовых валков. На стане 350 были отобраны штанги диаметром 30 мм и длиной более 5 м,

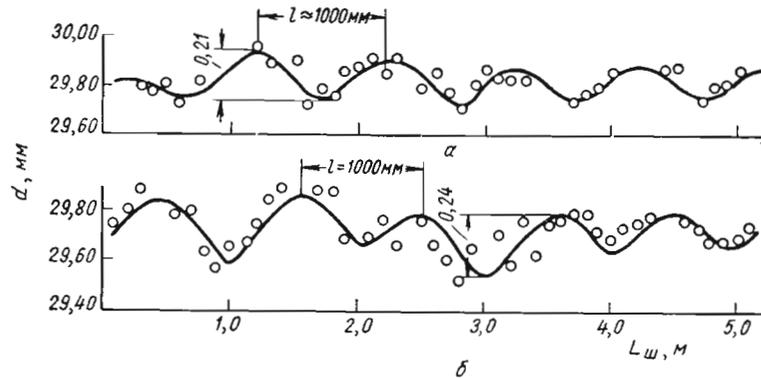


Рис. 47. Изменение размеров круга диаметром 30 мм по длине штанги ( $L_{ш}$ ):  
а — вертикальный диаметр; б — горизонтальный

которые измеряли по горизонтальному и вертикальному диаметрам с интервалом 100 мм. По измерениям выявилась периодичность изменения размеров по длине раската, которая соответствует длине окружности валка с учетом опережения, что свидетельствует о наличии эксцентриситета валков (рис. 47).

Потеря допуска в результате неточности изготовления валков по вертикальному диаметру составляет 0,21 мм, по горизонтальному диаметру 0,24 мм. Проверка индикатором точности изготовления калиброванных валков на вальцетокарном станке и в рабочей клетке показала аналогичные результаты. Таким образом, потеря допуска, вызванная овалностью валков, составляет ~30% допуска на горячекатаную сталь повышенной точности. Поэтому необходимо оснастить вальцетокарные мастерские станками, которые позволили бы производить расточку валков с эксцентриситетом не более 0,05 мм.

Исследования работы мелкосортных станов 250 и 350 показали, что при прокатке в жестких клетях можно сэкономить 1—1,5% металла за счет меньшего отклонения размеров готового проката. Опытные данные подтверждают необходимость дальнейших разработок новых конструкций жестких клетей для действующих, а также и для вновь строящихся прокатных станов.

## КВАДРАТНАЯ СТАЛЬ

Точность получаемых размеров квадратных профилей исследовали на линейном мелкосортном стане 260. Стан предназначен для прокатки квадратов стороной 12; 14 и 16 мм, круглой стали диаметром от 10 до 16 мм, оконнорамных профилей № 2, 3, 4, 6, специальных профилей № 5 и 6 для нефтяной промышленности, полос и других профилей из углеродистых и конструкционных сталей.

Чистовая линия стана состоит из пяти клеток переменного дуо. Последние четыре клетки образуют две непрерывные группы. Все клетки имеют станины закрытого типа, ручное нажимное и пружинное уравнивающее устройства. Подушки валков снабжены подшипниками скольжения открытого типа с текстолитовыми вкладышами. Диаметр валков 260—300 мм, длина бочки 750—500 мм. Привод первых четырех клеток осуществляется от электродвигателя мощностью 1100 квт,  $n=300—600$  об/мин, валки чистовой клетки приводятся двигателем мощностью 270 квт,  $n=390+900$  об/мин.

Замеры профиля провели при прокатке квадрата стороной 14 и 16 мм. Размеры вертикальной и горизонтальной диагоналей квадрата 16 мм фиксировали по длине полосы через каждые 2 м. Размеры диагоналей квадрата со стороной 14 мм определяли по переднему и заднему концам раската.

На рис. 48 представлены частотные кривые отклонения вертикальной и горизонтальной диагоналей чистового квадрата 14 мм при прокатке без натяжения. Размер вертикальной диагонали переднего конца полосы меньше размера вертикальной диагонали заднего конца на 0,12—0,18 мм. Примерно в таких же пределах лежали размеры горизонтальной диагонали чистового квадрата. Около 70% прокатанных полос имели отклонения по высоте ( $\leq 0,15$  мм) как переднего так и заднего концов.

Температура прокатки в чистовой клетке составляла 960—990°C для переднего и 910—940°C для заднего концов полосы.

При прокатке в непрерывно расположенных отделочных клетях без натяжения для изучения характера изменения размеров вертикальной и горизонтальной диагоналей квадрата 16 мм отбирали полосы длиной 36—40 м. Эти полосы охлаждались до температуры окружающей среды и с помощью микрометра их измеряли с точностью 0,05 мм. График колебаний размеров диа-

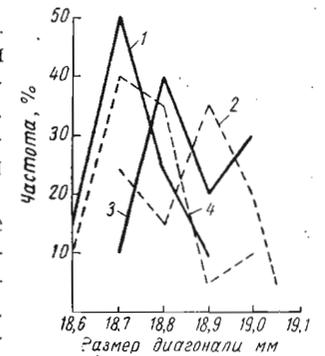


Рис. 48. Частотные кривые отклонения вертикальной (1, 2) и горизонтальной (3, 4) диагоналей переднего и заднего концов чистового квадрата 14 мм

гоналей по длине раската представлен на рис. 49. Размер горизонтальной диагонали изменялся от 21,3—21,6 мм на переднем до 21,7—22,1 мм на заднем концах раската. Колебания разме-

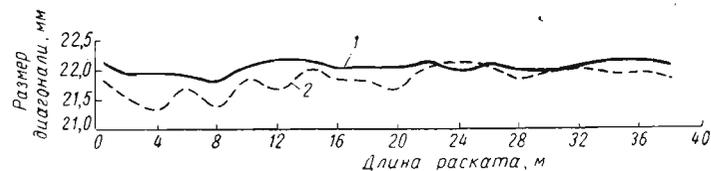


Рис. 49. Изменение размеров диагоналей квадрата 16 мм по длине раската  $L_p$ :

1 — вертикальная диагональ; 2 — горизонтальная диагональ

ров вертикальной диагонали были менее значительны и составляли соответственно 21,85—22,1 мм и 22,0—22,2 мм.

Как отмечалось ранее, значительное влияние на размеры чистового квадрата оказывает межклетевое натяжение металла. Чем больше рассогласование скоростей вращения валков, тем меньше при прочих равных условиях поперечное сечение прокатываемого профиля (см. рис. 22).

### ПОЛОСОВАЯ СТАЛЬ

Исследования прокатки полосовой стали проводили на мелкосортных станах 260 металлургического завода им. Коминтерна и 350 Донецкого металлургического завода.

На стане 260 прокатывали полосы  $36 \times 6$  мм в непрерывно расположенных клетях чистовой линии с рассогласованием скоростей вращения валков  $\epsilon = 5-12\%$ . Полосы длиной 50—60 м охлаждали до 20—40°C и измеряли толщину и ширину по длине раската с интервалом 2 м. Изменение размеров полосы по длине раската показано на рис. 50.

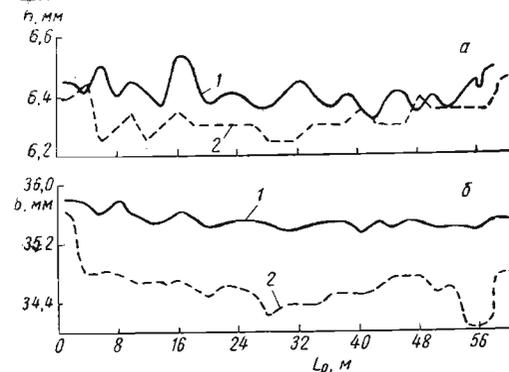


Рис. 50. Изменение размеров полосы  $36 \times 6$  мм по длине раската  $L_p$  при  $\epsilon$ , %:

1 — 5; 2 — 11

Замеры показали, что толщина полосы (рис. 50, а) при прокатке с рассогласованием скоростей валков  $\epsilon = 5\%$  изменяется в пределах от 6,3 до 6,5 мм. Более 70% полос имели отклонения по высоте, не превышающие 0,11 мм. При прокатке с рассогла-

сованием скоростей валков  $\epsilon = 11\%$  толщина полосы уменьшилась в среднем на 0,08—0,1 мм.

С увеличением межклетевого натяжения возрастает утяжка прокатываемого профиля. Ширина полосы (рис. 50, б) при увеличении рассогласования скоростей валков с 5 до 11% уменьшилась в среднем на 0,9—1,1 мм. Отклонения размеров полосы при установившемся процессе прокатки менее значительны, чем в начале и конце процесса.

Таблица 19

Размеры (мм) полосы  $45 \times 6$  мм при прокатке на стане 350

Передний конец		Задний конец		Разность размеров	
высота	ширина	высота	ширина	по высоте	по ширине
<i>Обычные клетки</i>					
5,82	44,75	6,05	44,63	0,23	0,12
5,87	44,82	6,08	44,70	0,21	0,12
5,82	44,92	6,07	44,75	0,25	0,17
5,88	45,00	6,11	44,78	0,23	0,12
5,85	44,66	6,07	44,60	0,22	0,06
5,85	44,80	6,10	44,75	0,25	0,05
5,85	44,90	6,03	44,62	0,12	0,28
5,87	44,81	6,09	44,69	0,22	0,12
5,83	44,90	6,02	44,69	0,19	0,21
5,83	44,87	6,02	44,83	0,19	0,04
5,87	44,67	6,01	44,82	0,24	0,15
5,81	44,76	6,05	44,65	0,24	0,11
5,82	44,93	6,05	44,64	0,23	0,29
5,82	44,88	6,02	44,69	0,20	0,19
5,86	44,91	6,07	44,75	0,21	0,16
<i>Жесткие клетки</i>					
6,02	44,90	6,06	44,80	0,04	0,10
6,05	45,00	6,10	44,80	0,05	0,20
6,02	44,80	6,06	44,60	0,04	0,20
6,01	44,90	6,08	44,80	0,07	0,10
6,06	44,90	6,11	44,70	0,05	0,20
6,04	44,80	6,10	44,70	0,06	0,10
6,05	44,90	6,11	44,80	0,06	0,10
6,05	44,90	6,08	44,80	0,03	0,10
6,05	44,85	6,10	44,70	0,05	0,15
6,08	44,90	6,10	44,80	0,02	0,10
6,07	44,90	6,11	44,80	0,04	0,10
6,05	44,70	6,09	44,80	0,04	0,10
6,05	44,90	6,10	45,00	0,05	0,10
6,07	44,90	6,12	44,80	0,05	0,10
6,05	44,90	6,12	44,70	0,07	0,20

На стане 350 исследовали точность размеров рессорной полосы  $45 \times 6$  мм с параболическими кромками при прокатке без натяжения в обычных и жестких чистовых клетях. Рессорную полосу прокатывали из стали 50ХГА и 60С2А с допусками по

толщине +0,15 и -0,18 мм. Для замера отбирали пробы от переднего и заднего концов одной и той же полосы после ее охлаждения. Отклонение размеров полос, прокатанных в обычных клетях, сравнивали с отклонениями размеров полос, прокатанных в жесткой чистовой клетке. Результаты измерений рессорной полосы 45×6 мм приведены в табл. 19.

Из приведенных данных следует, что высота переднего конца полосы при прокатке в обычных клетях изменялась в пределах от 5,81 до 5,88 мм, а заднего конца от 6,01 до 6,11 мм. При прокатке в жесткой чистовой клетке высота полосы изменялась на переднем конце от 6,01 до 6,08 мм, на заднем конце — от 0,06 до 6,12 мм. Отклонения размеров рессорной полосы, прокатанной в жесткой клетке, не превышали 0,07 мм. На обычных клетях отклонения размеров по высоте полосы достигали 0,25 мм. Таким образом, применение жесткой чистовой клетки дает возможность получить рессорную полосу в пределах допусков повышенной точности, улучшить качество выпускаемой продукции и сэкономить около 2,5% металла на каждом погонном метре профиля.

#### УГЛОВАЯ СТАЛЬ

Исследование точности размеров уголков провели на мелко-сортных станах 280 и 330 с линейным расположением клетей.

Мелкосортный стан 280 расположен в две линии. Черновая линия стана состоит из рабочих клетей трио, чистовая линия — из клетей дуо и переменное дуо. Привод клетей чистовой линии осуществляется от электродвигателя мощностью 752 кВт,  $n=425$  об/мин. Задняя сторона чистовой линии оборудована обводными аппаратами. Стан предназначен для прокатки угловой стали 32×32×4 мм, 25×25×3 мм, 20×20×3 мм, квадратной стали 16 мм и других профилей.

Чистовая двухвалковая клеть стана имеет стальные станины закрытого типа. Диаметр рабочих валков 280—320 мм, длина бочки 530 мм, материал валков — закаленный чугун. Перемещение верхнего валка осуществляется при помощи винтового нажимного устройства, перемещение нижнего валка — при помощи клинового регулирующего устройства, установленного между нижней подушкой и поперечной станины. В качестве опор рабочих валков применяются подшипники скольжения с цельнопрессованными текстолитовыми вкладышами, смазка и охлаждение которых производится водой. Скорость выхода прокатываемой полосы из чистовой клетки составляет 4—6,5 м/сек.

Для получения данных о точности размеров проката на стане 280 были проведены замеры ширины и толщины полок равнобокого уголка 25×25×3 мм. Допускаемые отклонения размеров уголка составляют: по толщине полки ± 0,4 мм, по ширине полки ± 1,0 мм. Замеры производили на переднем и заднем концах каждой десятой полосы в течение всего времени работы одного

калибра. В среднем за смену в калибре прокатывалось 55 т металла. Данные фактических замеров уголка приведены в табл. 20.

Таблица 20

Отклонение (%) размеров уголка 25×25×3 мм от номинальных

Ширина, мм	Левая полка		Правая полка		Толщина, мм	Левая полка		Правая полка	
	передний конец	задний конец	передний конец	задний конец		передний конец	задний конец	передний конец	задний конец
24,4	1,3	2,6	2,0	—	2,7	1,3	1,3	2,6	2,6
24,5	—	—	2,0	—	2,75	1,3	—	2,6	—
24,6	4,0	1,3	—	—	2,8	—	—	8,0	2,6
24,7	4,0	1,3	1,3	1,3	2,85	6,6	1,3	1,3	1,3
24,8	5,3	2,6	5,3	—	2,9	9,4	2,6	6,6	2,6
24,9	14,7	5,3	8,0	5,3	2,95	6,6	4,0	5,4	6,6
25,0	5,7	9,6	5,6	6,6	3,0	7,1	10,2	5,8	13,9
25,1	5,5	9,4	2,6	5,4	3,05	12,0	15,4	9,3	14,7
25,2	13,2	12,0	8,0	5,5	3,1	13,2	14,0	10,6	13,2
25,3	9,3	4,0	6,7	15,7	3,15	6,6	10,0	10,6	8,0
25,4	9,2	12,0	6,6	5,5	3,2	8,0	9,3	13,2	4,0
25,5	10,6	8,0	10,6	8,0	3,25	5,4	8,0	4,0	5,4
25,6	4,0	12,0	6,7	6,7	3,3	8,0	5,4	5,4	10,6
25,7	1,3	6,6	10,6	12,0	3,35	6,7	8,0	1,3	8,0
25,8	1,3	4,0	8,0	8,0	3,4	1,3	2,6	5,3	1,3
25,9	4,0	4,0	4,0	5,4	3,45	1,3	2,6	4,0	2,6
26,0	4,0	1,3	1,3	5,3	3,5	2,6	1,3	4,0	—
26,1	1,3	—	5,4	—	3,55	2,6	4,0	—	2,6
26,2	1,3	4,0	5,3	9,3	3,6	—	—	—	—

Из приведенных данных следует, что количество полос с номинальным размером полок по ширине составляло 5—10%, по толщине 6—14% от общего количества прокатанного металла. Минусовый допуск по ширине полки имели от 7 до 30% полос, а по толщине — от 9 до 27%. Таким образом, более 60% уголков прокатывалось с плюсовым допуском.

Размеры прокатываемого профиля постепенно увеличивались к концу работы калибра, что происходило, по-видимому, за счет износа. Толщина полки заднего конца уголка несколько больше, чем переднего. При этом температура переднего конца полос составляла 1100—1120°C, а заднего 1020—1050°C. Утолщение полки уголка происходит, очевидно, вследствие увеличения упругой деформации клетки при снижении температуры металла.

Мелкосортный стан 330 состоит из двух линий: черновой и чистовой. Чистовая линия имеет четыре клетки переменное дуо и одну клеть дуо. Стан предназначен для прокатки угловой неравнобокой стали, угловой равнобокой стали, круглой стали и других профилей.

Чистовая двухвалковая клетка имеет стальные станины закрытого типа. Рабочие валки изготовлены из отбеленного чугуна; диаметр валков 330—375 мм, длина бочки 600 мм. Перемещение верхнего валка производят вручную при помощи винтового нажимного механизма, а нижнего валка — клиновым регулирующим устройством. В качестве опор рабочих валков используют подшипники скольжения с цельнопрессованными текстолитовыми вкладышами. Скорость прокатки в последней клетке составляет 3,0—4,5 м/сек. Число оборотов валков чистой линии стана лежит в пределах 190—336 в минуту.

Детали рабочих клетей имеют значительную выработку сопряженных поверхностей. Недостаточная подгонка винтов, подушек, клиньев, текстолитовых вкладышей приводит к увеличению упругой деформации клетей и понижению точности прокатки.

Данные о действительных размерах проката на стане 330 были получены в результате замера ширины и толщины полок неравнобокого уголка 28×45×4 мм. Пробы отбирали от переднего и заднего концов каждой шестой полосы после ее ох-

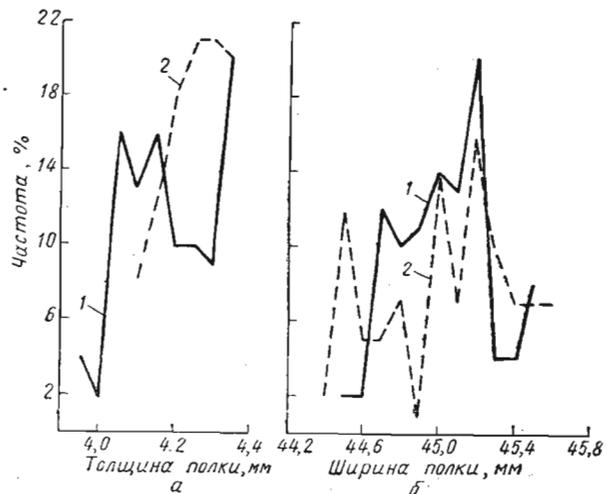


Рис. 51. Частотные кривые отклонения размеров уголка 28×45×4 мм:  
1 — передний конец; 2 — задний конец

лаждения в течение всего времени работы одного калибра. Температуру металла замеряли оптическим пирометром перед прокаткой в чистой клетке. Для переднего конца полосы она составляла 1050—1070°C, заднего конца 960—990°C. Результаты замеров уголка 28×45×4 мм представлены в виде частотных кривых на рис. 51.

Замеры показали, что количество уголков с номинальными размерами составляет по ширине полки 5—14% (рис. 51, б) и по

толщине 2—16% (рис. 51, а). Количество уголков, имеющих минусовый допуск, лежит в пределах от 2 до 35% по ширине и от 2 до 4% по толщине полки. Размеры проката, как правило, увеличиваются к концу работы калибра, который в значительной степени изнашивается. За счет охлаждения металла и увеличения упругой деформации клетки толщина заднего конца полосы больше, чем переднего.

Исследование точности размеров угловых профилей и изучение условий работы мелкосортных станов с линейным расположением клетей подтверждают необходимость дальнейшего улучшения технологии прокатки и совершенствования прокатного оборудования.

Улучшить качество и повысить точность размеров угловых профилей можно при прокатке их на непрерывных станах. Исследования, проведенные на мелкосортном стане 250 [35, с. 79—93], показали, что прокатка уголков с небольшим натяжением обеспечивает устойчивое положение полосы в калибре. Наличие в составе непрерывного стана клетей с вертикальным расположением валков позволяет применить ребровые калибры, которые при прокатке со свободным уширением гарантируют получение симметричного и точного углового профиля.

В отличие от станов линейного типа на непрерывном стане можно применить открытые предчистовые калибры и дублирование чистовых калибров. Два последних одинаковых по форме калибра позволяют значительно повысить стойкость рабочих валков и при минимальном обжатии порядка 0,2—0,5 мм получить высокую чистоту поверхности проката. Дублирование чистовых калибров упрощает настройку стана при переходе на прокатку уголков с различной толщиной стенки, уменьшает общий парк валков и позволяет использовать отработанные валки в качестве предчистовых.

Средний выход I сорта уголков 40×40×4 и 36×36×4 мм при прокатке на непрерывном стане 250 равен 99%. Такой же выход I сорта получен при опытной прокатке 137 т уголков с толщиной полки 3 мм.

Результаты замеров обычных и тонкостенных уголков показали, что максимальное отклонение ширины полки выходит за пределы допусков. Среднеарифметическая величина ширины полки составляет 40,2 мм для тонкостенного и 40,1 мм для обычного уголка. Изменение ширины полок уголков колеблется в пределах до 0,5 мм.

## Глава V НОВЫЕ КОНСТРУКЦИИ ПРОКАТНЫХ КЛЕТЕЙ

### ТЕНДЕНЦИИ В РАЗВИТИИ КОНСТРУКЦИИ КЛЕТЕЙ

В последнее время на сортовых и проволочных станах начали применять клетки специальных конструкций, жесткость которых в несколько раз выше, чем у обычных клеток. Жесткость клеток

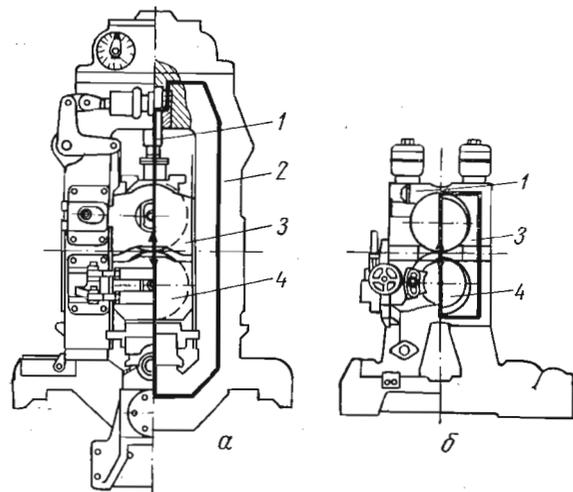


Рис. 52. Прокатные клетки:  
а — обычной конструкции; б — с предварительно сжатыми подушками; 1 — нажимное устройство; 2 — станина; 3 — подушка; 4 — рабочий валок

повышается при использовании таких узлов и механизмов, которые при меньшей массе обеспечивают соблюдение необходимых эксплуатационных показателей.

Наиболее важными деталями клетки являются станины, которые выполняются массивными с большим запасом прочности для уменьшения их деформации. Исследования жесткости станины тонколистовых и сортовых станов показали, что деформация их составляет 5—15% от общей деформации клетки [3, 18, 23, 49].

Вес станин открытого и закрытого типов может быть уменьшен без снижения их жесткости выбором рациональных форм и сечений отдельных элементов, а также применением материалов с более высокими механическими свойствами. Так, на некоторых современных прокатных станах с подшипниками качения, которые имеют большое отношение внутреннего диаметра к наружному, станины клеток заменены массивными подушками и связывающими их деталями [50, 51, 52, 53]. Сокращение числа деталей, воспринимающих усилие прокатки, дает возможность

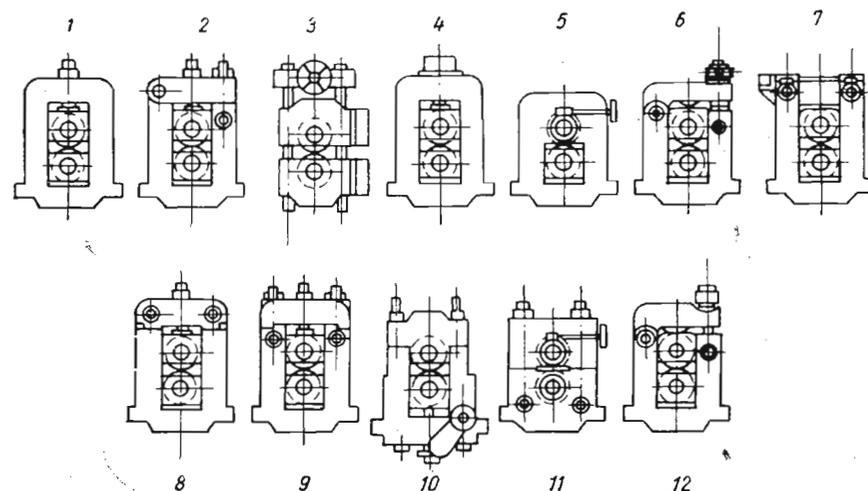


Рис. 53. Клетки сортовых и проволочных станов:  
1 — 7 — ненапряженные клетки; 8 — 12 — напряженные клетки

уменьшить габариты конструкции и повысить ее жесткость. На рис. 52 показана клетка обычного типа и новая клетка с предварительно сжатыми подушками. Упругий контур у новой клетки, показанный жирной линией, значительно меньше, чем у старой.

Тип станин недостаточно полно характеризует конструкцию клетки, так как не отражает условий работы ее основных деталей. Поэтому прокатные клетки целесообразно подразделять на напряженные, т. е. имеющие предварительно напряженные детали, и ненапряженные.

Применяемые для сортовых и проволочных станов ненапряженные клетки имеют главным образом станины закрытого типа, а напряженные — открытого типа. На рис. 53 схематически представлены различные конструкции применяемых клеток и возможные исполнения новых клеток для сортовых и проволочных станов.

Ненапряженные клетки с цельными или открытыми станина-

ми 1, 2 выполнены обычно с винтовыми или клиновыми установочными механизмами. Рабочие валки этих клетей установлены на текстолитовых подшипниках, подшипники качения или жидкостного трения. Бесштанная клеть 3 имеет винтовой установочный механизм, а ее валки снабжены самоустанавливающимися подшипниками качения. Ненапряженные клетки могут быть также с гидравлическим 4, втулочно-эксцентриковым 5, рычажно-винтовым 6 и червячно-эксцентриковым 7 установочными механизмами. Рабочие валки таких клетей могут быть установлены на любых подшипниках. Исключение составляет 5-я клеть, для верхнего валка которой требуются только самоустанавливающиеся подшипники качения, так как втулочно-эксцентриковый установочный механизм не компенсирует изгиба валков.

Клетки с напряженными деталями, имеющие станины открытого типа, выполнены с предварительно напряженными соединительными деталями верхних поперечин 8 и с предварительно сжатыми поперечинами 9 и 10. В этих клетях применяют винтовые или клиновые установочные механизмы, а рабочие валки устанавливаются на подшипниках скольжения, качения или жидкостного трения. Клеть 11 с предварительно сжатыми подушками, имеющая втулочно-эксцентриковый установочный механизм, снабжена только самоустанавливающимися сферическими роликовыми подшипниками. Другие подшипники в этой клетке неприменимы. Полностью напряженная клетка 12 может быть выполнена с предварительно сжатыми валками и рычажно-гидравлическим установочным механизмом. Рабочие валки такой клетки целесообразно устанавливать на подшипниках качения или жидкостного трения. Усилие предварительного нагружения в клетях 9—12 должно быть больше усилия, действующего на нагруженные элементы при прокатке.

В тех случаях, когда необходимо сохранить постоянство размеров прокатываемой полосы, следует обращать внимание не только на жесткость станин, но и на жесткость других деталей: валков, подшипников, предохранительных стаканов, установочных и регулирующих устройств. Это объясняется тем, что при изменении давления в процессе прокатки деформация станин будет оказывать меньше влияния на изменение размеров профиля, чем деформация других деталей клетки.

Жесткость прокатной клетки значительно повышается при уменьшении прогиба рабочих валков. Практически это достигается предварительным сжатием валков перед прокаткой [54, 55]. По краям или середине бочки валков делают бурты, по которым происходит соприкосновение валков в клетке (рис. 54). С помощью нажимного устройства валки нагружаются силой  $P_{сж}$ , большей или равной давлению прокатки  $P$ . Под действием нагрузки бурты сплющиваются, а валки изгибаются. Во время прокатки величина сплющивания буртов уменьшается, а прогиб валков увеличивается пропорционально некоторой силе ( $P_{сж} +$

$\Delta P$ ), зависящей от давления металла на валки и жесткости рабочей клетки. В итоге величина прогиба предварительно нагруженных валков, определяющая точность размеров проката, в несколько раз меньше прогиба ненагруженных валков.

Как отмечалось, в конструкциях прокатных станов широкое применение получили подшипники качения и жидкостного трения. Одно из достоинств подшипников жидкостного трения состоит в продолжительном сроке их службы.

Правильно рассчитанные и спроектированные подшипники при качественном их изготовлении и надлежащей эксплуатации могут служить в продолжение 10—15 лет [56].

Деформация подшипников жидкостного трения меньше деформации подшипников качения, а их высокая жесткость положительно сказывается на точности проката. Подшипники

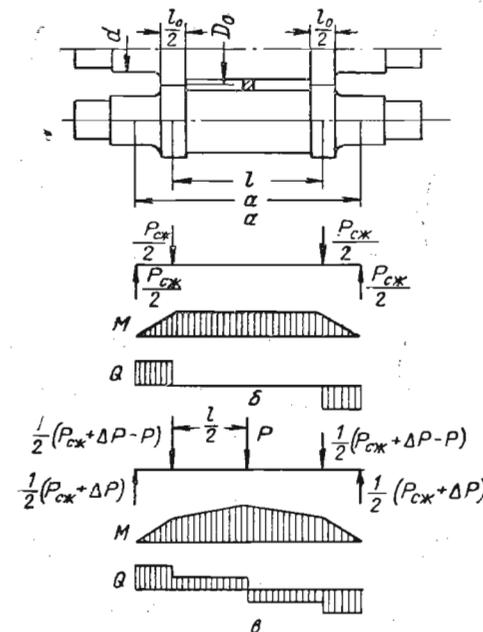


Рис. 54. Предварительно нагруженные валки:

а — установка валков; б — схема сил, действующих на валок при нагружении; в — схема сил, действующих на валок при прокатке;  $M$  и  $Q$  — эпюры изгибающих моментов и поперечных сил

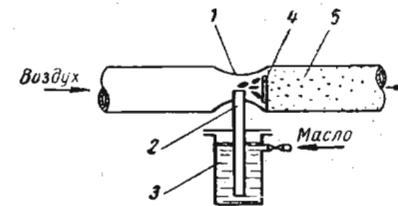


Рис. 55. Схема генератора, создающего масляный туман

жидкостного трения допускают увеличение шейки валка до 75% от диаметра бочки и окружные скорости цапфы до 25—30 м/сек с сохранением высокой точности прокатки. При этом удельные давления на площадь диаметрального сечения подшипника могут достигать  $19,6 \cdot 10^3 \div 24,5 \cdot 10^3$  кН/м<sup>2</sup> (200—250 кг/см<sup>2</sup>).

На многих станах, работающих с большими скоростями, валки установлены на двух- и четырехрядных роликовых подшипниках. В черновых клетях прокатку ведут с большими усилиями при малых числах оборотов валков. В чистовых клетях усилия прокатки небольшие, но числа оборотов валков велики. В соответствии с этим к подшипникам черновых и чистовых клетей должны предъявляться различные требования.

При скоростях прокатки 0,2—10 м/сек хорошо работают самоустанавливающиеся роликовые подшипники, а при скоростях 15—30 м/сек — четырехрядные, с цилиндрическими роликами. Подшипники с цилиндрическими роликами просты в обслуживании, а их упругая деформация меньше, чем у подшипников с самоустанавливающимися роликами.

Исследованиями установлено, что допустимое число оборотов самоустанавливающихся или соответствующих им подшипников с цилиндрическими роликами зависит от рода смазки. Смазка подшипников масляным туманом или жидкой смазкой значительно повышает допустимую скорость прокатки [57, 58]. Для предотвращения контакта между трущимися деталями их поверхности должны быть разделены пленкой масла, имеющей толщину не менее 0,05 мм. Смазка масляным туманом является непрерывной, постоянно обновляемой и наиболее полно удовлетворяет этому требованию.

Принцип работы генератора (рис. 55), создающего масляный туман, основан на эффекте Вентури. Воздух, проходящий через трубку 1, увлекает частицы масла, поступающие по всасывающей трубе 2 из резервуара 3. Далее частицы масла распыляются, обтекая отрагатель-турбулизатор 4, и в виде масляного тумана 5 (частицы размером менее 5 мкм) поступают по трубкам к подшипникам.

Смазка масляным туманом применяется в роликовых и шариковых подшипниках диаметром от 152 мм и выше. В зависимости от конструкции подшипника и его скоростного режима устанавливается определенное число сопел с диаметром отверстия 1,4—1,7 мм. Воздух, несущий частицы масла, создает в подшипнике положительное давление, способствующее предотвращению проникновения посторонних частиц. Смазка масляным туманом предохраняет подшипник от загрязнения, снижает температуру и увеличивает его стойкость. Расход масла при смазке масляным туманом сокращается на 80—90%.

Стойкость роликовых опор значительно меньше при их неправильной установке и попадании воды внутрь подшипника. Срок службы подшипников сокращает опрокидывающий момент, возникающий в результате прогиба валков. По этой причине при многониточной прокатке проволоки продолжительность работы подшипников сокращается вдвое.

Опыт эксплуатации подшипников качения на непрерывных станах завода «Криворожсталь» показал, что в тяжело нагруженных клетях черновых групп подшипники служат в среднем 10—12 суток. Недостаточен срок их службы и в чистовых клетях. Так, например, за год работы непрерывного проволочного стана 250 вышло из строя 1550 подшипников качения [29, с. 159—160]. Анализ работы подшипников выявил необходимость существенного улучшения конструкции опор и целесообразность

замены их более надежными. В связи с низкой стойкостью цилиндрических и сферических роликовых подшипников завод принял решение о переводе опор валков проволочного стана на подшипники жидкостного трения.

Для самоустановки подушек при прогибе валков и равномерного распределения нагрузки между рядами роликовых подшипников в чистовых клетях проволочных станов применяют сменные кассеты [59]. Сменная кассета (рис. 56) состоит из салазок 1, в которых установлены подушки 3 верхнего и нижнего валков. При прогибе валков в процессе прокатки подушки поворачиваются вокруг оси цапф 2. Роликовые подшипники, благодаря самоустановлению подушек, не испытывают повышенных нагрузок на кромки крайних рядов роликов, в результате чего срок их службы увеличивается даже при скоростях прокатки, достигающих 36 м/сек.

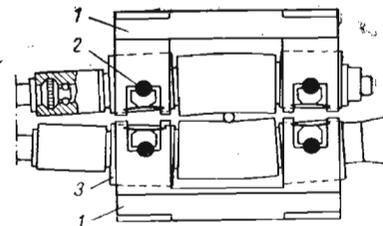


Рис. 56. Сменная кассета с рабочими валками

Для передачи вращения рабочим валкам при высоких скоростях прокатки на современных сортовых и проволочных станах применяют шпindelные соединения новых конструкций. В универсальных шпинделях обычной конструкции детали подвергаются быстрому износу под действием трения скольжения при их взаимном перемещении. Вибрации и динамические удары в шарнирных соединениях уменьшают продолжительность работы подшипниковых узлов и точность прокатки.

На рис. 57,а показано устройство шарнирного шпинделя с масляной ванной [50]. На тряфе рабочего валка 1 под давлением масла насажена обойма 8 с гильзой 3. Внутренняя полость обоймы со стороны шпинделя 6 закрыта крышкой 4. Между крышкой и обоймой крепится с помощью винтов 7 деревянное кольцо 5, ограничивающее перемещение лопасти шпинделя в сторону привода. Со стороны рабочей клетки шпиндель фиксируется деревянной пробкой 2, вставленной в отверстие валка. Между лопастью шпинделя и обоймой установлены вкладыши 9 с цилиндрической поверхностью.

Когда стан не работает, ванна наполняется маслом до уровня отверстия в крышке 4. При вращении шпинделя 6 смазка отбрасывается от центра и заполняет все пространство между трущимися поверхностями шарнирного соединения. Наличие масляной ванны обеспечивает длительную и надежную работу шарнирных соединений шпинделя при скорости прокатки 19—22 м/сек.

На рис. 57,б показан универсальный шаровой шпиндель конструкции Днепропетровского металлургического института.

Шпиндель предназначен для передачи вращения валкам чистовых клетей непрерывного проволочного стана 250 при скорости прокатки, достигающей 30 м/сек. Узел шарнира шпинделя состоит из обоймы 2, в которой простроганы пазы полукруглой формы, шаров 3 и головки шпинделя 4 с лунками под шары. Осевое перемещение шпинделя ограничено с одной стороны диафрагмой 1, в которой пружиной 8 прижата упорная втулка 9, с другой стороны — шайбой 7 и крышкой 5. Между шайбой и

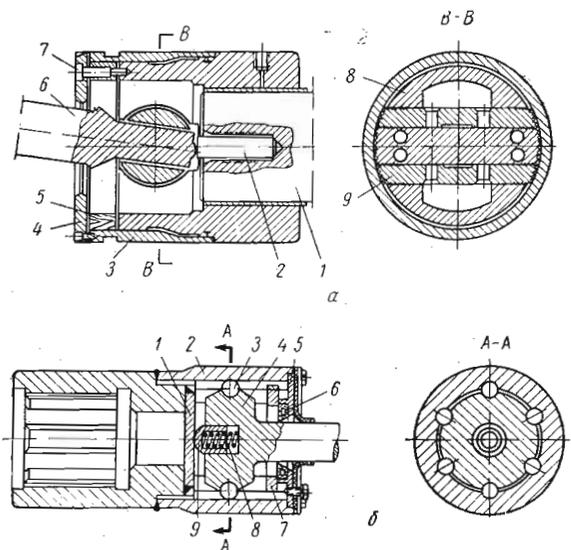


Рис. 57. Схема шарнирного шпинделя с масляной ванной (а) и универсального шарового шпинделя (б)

крышкой установлено уплотнительное кольцо 6. Жидкое масло, находящееся в шарнире, под действием центробежной силы прижимается к внутренним стенкам обоймы и смазывает поверхности шаров и сферических лунок.

Допускаемый угол перекоса универсального шарового шпинделя определяют по формуле

$$\alpha = \arccos \left[ 1 - \frac{r}{R} \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{8\rho\delta}{r^2}} \right) \right], \quad (115)$$

- где  $r$  — радиус лунки и полукруглого паза;  
 $R$  — радиус положения центров шаров относительно оси шпинделя;  
 $\rho$  — радиус шара;  
 $\delta$  — зазор между головкой шпинделя и обоймой.

Расчет на прочность элементов шарнира производят исходя из допускаемых контактных напряжений, действующих на поверхности сжимаемых тел.

Длительная проверка шпинделя в работе на чистовых клетях стана 250 показала его надежность при высоких скоростях прокатки и углах перекоса, не превышающих 10 град.

На новых станах, проектируемых фирмой Demag, используют универсальные шпиндели с шаровыми шарнирами [60]. Шарики расположены между полуцилиндрическими корригированными канавками, выполненными во внешней и внутренней обоймах шарнира. Для удобства монтажа и демонтажа шарики устанавливают в сепараторах, которые не нагружаются в направлении вращения, а воспринимают лишь незначительные нагрузки в осевом направлении при перекосах шпинделя.

### КЛЕТИ С ПРЕДВАРИТЕЛЬНО СЖАТЫМИ ПОДУШКАМИ

Предварительное нагружение прокатной клетки позволяет сократить количество деталей, устранить зазоры между их соприкасающимися поверхностями, уменьшить габариты и повысить жесткость конструкции. Предварительному нагружению можно подвергать как отдельные детали, так и клеть в целом. К предварительно нагруженным клетям относятся клетки с предварительно сжатыми подушками и с предварительно сжатыми валками.

При предварительном нагружении подушек валки находятся в свободном состоянии и между ними имеется необходимый зазор. Регулирование валков в горизонтальном и вертикальном направлениях, т. е. настройка, не требует разгрузки подушек. Клетки подобного типа должны иметь короткие валки, т. к. их прогиб невозможно устранить предварительным сжатием подушек.

При предварительном нагружении валков все элементы конструкции находятся в сжатом состоянии. Настройка клетки может быть осуществлена лишь после снятия первоначальной нагрузки. В клетки с предварительно сжатыми валками можно частично или полностью устранить влияние прогиба валков на точность прокатки.

Напряженные клетки с предварительно сжатыми подушками впервые были установлены на мелкосортных и проволочных станах заводов фирмы SKF в Швеции [51], а затем на некоторых заводах Италии, ФРГ, Японии, ЧССР и других стран.

Устройством клетки с предварительно сжатыми подушками конструкции Левфена показано на рис. 58. Две подушки 1 и 4 на каждой стороне валков стянуты между собой толстыми болтами 2 с силой, превышающей максимальное давление на шейке. Такое предварительное нагружение устраняет все зазоры в соединениях между подушками и стягивающим устройством. Дав-

ление, воспринимаемое валками, передается непосредственно от подшипников к соединительным деталям.

Грубую вертикальную установку валков производят в ремонтной мастерской при помощи прокладок 3. Точную вертикальную установку осуществляют вращением при помощи червячной передачи 5 эксцентриковой втулки 7, охватывающей подшипник 8 верхней подушки. Нижние подшипники также смонтированы во втулках, причем на стороне фиксирующего подшипника втулка снабжена двумя приливами 9, через которые про-

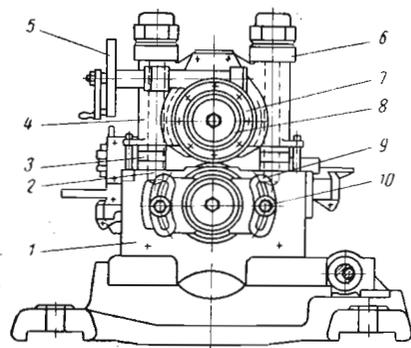


Рис. 58. Предварительно напряженная клетка конструкции Левфена

ходят два болта 10. С помощью этих болтов можно изменять положение валка в осевом направлении. Втулки верхних и нижних подшипников на свободной стороне могут перемещаться в подушках; в случае поломки валков они смещаются так быстро, что нет никакой опасности повредить подшипники и подушки.

Соединительные болты должны быть предварительно затянуты с силой, превышающей максимально возможное давление на валки. Эту затяжку осуществляют с помощью

гидравлических гаек 6. Силу натяжения болта можно измерить, присоединив манометр к трубке, подающей масло под давлением.

Предчистовые и чистовые клетки проволочного стана имеют валки диаметром 257—285 мм и длину бочки 350 мм. Такое соотношение размеров обеспечивает высокую жесткость клетки и позволяет производить прокат высокой точности. В качестве опор валков используют самоустанавливающиеся сферические роликовые подшипники по одному на каждой шейке валка. Игра валков в предварительно напряженной клетке зависит от упругой деформации деталей, а также зазоров в подшипниках качения и между втулками и подушками. При изготовлении втулок и подушек по второму и третьему классу точности суммарная величина зазоров достигает 0,3—0,5 мм.

Прокатку металла в клетях подобной конструкции ведут обычно в одну нитку. Небольшие габариты клетки, высокая жесткость деталей и главным образом короткие рабочие валки дают отклонение размеров катанки от номинальных не более  $\pm 0,1$  мм.

Клетка с предварительно сжатыми подушками не имеет станин, что значительно снижает ее вес. Так, рабочая клетка с валками диаметром 400 мм в обычном исполнении весит 25,4 т, а предварительно напряженная клетка 4,2 т [61].

Существенным недостатком клеток с предварительно сжатыми подушками является невозможность применения подшипников высокой грузоподъемности: многорядных роликовых и подшипников жидкостного трения.

Непрерывный проволочный стан 280 Череповецкого металлургического завода имеет четыре чистовые группы, состоящие каждая из трех горизонтальных и трех вертикальных напряженных клеток с предварительно сжатыми подушками. Стан изготовлен в ЧССР и предназначен для прокатки катанки диаметром 5—10 мм с допускаемыми отклонениями размеров  $\pm 0,2$  мм. Отличительной особенностью установки рабочих клеток является

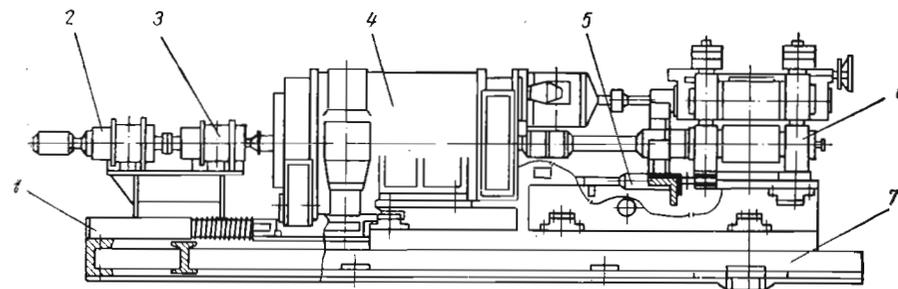


Рис. 59. Установка предварительно напряженной клетки на проволочном стане 280

отсутствие в их приводе редукторов и шестеренных клеток (рис. 59). Предварительно напряженную клетку 6 с главным электродвигателем 4 устанавливают на подвижной раме 1, которую крепят к плитовине 7 зажимными устройствами. На конце главного двигателя расположено таходинамо 3 системы регулирования числа оборотов и центробежный выключатель 2. Нижний валок клетки приводится во вращение непосредственно от главного двигателя, верхний валок — вспомогательным разгонным двигателем. Перемещение клетки в горизонтальном направлении производится регулирующим механизмом 5. Перевалка валков осуществляется целыми клетками.

Все горизонтальные и вертикальные клетки чистовой группы имеют аналогичную конструкцию и характеризуются следующими данными:

Диаметр рабочих валков, мм . . . . .	260—280
Длина бочки валка, мм . . . . .	400
Давление металла на валки, кн (Т) . . . . .	88,3 (9)
Усилие сжатия подушек, кн (Т) . . . . .	51,0 (5,2)
Диапазон установки валков эксцентриковым механизмом, мм . . . . .	$\pm 2,74$
Мощность главного двигателя, кВт . . . . .	175
Мощность разгонного двигателя, кВт . . . . .	6,8
Скорость прокатки в чистовой клетке, м/сек . . . . .	22,3—32

Для прокатки сортовых профилей в ФРГ разработана конструкция предварительно напряженной клетки, рабочие валки которой установлены на сферических роликовых подшипниках [52, 62]. Принципиальное устройство клетки показано на рис. 60. Клеть состоит из двух массивных подушек 1 и 5, стянутых между собой трубчатыми болтами 2. При сборке клетки болты поворачиваются червячным установочным механизмом 6. Одновременно с болтами поворачиваются резьбовые втулки 3, которые ввинчены в гильзы 4, снабженные внутренней резьбой. Ручной привод установочного механизма позволяет регулировать зазор между валками подъемом или опусканием верхних подушек. Во время настройки клетки внутрь болтов подводится жидкость под давлением до  $100 \text{ Мн/м}^2$  ( $1000 \text{ ат}$ ), упруго растягивающая болты. Предварительное нагружение соединительных деталей производят с помощью гаек 7, а также удалением жидкости из трубчатых болтов.

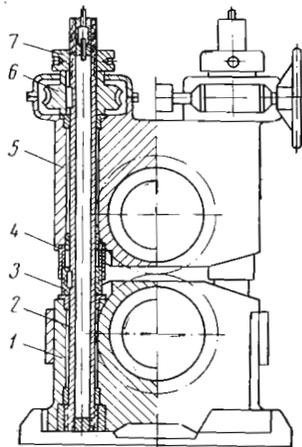


Рис. 60. Предварительно напряженная клеть конструкции Нойманна

Непрерывный среднесортный стан завода Volklingen, предназначенный для прокатки круга, полосы и других профилей, имеет чистовую группу, состоящую из шести предварительно напряженных клеток: четырех горизонтальных (рис. 61) и двух комбинированных. Перевалку валков производят на специальном стенде, где клетки разбирают без снятия предварительного нагружения подушек и демонтажа подшипников. При разборке обе половины клетки разводятся в стороны, валки остаются на центрирующих опорах, откуда их убирают краном. Сборку клетки производят в обратном порядке.

Замена валков без демонтажа подшипников и снятия предварительного нагружения подушек требует меньшего времени, чем на обычных клетях. Установка клетки на стане производится в течение 5—10 мин.

Для получения точных размеров круглых профилей в США и Швеции применяют универсальные чистовые клетки, которые имеют горизонтальные и вертикальные валки, установленные на выходе из клетки. Однако эти клетки имеют только один калибр на валках, что приводит к частым перевалкам и потере рабочего времени.

Разработанная ВНИИМЕТМАШем универсальная клеть для мелкосортного стана 350 лишена такого недостатка, поскольку позволяет нарезать на вертикальных валках 2—3 калибра, а на

горизонтальных валках — 4 калибра. Универсальная чистовая клеть (рис. 62) снабжена приводными горизонтальными и вертикальными валками, калибрующими кромки прокатываемой полосы. Номинальный диаметр горизонтальных валков 350 мм, длина бочки 400 мм [53, 63]. Клеть предназначена для точной прокатки круглой стали и рессорной полосы.

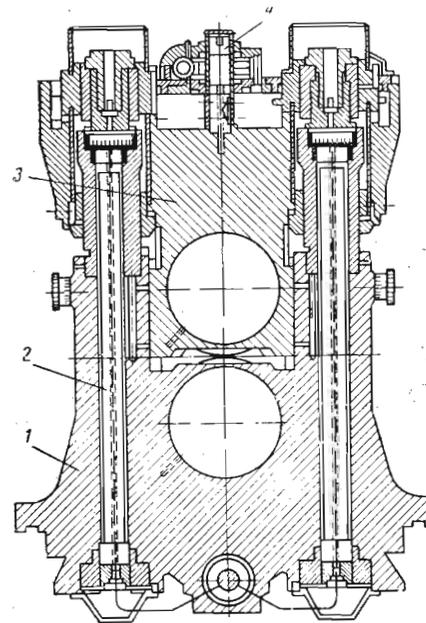


Рис. 61. Предварительно напряженная клеть среднесортного стана 450: 1 — нижняя подушка; 2 — стяжной болт; 3 — верхняя подушка; 4 — установочный механизм.

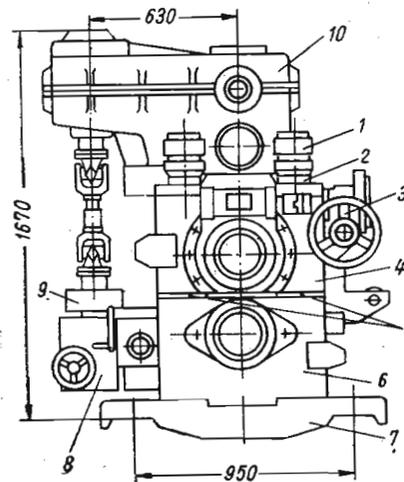


Рис. 62. Универсальная чистовая клеть конструкции ВНИИМЕТМАШ

равлических гаек 1 и болтов 2 с силой, превышающей давление прокатки. Грубую вертикальную установку валков производят прокладками 5, а точную — при помощи червячной передачи 3. В поворотных втулках установлены сферические роликовые подшипники размером  $160 \times 265 \times 84 \text{ мм}$  по одному на каждую шейку валка. Нижний горизонтальный валок имеет возможность перемещаться вдоль оси при настройке клетки. Горизонтальные валки с подушками установлены на массивную стальную плиту 7. Сквозь отверстия плиты и подушек проходят стяжные болты, на верхних концах которых помещены гидравлические гайки. В случае необходимости этот узел можно применять как самостоятельную горизонтальную клеть. На выходной стороне

клетки к нижним подушкам крепится траверса 8 для установки вертикальных валков 9 с механизмом передвижения.

Консольные вертикальные валки выполнены в виде бандажей, насаженных на рабочие валы. Привод валков осуществляется от соседней предчистовой клетки через комбинированный редуктор 10. Опыты показали, что освоить точную прокатку круглой стали на универсальной клетки пока невозможно, так как недостаточная жесткость вертикальных валков вызывает большие колебания горизонтального диаметра круга.

Опытным заводом ВНИИМЕТМАШ изготовлены горизонтальные чистовые и предчистовые предварительно напряженные клетки (табл. 21) для мелкосортных станов 250 и 350 Донецкого металлургического завода. Клетки предназначены для точной прокатки сортовых профилей: круглой и квадратной стали размером от 10 до 33 мм; полосовой и рессорной полосовой стали шириной до 60 мм и шестигранной стали размером от 12 до 30 мм.

Таблица 21

Техническая характеристика предварительно напряженных клеток

Клеть	Размеры валка, мм		Давление на валки, кг (Т)	Регулировка раствора валков, мм		Осевая регулировка валков, мм	Передаточное число установленного механизма	Скорость вращения валков, об/мин	Масса клетки, т
	диаметр	длина бочки		тонкая	грубая				
Универсальная ПНК-350:	300—350	400	313,9 (32)	5	20	±5	1320	252	4,5
вертикальные валки	230—250	90—100	98,1 (10)	±10	—	±5	—	405	2,0
ПНК-350	265—320	700	245,3 (25)	11	40	±5	1100	375	4,0
	330—370	750	294,3 (30)	11	52	±5	1320	252	4,5

Горизонтальные клетки ПНК-300 и ПНК-350 снабжены рабочими валками с длиной бочки 700—750 мм. Применение сравнительно длинных валков вызвано стремлением сократить частоту перевалок, поскольку время на смену валков сравнительно велико. Однако увеличение длины бочки валка резко сокращает преимущества предварительно напряженных клеток перед клетями обычной конструкции.

Анализ работы и исследования напряженных клеток с предварительно сжатыми подушками показали, что клетки конструкции Левфена не обеспечивают непрерывного регулирования зазора между валками в широком диапазоне при прокатке сортовых профилей. Так, эксцентриковые установочные механизмы не

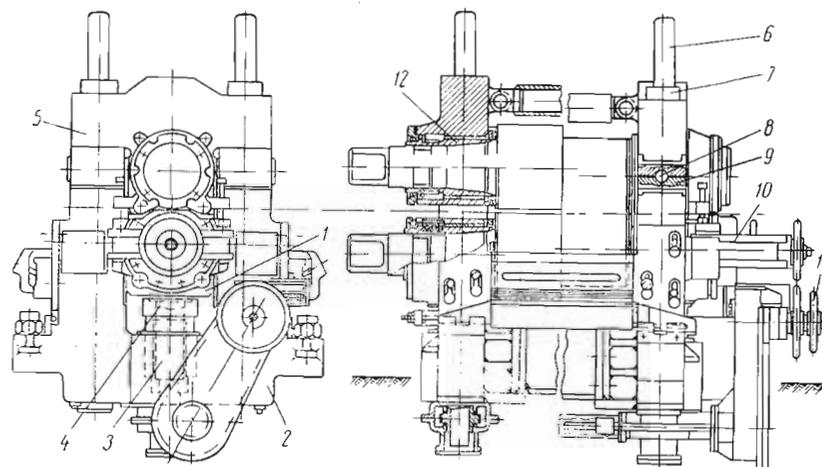


Рис. 63. Предварительно напряженная клеть фирмы Davy United

позволяют вести прокатку полосы на ребро в предчистовых клетях, когда зазор между валками превышает 10 мм. При применении предварительно сжатых подушек для опоры валков требуются только самоустанавливающиеся подшипники (по одному на шейку валка). При высоких скоростях прокатки и значительных давлениях металла на валки срок службы таких подшипников весьма мал. Подшипники, эксцентриковые втулки крупных размеров и другие детали предварительно напряженной клетки требуют тщательной подгонки и больших затрат при механической обработке.

Фирма Davy United, стремясь устранить отмеченные недостатки, разработала новую конструкцию предварительно напряженной клетки [64]. На рис. 63 показана предварительно напряженная клеть с рабочими валками диаметром 356 мм, предназначенная для прокатки катанки и сортовых профилей.

Новая конструкция представляет собой нечто среднее между обычной клетью и клетью конструкции Левфена. Клеть имеет U-образную раму 2, в которой помещена подушка 1 нижнего валка. Верхняя подушка 5, являясь крышкой клетки, прижата к раме при помощи стяжных болтов 6 и гаек 7 с силой, превышающей максимально допустимое усилие прокатки. Вертикальное перемещение нижнего валка производят винтовым установочным механизмом 3, осевое перемещение — регулирующим устройством 4.

вом 11, стойка 10 которого прикреплена к раме со стороны, противоположной приводу.

Самоустановление нижней подушки при прогибе валка возможно за счет поворота опорного фланца 4, который опирается на нажимной винт. Для предохранения винта и опорного фланца от коррозии, а также попадания на соприкасающиеся поверхности окалина они закрыты двумя чехлами. Внутренний упругий чехол покрыт наружным стальным чехлом, который не снимают с винта и во время перевалки валков. В качестве опор рабочих валков используют многорядные подшипники качения или подшипники жидкостного трения 12.

Отличительной особенностью клетки является устройство, обеспечивающее самоустановление предварительно напряженных верхних подушек при прогибе валка. Устройство состоит из роликов 8 и массивных прокладок 9, устанавливаемых между стойками рамы и верхней подушкой. Соприкасающиеся поверхности роликов и прокладок покрыты тонким слоем специальной бронзы, термически обработанной и отшлифованной. После сборки устройства и установки верхней подушки весь узел подвергают нагружению, величина которого превышает усилие прокатки. Перед нагружением клетки узел самоустановления подушек смазывают и герметизируют резиновым уплотнением.

Во время прокатки самоустановление верхней подушки происходит в результате ее поворота относительно оси ролика 8 и изгиба стяжного болта 7. опыты показали, что угол поворота подушки при ее самоустановлении не превышает  $6'$ . При перевалке валков узел самоустановления подушек не разбирают и не снимают со стойки U-образной рамы.

В Советском Союзе разработан проект опытно-промышленного заготовочного стана, совмещенного с установкой непрерывной разливки стали. Агрегат предназначен для получения катаной заготовки  $60 \times 60$  мм. В качестве рабочих клеток на стане используют предварительно напряженные клетки с горизонтальным и вертикальным расположением валков [65]. Отличительной чертой новых клеток являются встроенные зубчатые передачи, заменяющие громоздкие шестеренные клетки.

На рис. 64 показано устройство вертикальной предварительно напряженной клетки, состоящей из станин 7, валков 8 и 1, зубчатой передачи 9 и нажимного устройства 5 с указателем раствора валков. Станины клетки предварительно сжаты четырьмя стяжными болтами 6 с помощью гидравлических гаек 4. Валки установлены на сферических роликовых подшипниках 2, воспринимающих радиальную нагрузку. Осевую нагрузку воспринимают роликовые конические подшипники 10. Ручьи валков наплавлены износостойким материалом. Регулировку валков осуществляют поворотом эксцентриковых втулок 3 на величину износа наплавленного слоя. Зубчатые колеса, расположенные на концах валков, допускают изменение межцентрового расстояния в пределах

регулировки валков. К достоинствам новой клетки следует отнести: малый вес, компактность и высокую жесткость конструкции.

### Деформация напряженной клетки с предварительно сжатыми подушками

Пусть две подушки предварительно напряженной клетки (рис. 65) сжаты силой  $P_n$ , превышающей максимальное давление прокатки (давление на шейку валка).

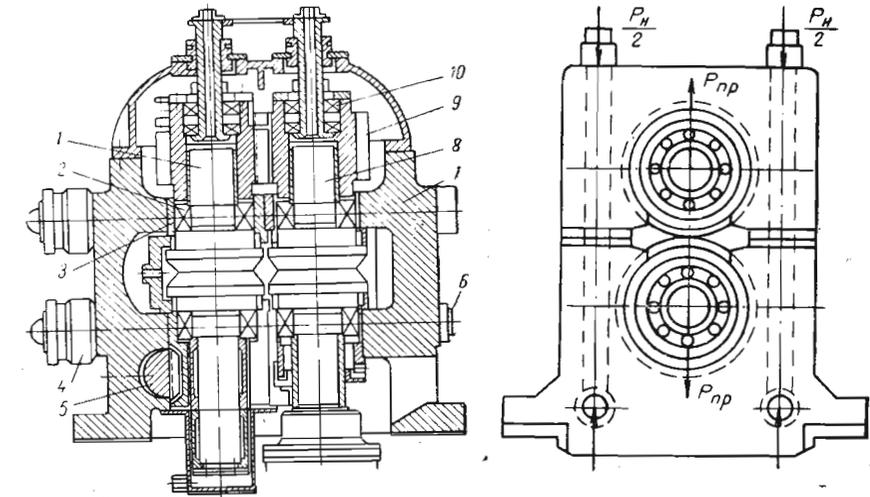


Рис. 64. Вертикальная предварительно напряженная клетка заготовочного стана 550

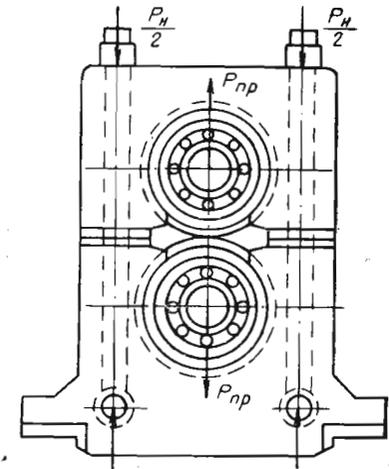


Рис. 65. Схема действия сил при прокатке в напряженной клетке с предварительно сжатыми подушками

Упругая деформация подушек от действия силы предварительного сжатия будет

$$\Delta h_n = \frac{P_n H_n}{F_n E_n} = \frac{P_n}{c_n}, \quad (116)$$

откуда

$$P_n = \Delta h_n c_n, \quad (117)$$

где  $c_n = \frac{F_n E_n}{H_n}$  — коэффициент жесткости подушек.

Упругая деформация стяжных болтов от действия силы предварительного сжатия будет

$$\Delta l_n = \frac{P_n l_6}{F_6 E_6} = \frac{P_n}{c_6}, \quad (118)$$

откуда

$$P_n = \Delta l_n c_b, \quad (119)$$

где  $c_b = \frac{F_b E_b}{l_b}$  — коэффициент жесткости стяжных болтов.

Приравнявая уравнение (117) и (119), получаем

$$\frac{\Delta h_n}{\Delta l_n} = \frac{c_b}{c_n}. \quad (120)$$

Во время прокатки клеть нагружена силой предварительного сжатия подушек  $P_n$  и давлением прокатки  $P_{пр}$ , разгружающим подушки. При этом упругая деформация подушек станет меньше на величину  $\Delta h'$ , а стяжных болтов — больше на величину  $\Delta l'$ .

Очевидно, что  $\Delta l' = \Delta h'$ .

Усилия, растягивающие стяжные болты, определяют уравнением

$$P_b = (\Delta l_n + \Delta l') c_b = P_n + \Delta P, \quad (121)$$

где

$$\Delta P = \Delta l' c_b. \quad (122)$$

В этом случае подушки будут сжаты силой

$$P_n = P_b - P_{пр} = P_n + \Delta P - P_{пр}, \quad (123)$$

а их упругая деформация составит

$$\Delta h_n - \Delta h' = \frac{P_n + \Delta P - P_{пр}}{c_n}. \quad (124)$$

Определим из этого уравнения изменение упругой деформации подушек:

$$\Delta h' = \frac{P_{пр} - \Delta P}{c_n} = \frac{P_{пр}}{c_n} - \frac{\Delta P}{c_n}. \quad (125)$$

Подставляя значение  $\Delta P$  из уравнения (122) и учитывая, что  $\Delta l' = \Delta h'$ , получим

$$\Delta h' = \frac{P_{пр}}{c_n} - \Delta h' \frac{c_b}{c_n},$$

откуда

$$\Delta h' = \frac{P_{пр}}{c_n + c_b}. \quad (126)$$

Из уравнения (126) следует, что изменение упругой деформации предварительно напряженных подушек прямо пропорционально давлению прокатки и обратно пропорционально сумме

жесткостей подушек и стяжных болтов. Таким образом, предварительно напряженная клеть работает так же, как обычная клеть с цельной станиной (без нажимных винтов и предохранительных стаканов) с площадью сечения стоек станин, равной сумме площадей сечений подушек и стяжных болтов [66, 67].

Следовательно, общая упругая деформация предварительно напряженной клетки со сжатыми подушками при прокатке будет

$$f_{н.к} = f_b + f_n + f_{вт} + \Delta h', \quad (128)$$

где  $f_b$  — стрела прогиба двух валков;

$f_n$  — упругая деформация подшипников;

$f_{вт}$  — упругая деформация эксцентриковых втулок установочного механизма;

$\Delta h'$  — упругая деформация подушек.

Найдем усилие, воспринимаемое стяжными болтами при прокатке. Для этого подставим в уравнение (121) значение  $\Delta l' = \Delta h'$  из уравнения (126):

$$P_b = P_n + \Delta h' c_b = P_n + P_{пр} \frac{c_b}{c_n + c_b}. \quad (128)$$

Если подушки и стяжные болты изготовлены из одного и того же материала, т. е.  $E_n = E_b$ , а высота подушек равна длине стяжных болтов, то

$$P_b = P_n + P_{пр} \frac{F_b}{F_n + F_b}. \quad (129)$$

На рис. 66,а показан график изменения нагрузки  $P_b$  на стяжные болты в зависимости от отношения  $\frac{c_n}{c_b}$ .

Из графика следует, что по мере увеличения отношения  $\frac{c_n}{c_b}$

сила  $P_b$  уменьшается, приближаясь к величине предварительного нагружения  $P_n$ . Поэтому при проектировании предварительно напряженной клетки стяжные болты целесообразно выполнять с минимальным поперечным сечением в пределах допускаемых напряжений. Подушки таких клетей, наоборот, должны быть максимально жесткими и иметь поперечные сечения, в несколько раз превышающие поперечные сечения стяжных болтов.

Подставляя в уравнение (123) значение  $P_b$  из уравнения (128), определим усилие, сжимающее подушки при прокатке:

$$P_n = P_b - P_{пр} = P_n + P_{пр} \frac{c_b}{c_n + c_b} - P_{пр} = P_n - P_{пр} \left( 1 - \frac{c_b}{c_n + c_b} \right). \quad (130)$$

или

$$P_n = P_n - P_{пр} (1 - k), \quad (131)$$

где

$$k = \frac{c_6}{c_n + c_6}.$$

На рис. 66,б дан график изменения усилия сжатия подушек  $P_n$  при заданной величине предварительной нагрузки клетки и различных значениях коэффициента  $k$ . На графике видно, что по мере увеличения усилия  $P_{пр}$  сила  $P_n$ , сжимающая подушки, уменьшается тем быстрее, чем меньше коэффициент  $k$ . Если

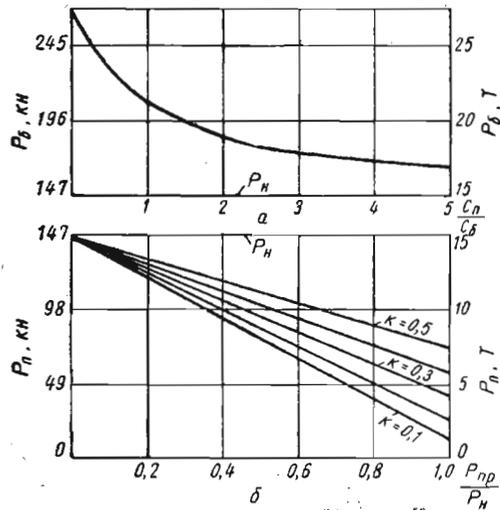


Рис. 66. Изменение сил, действующих на стяжные болты (а) и подушки (б), в зависимости от соотношения  $\frac{c_n}{c_6}$  и  $\frac{P_{пр}}{P_n}$

сила  $P_{пр}$  будет равна по величине предварительной нагрузке клетки  $P_n$ , подушки также находятся в сжатом состоянии.

На основании положений теории расчета предварительно напряженных соединений зависимость между силами и деформациями в напряженной клетке с предварительно сжатыми подушками может быть представлена в общем виде графиком, показанным на рис. 67. Если предварительное нагружение клетки равно отрезку  $BF$ , а рабочая нагрузка —  $AD$ , то усилие, воспринимаемое стяжными болтами, возрастает по прямой 2, а усилие, сжимающее подушки, падает по прямой 4. При этом деформа-

ция всех деталей клетки при росте рабочей нагрузки определяется прямой 1, а упругая разгрузка подушек — прямой 3. В точке пересечения этих прямых наступает равновесие. Предварительное растяжение болтов соответствует отрезку  $\Delta l_n$ , а предварительное сжатие подушек — отрезку  $\Delta h_n$ . При рабочей нагрузке упругое сжатие подушек уменьшается на  $\Delta h'$ , а деформация болтов увеличивается на  $\Delta l'$ . Когда усилие прокатки достигнет величины, равной отрезку  $CH$ , предварительная деформация сжатия подушек будет полностью снята. Углы  $\alpha$  и  $\beta$ , определяющие

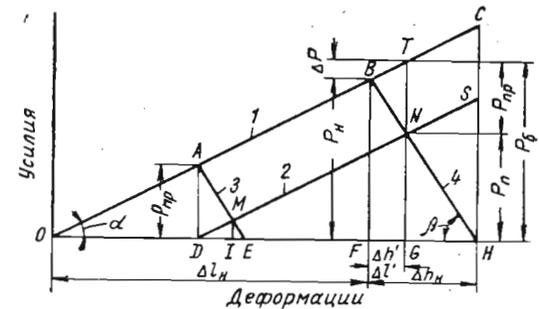


Рис. 67. График изменения упругой деформации деталей предварительно напряженной клетки в зависимости от усилий  $P_n$  и  $P_{пр}$

наклон прямых, зависят от поперечного сечения и длины стяжных болтов и подушек. Эти углы определяют из следующих уравнений:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{E_6 F_6}{l_6} \quad (132)$$

и

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{E_n F_n}{H_n}, \quad (133)$$

где  $l_6$  и  $H_n$  — соответственно длина стяжного болта и высота подушек;

$F_6$  и  $E_6$  — поперечное сечение и модуль упругости стяжного болта;

$F_n$  и  $E_n$  — поперечное сечение и модуль упругости подушек.

Анализ напряженно-деформированного состояния предварительно сжатых подушек был проведен в предположении, что блок подушек под действием внешних нагрузок испытывает лишь деформации растяжения и сжатия. Однако, рассматривая этот блок как рамную конструкцию, можно предположить в некоторых деталях подушек существование изгибающих моментов, которые вызовут дополнительные деформации. В работе [68] рекомендуется вычислять деформацию предварительно сжатых подушек в вертикальном направлении по уравнению

$$f_A = f_{PA} - f_{XA} + \Delta h', \quad (134)$$

где  $f_{PA}$  — деформация изгиба поперечин рамы при нагружении вертикальными силами;  
 $f'_{XA}$  — деформация изгиба поперечин рамы при нагружении горизонтальными силами.

Величины  $f_{PA}$  и  $f'_{XA}$  определяют по формулам

$$f_{PA} = k_4 \frac{4P}{E}; \quad (135)$$

$$f'_{XA} = k_5 \frac{4X}{E}, \quad (136)$$

где  $P$  — давление металла на валки;  
 $X$  — сила, направленная вдоль оси средней поперечины рамы;  
 $k_4$  и  $k_5$  — коэффициенты, зависящие от формы и размеров рамы.

Расчеты показывают, что величина изменения деформации предварительно сжатых подушек в вертикальном направлении под действием изгиба поперечин незначительна и ею можно пренебречь.

Пример. Произвести расчет упругой деформации напряженной клетки с предварительно сжатыми подушками мелкосортного стана 280 при давлении металла на валки  $P=314$  кН (32 Т).

Прогиб прокатного вала определяем по уравнениям (85) и (86). Для расчета принимаем:  $D=300$  мм;  $d=150$  мм;  $a=700$  мм;  $b=40$  мм;  $c=85$  мм,

$$f_1 = \frac{P}{18,8 ED^4} \left\{ 8a^3 - 4ab^2 + b^3 + 64c \left[ \left( \frac{D}{d} \right)^4 - 1 \right] \right\} =$$

$$= \frac{32000}{18,8 \cdot 1,2 \cdot 10^6 \cdot 30^4} \left\{ 8 \cdot 70^3 - 4^3 \cdot 70 + 4^3 + 64 \cdot 8,5^3 \left[ \left( \frac{30}{15} \right)^4 - 1 \right] \right\} =$$

$$= 0,00575 \text{ см};$$

$$f_2 = \frac{P}{G \pi D^2} \left\{ a - \frac{b}{2} + 2c \left[ \left( \frac{D}{d} \right)^2 - 1 \right] \right\} =$$

$$= \frac{32000}{0,4 \cdot 10^6 \cdot 3,14 \cdot 30^2} \left\{ 70 - \frac{4}{2} + 2 \cdot 8,5 \left[ \left( \frac{30}{15} \right)^2 - 1 \right] \right\} = 0,0033 \text{ см}.$$

Прогиб двух валков составит

$$f_B = 2(f_1 + f_2) = 2(0,00575 + 0,0033) = 0,018 \text{ см}.$$

Величину сближения центров внутреннего и наружного колец роликоферрического подшипника в направлении внешней нагрузки определим по формуле (87). При установке на каждой шейке вала по одному самоустанавливающемуся двухрядному подшипнику  $150 \times 270 \times 73$  мм найдем

$$\delta = \frac{300}{10^7} \sqrt[3]{\left( \frac{5R}{nz} \right)^2 \frac{1}{d_p}} = \frac{300}{10^7} \sqrt[3]{\left( \frac{5 \cdot 16000}{2 \cdot 19} \right)^2 \cdot \frac{1}{4}} = 0,003 \text{ см}.$$

Упругая деформация двух подшипников (верхнего и нижнего) будет

$$f_n = 2\delta = 2 \cdot 0,003 = 0,006 \text{ см}.$$

Деформацию сжатия эксцентриковой втулки механизма установки валков найдем по формуле

$$f = \frac{Ph}{2EF},$$

где  $h$  — толщина стенки втулки;  
 $F$  — проекция площади соприкосновения втулки и наружного кольца подшипника;  
 $E$  — модуль упругости материала втулки;

$$f = \frac{32000 \cdot 2,5}{2 \cdot 2,2 \cdot 10^6 \cdot 27 \cdot 7,3} = 0,0001 \text{ см}.$$

Упругая деформация двух эксцентриковых втулок будет

$$f_{вт} = 2f = 2 \cdot 0,0001 = 0,0002 \text{ см}.$$

Изменение упругой деформации предварительно сжатых подушек определим по уравнению (126). Для расчета принимаем

$$H_n = l_6 = 850 \text{ мм}; \quad E_n = E_6 = 2220 \text{ Гн/м}^2 (2,2 \cdot 10^6 \text{ кг/см}^2);$$

$$F_n = 2(16 \times 18) = 576 \text{ см}^2; \quad F_6 = \frac{1}{5} F_n = 115 \text{ см}^2.$$

Коэффициент жесткости подушек

$$c_n = \frac{F_n E_n}{H_n} = \frac{576 \cdot 2,2 \cdot 10^6}{85} = 1,49 \text{ Гн/м} (14,9 \cdot 10^6 \text{ кг/см}).$$

Коэффициент жесткости болтов

$$c_6 = \frac{F_6 E_6}{l_6} = \frac{115 \cdot 2,2 \cdot 10^6}{85} = 3 \text{ Гн/м} (3 \cdot 10^6 \text{ кг/см}).$$

Изменение упругой деформации подушек

$$\Delta h' = \frac{P_{np}}{c_n + c_6} = \frac{16000}{10^6 (14,9 + 3)} = 0,001 \text{ см}.$$

Общая упругая деформация клетки, равная сумме упругих деформаций всех ее деталей, будет

$$f_{н.к} = f_B + f_n + f_{вт} + \Delta h' = 0,018 + 0,006 + 0,0002 + 0,001 = 0,0252 \text{ см}.$$

Приведенные расчетные данные показывают, что основную долю упругой деформации напряженной клетки с предварительно сжатыми подушками составляет прогиб рабочих валков.

## КЛЕТИ С ПРЕДВАРИТЕЛЬНО СЖАТЫМИ ВАЛКАМИ

Точные размеры прокатываемого профиля можно получить в предварительно напряженных клетях, рабочие валки которых соприкасаются друг с другом не только в процессе прокатки, но и до поступления металла в очаг деформации. Колебания упругой деформации такой напряженной клетки соизмеримы с величиной радиального сжатия соприкасающихся валков и в несколько раз меньше допускаемых отклонений размеров проката.

На рис. 68 показана напряженная клеть, рабочие валки которой подвержены предварительному нагружению перед прокаткой [55]. Бесстанинная клеть состоит из нижних 2 и верхних 3 подушек, соединенных попарно между собой стяжными болтами с гидравлическими гайками 5. Рабочие валки 1 установлены на подшипниках качения, обеспечивающих их самоустановление относительно неподвижных подушек. Осевая регулировка нижнего валка производится устройством 6, расположенным со стороны, противоположной приводу клетки. Вертикальное перемещение верхнего валка осуществляется эксцентриковым установочным механизмом 4. Перед прокаткой при помощи

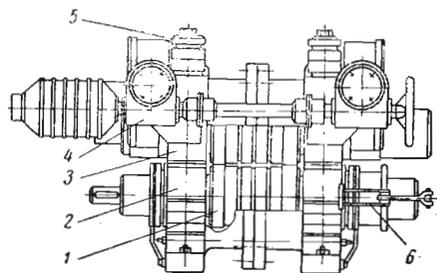


Рис. 68. Напряженная клеть с предварительно сжатыми валками и эксцентриковым установочным механизмом

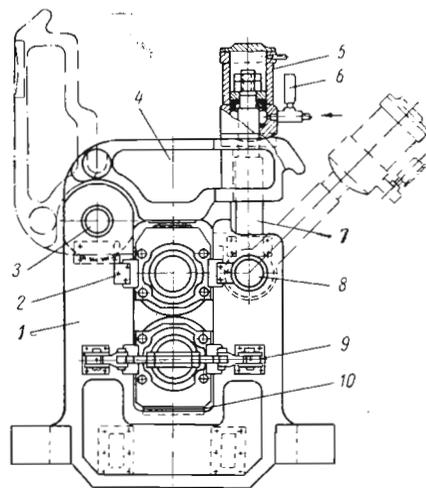


Рис. 69. Напряженная клеть с предварительно сжатыми валками и гидравлическим установочным механизмом

этого же механизма соприкасающиеся бурты, находящиеся по краям бочки, сжимаются с усилием большим или равным давлению металла на валки. В результате нагружения соприкасающиеся бурты сплющиваются, а валки прогибаются. Во время прокатки сплющивание буртов уменьшается, а прогиб валков несколько увеличивается. Суммарная величина изменения радиального сжатия буртов и прогиба валков представляет собой деформацию предварительно напряженной клетки.

Расчеты показывают, что дополнительный прогиб предварительно нагруженных валков в несколько раз меньше прогиба валков, не подвергавшихся перед прокаткой предварительному нагружению. Так, например, если принять диаметр шейки валка  $d=0,6 D$ , расстояние от оси подшипника до оси бурта  $c=0,5 D$  и расстояние между буртами  $l=nD$ , то дополнительный прогиб предварительно нагруженного валка будет

$$f = \frac{n^3}{(1+n)^3 + 6,7} f_1 + \frac{n}{n + 2,78} f_2, \quad (137)$$

где  $f_1$  — прогиб предварительно нагруженного валка от действия изгибающего момента;

$f_2$  — прогиб того же валка от действия поперечных сил;

$n$  — коэффициент, характеризующий соотношение длины бочки и диаметра валка.

При  $n=2$

$$f = \frac{1}{3} (f_1 + f_2).$$

Для предварительного сжатия валков целесообразно применять гидравлические установочные механизмы, обеспечивающие постоянство нагрузок на детали клетки до начала и в процессе прокатки. На рис. 69 показана конструкция предварительно напряженной клетки с подвижными поперечинами станин и гидравлическим установочным механизмом. Клеть имеет станины 1 открытого типа, верхние поперечины 4 которых соединены шарнирами 3 с левыми стойками. Крепление поперечин к правым стойкам осуществляется посредством откидных болтов 7 гидравлического установочного механизма и осей 8. В качестве опор рабочих валков используют подшипники жидкостного трения, вмонтированные в верхние и нижние подушки. Левая верхняя подушка закреплена в станине планками 2, фиксируя валок в осевом направлении. Осевое регулирование нижнего валка производят рычажным приспособлением 9, расположенным с левой неприводной стороны клетки.

Подушки с правой стороны не фиксируют. При этом возможна компенсация температурных удлинений рабочих валков. Соосность нижнего валка и приводного шпинделя достигается установкой в гнезда нижних поперечин станин сменных прокладок 10. Гидравлический установочный механизм 5 снабжен указателем 6 для контроля давления масла в рабочем цилиндре.

Расположение откидных болтов и гидроцилиндров по оси стоек станин позволяет в два раза уменьшить приходящиеся на них нагрузки по сравнению с нагрузками, действующими на шейки валков, повысить срок службы деталей, уменьшить габариты станин и сократить время разборки и сборки клетки.

Применение гидравлического установочного механизма позволяет производить перевалку валков как в сторону, так и вверх. При перевалке валков вверх удаляют масло из гидроцилиндров, разгружают рабочие валки и отводят в стороны откидные болты. После этого верхние поперечины 4 поворачивают вокруг осей 3 и удаляют валки. Перевалку валков можно производить при установке клетки на стенде или на стане.

Во время работы клетки сила предварительного сжатия валков  $P_{сж}$  больше давления металла на валки и равна

$$P_{сж} = qP, \quad (138)$$

где  $q$  — коэффициент предварительного сжатия валков.

Усилие, воспринимаемое стяжными болтами, будет

$$P_1 = \frac{P_{сж}}{4} = \frac{\pi (d_1^2 - d_2^2)}{4} p, \quad (139)$$

где  $q$  — удельное давление масла;

$d_1$  — внутренний диаметр рабочего цилиндра;

$d_2$  — диаметр штока.

Применение подвижных поперечин станин в комбинации с гидравлическим установочным механизмом исключает перегрузку деталей и не требует установки специальных предохранительных устройств. К достоинствам клетки следует отнести небольшие габариты и простоту конструкции установочного механизма, минимальные затраты времени при перевалке валков, а также возможность полной автоматизации процесса прокатки.

В предварительно напряженных клетях применяют валки с буртами, расположенными по середине или по краям бочки, что позволяет использовать клетки подобного типа на сортовых и листовых станах.

Экспериментальное определение деформации напряженной клетки с предварительно сжатыми валками провели на лабораторном стане 180. Для опытов использовали клетку с горизонтально расположенными валками, которая была снабжена отдельным приводом мощностью 0,66 Гдж (60 квт); универсальным шпиндельным соединением, винтовым установочным механизмом и устройством для осевой регулировки валков. По краям бочки каждого рабочего валка были выполнены опорные бурты диаметром 177 и шириной 15 мм, между которыми был сделан ручей ящичного калибра. Предварительное сжатие валков с усилием, большим давления прокатки, осуществляли винтовым установочным механизмом.

Величину усилия, действующего на клетку до начала и во время прокатки, определяли с помощью двух месдоз, установленных между верхними подушками и нажимными винтами. Суммарная нагрузка, воспринимаемая месдозами, фиксировалась осциллографом МПО-2. Одновременно производили запись крутящего момента, приложенного к нижнему шпинделю, на котором был смонтирован крутильный динамометр. Прокатку в предварительно напряженной клетке осуществляли с одним приводным нижним валком.

На стане прокатывали свинцовые и стальные клиновидные образцы размером 25/30×35×250 мм, 22/25×32×300 мм и 24/30×35×300 мм. Температура нагрева стальных образцов составляла 1140—1160°C.

Результаты, полученные при прокатке в предварительно напряженной клетке, приведены в табл. 22.

Для сопоставления жесткости предварительно напряженной и ненапряженной клетей на стане были прокатаны одинаковые образцы тех же размеров при идентичных условиях в валках без

предварительного сжатия. При этом оба валка были приводные. Данные прокатки в ненапряженной клетке приведены в табл. 23.

Таблица 22

Результаты замеров при прокатке в предварительно напряженной клетке

$P_{сж}$		Высота калибра $K$ , мм	Конечная высота полосы, $h$ , мм	Обжатие $\Delta h$ , мм	$P_d$		$\Delta P = P_d - P_{сж}$		Деформация $f$ , в. в. мм
кн	т				кн	т	кн	т	
<i>Свинцовые образцы 25/30×35×250 мм</i>									
122,2	12,5	21,5	21,5	8,5	122,5	12,5	0	0	0
117,6	12,0	21,5	21,5	8,5	117,6	12,0	0	0	0
116,6	11,9	21,5	21,5	8,5	116,6	11,9	0	0	0
<i>Стальные образцы 24/30×35×300 мм</i>									
134,3	13,7	21,45	21,55	8,45	151,9	15,5	17,6	1,8	0,10
125,4	12,8	21,45	21,50	8,50	149,9	15,3	24,5	2,5	0,05
122,5	12,5	21,45	21,50	8,50	145,0	14,8	22,5	2,3	0,05
124,5	12,7	21,45	21,50	8,50	147,0	15,0	22,5	2,3	0,05
123,5	12,6	21,45	21,48	8,52	147,0	15,0	23,5	2,4	0,03
125,4	12,8	21,45	21,52	8,48	149,9	15,3	24,5	2,5	0,07
123,5	12,8	21,45	21,50	8,50	146,4	14,9	22,5	2,3	0,05
124,5	12,7	21,45	21,51	8,49	147,0	15,0	22,5	2,3	0,06
<i>Стальные образцы 22/25×32×300 мм</i>									
140,1	14,3	20,85	20,88	4,12	150,9	15,4	10,8	1,1	0,03
140,1	14,3	20,85	20,88	4,12	147,0	15,0	6,9	0,7	0,03
138,2	14,1	20,85	20,87	4,13	150,9	15,4	12,7	1,3	0,02
138,2	14,1	20,85	20,88	4,12	154,8	15,8	16,7	1,7	0,03
133,3	13,6	20,85	20,86	4,14	145,0	14,8	11,8	1,2	0,01
133,3	13,6	20,85	20,89	4,11	150,9	15,4	17,6	1,8	0,04
133,3	13,6	20,85	20,87	4,13	147,0	15,0	13,7	1,4	0,02
130,3	13,3	20,85	20,87	4,13	147,0	15,0	16,7	1,7	0,02

Таблица 23

Результаты замеров при прокатке в ненапряженной клетке

Высота калибра $K$ , мм	Конечная высота полосы $h$ , мм	Обжатие $\Delta h$ , мм	Давление		Деформация $f = h - K$ , мм
			кн	т	
<i>Свинцовые образцы 25/30×35×250 мм</i>					
21,55	21,75	8,25	21,6	2,2	0,20
21,55	21,77	8,23	23,5	2,4	0,22
21,55	21,75	8,25	23,5	2,4	0,20
<i>Стальные образцы 24/30×35×300 мм</i>					
21,6	22,0	8,0	73,5	7,5	0,40
21,6	21,95	8,05	76,4	7,8	0,35
21,6	22,0	8,0	81,3	8,3	0,40
21,6	22,05	7,95	83,3	8,5	0,45

Высота калибра $K$ , мм	Конечная высота полосы $h$ , мм	Обжатие $\Delta h$ , мм	Давление		Деформация $t=h-K$ , мм
			кн	т	
Стальные образцы 22/25×32×300 мм					
21,2	21,45	3,55	50,9	5,2	0,25
21,2	21,47	3,53	52,9	5,4	0,27
21,2	21,45	3,55	55,9	5,7	0,25
21,2	21,44	3,56	51,9	5,3	0,24

Высоту калибра определяли индикаторным нутромером с точностью 0,01 мм. Люфты и зазоры в ненапряженной клетке учитывали при прокатке свинцовых полос с незначительным обжатием. Коэффициент предварительного сжатия валков  $q$ , характеризующий степень нагружения клетки, составлял при прокатке свинцовых образцов 5,2; при прокатке стальных образцов 2,6 и 1,6.

Угол захвата при прокатке в предварительно напряженной клетке с одним приводным валком был равен 7—11° для переднего конца полосы и 12—17° для заднего конца. Во время про-

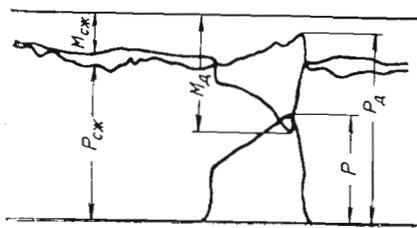


Рис. 70. Осциллограмма прокатки стальных образцов 24/30×35×300 мм в предварительно напряженной клетке:

$P_{сж}$  — усилие предварительного сжатия валков;  $M_{сж}$  — момент холостого хода;  $P_{д}$  — усилие, действующее на валки при прокатке;  $M_{д}$  — момент прокатки;  $P$  — давление металла на валки при прокатке в ненапряженной клетке

катки пробуксовки валков или остановки холостого валка не наблюдались, не было также и ударов в линии стана при захвате металла валками. Опыты показали, что способ прокатки с одним приводным валком в предварительно напряженной клетке может быть применен для чистовых и предчистовых клетей сортовых станков.

Характер изменения усилий и крутящих моментов при прокатке стальных образцов 24/30×35×300 мм в напряженной клетке с предварительно сжатыми валками показан на рис. 70. На совмещенной осциллограмме представлена также кривая давления металла на валки  $P$  при прокатке таких же стальных образцов в ненапряженной клетке.

Опытные данные подтверждают правильность теоретических выводов о том, что величина приращения усилия  $\Delta P$ , действующего при прокатке на нажимные винты предварительно напряженной клетки, составляет только часть общего давления металла на валки ненапряженной клетки.

Величина  $\Delta P$ , определяемая по осциллограмме как разность  $P_{д}$  и  $P_{сж}$ , в условиях опытов колебалась в пределах 0,2—0,3 Т при прокатке стали и была близка к нулю при прокатке свинца, что объясняется высоким коэффициентом предварительного сжатия валков. Упругую деформацию предварительно напряженной клетки определяли по уравнению

$$f_{н,в} = h - K, \quad (140)$$

где  $h$  — конечная высота полосы;

$K$  — установочная высота калибра предварительно сжатых валков.

Аналогично определяли упругую деформацию ненапряженной клетки. Деформация предварительно напряженной клетки пропорциональна усилию  $\Delta P$ , и ее величина значительно меньше деформации ненапряженной клетки. Таким образом, прокатка в предварительно сжатых валках происходит при значительном увеличении жесткости клетки

Прокатка в чистовой клетке с предварительно сжатыми валками, рабочие бурты которых расположены по краям бочки, впервые была осуществлена инж. Филиповым С. Н. на промышленном стане 550 металлургического завода им. Петровского. Прокатанные сутуночные полосы имели вдвое меньшие отклонения размеров по толщине по сравнению с полосами, полученными в обычной клетке.

#### Деформация напряженной клетки с предварительно сжатыми балками

Влияние прогиба валков на размеры проката может быть устранено только в напряженных клетях с предварительно сжатыми валками. Рассмотрим клеть с предварительно сжатыми валками, опорные бурты которых расположены на середине бочки.

Пусть валки сжаты силой  $P_{сж}$ , превышающей максимальное давление прокатки  $P$ . В результате предварительной нагрузки они прогибаются, а контактные поверхности буртов, расположенных на середине бочки, упруго сплющиваются.

Величину сплющивания средних буртов (рис. 71) определим по формуле Герца, согласно которой половина ширины проекции площади упругой деформации двух прижатых один к другому цилиндров равного диаметра будет равна

$$\frac{b}{2} = \sqrt{\frac{2P_{сж}}{l_0} (k_1 + k_2) R_0}, \quad (141)$$

где  $l_0$  — длина среднего бурта;

$k_1$  и  $k_2$  — коэффициенты, зависящие от материала валков;

$$k_1 = \frac{1 - \nu_1^2}{\pi E_1} \text{ и } k_2 = \frac{1 - \nu_2^2}{\pi E_2},$$

здесь  $\mu_1$  и  $\mu_2$  — коэффициенты Пуассона для материала валков;

$E_1$  и  $E_2$  — модули упругости валков.

Для случая, когда оба валка изготовлены из одного материала, т. е.  $k_1 = k_2 = k$ , формула примет следующий вид:

$$\frac{b}{2} = 2 \sqrt{\frac{P_{сж}}{l_0} k R_0}. \quad (142)$$

Радиальное сжатие валка  $\Delta R_0$  находим из подобия треугольников  $BDC$  и  $BCE$ :

$$\frac{BD}{BC} = \frac{BC}{BE},$$

откуда

$$\Delta R_0 = \frac{(BC)^2}{BE}.$$

Принимая  $BC \approx 0,5 b$  и подставляя значение  $BE$  и  $BC$ , получаем приближенно

$$\Delta R_0 = \frac{2kP_{сж}}{l_0}. \quad (143)$$

Сближение двух цилиндров равного диаметра под действием нормальной нагрузки обычно определяют по уравнению

$$\delta = 1,3 \sqrt[3]{\frac{P_{сж}}{El_0} \lg \frac{16,75 El_0 R_0}{P_{сж}}}. \quad (144)$$

Из формулы следует, что величина радиуса валка, входящая под знак логарифма, при увеличении в 2—3 раза не оказывает существенного влияния на сближение цилиндров. Учитывая сложность логарифмической функции в уравнении (144), дальнейший анализ усилий и деформаций в клети с предварительно сжатыми валками выполним, если пользоваться уравнением (143). Введем в это уравнение поправочный коэффициент  $n_0 = \frac{\delta}{2 \Delta R_0}$ , учитывающий влияние радиуса на величину контактной упругой деформации. Тогда радиальное сжатие валков будет

$$\Delta R_0 = \frac{2k n_0 P_{сж}}{l_0}. \quad (145)$$

Многочисленные испытания показали, что поверхностный слой металла, подверженный действию переменной по величине

многократной нагрузки, в состоянии выдержать лишь определенное количество циклов изменения контактных напряжений [69]. Поэтому длина буртов должна быть рассчитана с учетом усилия

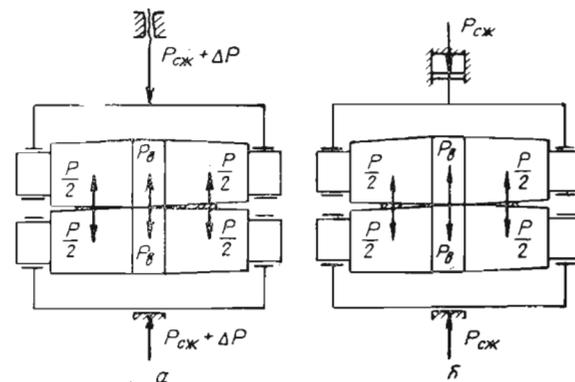


Рис. 72. Схема сил, действующих на клеть:  
а — при винтовом установочном механизме; б — при гидравлическом установочном механизме

предварительного сжатия и допускаемых контактных напряжений для материала валков.

Предварительное нагружение рабочих валков может быть осуществлено установочными механизмами упруго-жесткого типа (винтовыми, клиновыми, эксцентриковыми) и гидрогрузового типа (гидравлическими, пневматическими, грузовыми). Рассмотрим случай нагружения валков винтовым установочным механизмом.

При сжатии валков детали клети (нажимные винты, гайки, стаканы, подушки, подшипники, станины) находятся также в нагруженном состоянии. Это предварительное нагружение устраняет все зазоры между сопряженными деталями. В процессе прокатки клети нагружена силой предварительного сжатия валков и давлением прокатываемого металла (рис. 72,а). При этом радиальное сжатие валков уменьшается, а упругая деформация клети увеличивается на одну и ту же величину.

Изменение упругой деформации клети происходит за счет увеличения упругих деформаций деталей и незначительного увеличения стрелы прогиба валков. Очевидно, что изменение упругих деформаций деталей, имеющих большую жесткость, будет меньше изменения упругой деформации деталей, имеющих меньшую жесткость. Если предположить, что все детали клети абсолютно жесткие, то изменение упругой деформации клети произойдет за счет увеличения стрелы прогиба валков и наоборот.

Следовательно, если жесткость одной или нескольких деталей клети будет во много раз меньше жесткости остальных де-

талей, то изменение упругой деформации клетки практически произойдет только за счет менее жестких деталей. Назовем условно все упруго деформирующиеся детали, кроме валков, предохранительной деталью, имеющей до нагружения первоначальные размеры — высоту  $H$  и сечение  $F$ .

Упругая деформация такой обобщающей детали от действия силы предварительного сжатия валков будет

$$\Delta h_d = \frac{P_{сж} H}{FE},$$

откуда

$$P_{сж} = \Delta h_d c_d, \quad (146)$$

где  $c_d = \frac{FE}{H}$  — коэффициент жесткости детали.

Во время прокатки усилие, сжимающее предохранительную деталь, можно определить по уравнению

$$P_d = (\Delta h_d + \Delta h'_d) c_d = P_{сж} + \Delta P, \quad (147)$$

где  $\Delta h'_d$  — изменение упругой деформации от действия силы  $\Delta P$  или, что равноценно, изменение размера калибра по высоте.

В этом случае валки будут сжаты силой

$$P_v = P_d - P = P_{сж} + \Delta P - P, \quad (148)$$

а радиальное сжатие валков уменьшится на  $\Delta h'_d$ . При этом величина радиального сжатия двух валков составит

$$2 \Delta R_0 - \Delta h'_d = 2 \frac{2kn_0 P_v}{l_0},$$

откуда

$$\Delta h'_d = 2 \Delta R_0 - \frac{4kn_0 P_v}{l_0}. \quad (149)$$

Подставляя в это уравнение значение  $\Delta R_0$ ,  $P_v$  и учитывая, что  $\Delta P = \Delta h'_d c_d$ , получаем

$$\Delta h'_d = \frac{P}{\frac{l_0}{4kn_0} + c_d}. \quad (150)$$

Из уравнения (150) следует, что изменение упругой деформации напряженной клетки с предварительно сжатыми валками прямо пропорционально давлению прокатки и обратно пропорционально сумме жесткости валков и предохранительной детали. Упругая деформация такой клетки не превышает величину радиального сжатия валков и численно равна изменению размера калибра по высоте, т. е.

$$f_{н.в} = \Delta h'_d. \quad (151)$$

Принимая для стальных валков  $E = 22 \text{ Гн/м}^2$  ( $2,2 \cdot 10^6 \text{ кг/см}^2$ ) и  $\mu = 0,3$  и подставляя эти значения в уравнение (150), можно получить

$$f_{н.в} = \frac{P}{1,9 \cdot 10^6 \frac{l_0}{n_0} + c_d}. \quad (152)$$

Для чугунных валков при  $E = 18 \text{ Гн/м}^2$  ( $1,8 \cdot 10^6 \text{ кг/см}^2$ ) и  $\mu = 0,25$

$$f_{н.в} = \frac{P}{1,5 \cdot 10^6 \frac{l_0}{n_0} + c_d}. \quad (153)$$

Подставляя в уравнение (147) значение  $\Delta P$ , определим усилие, воспринимаемое предохранительной деталью:

$$P_d = P_{сж} + c_d \Delta h'_d = P_{сж} + \frac{P}{\frac{l_0}{4kn_0 c_d} + 1}. \quad (154)$$

Из уравнения (154) следует, что с увеличением жесткости предохранительной детали возрастает и сжимающее ее усилие. При конструировании клеток с предварительно сжатыми валками это необходимо учитывать, так как чрезмерное увеличение жесткости предохранительной детали приведет к резкому возрастанию нагрузки на подшипники и к преждевременному выходу их из строя.

Подставляя в уравнение (148) значение  $P_d$ , определим усилие, сжимающее валки при прокатке:

$$P_v = P_{сж} - \frac{P}{1 + \frac{l_0}{4kn_0 c_d}}. \quad (155)$$

Следовательно, усилие, сжимающее валки, возрастает при увеличении жесткости предохранительной детали, но не превышает силы  $P_{сж}$  предварительного нагружения.

На рис. 73 представлен в общем виде график изменения упругой деформации валков и предохранительной детали в зависимости от действующих на них усилий. Как следует из графика, величина изменения размера калибра по высоте не превышает величины радиального сжатия валков даже тогда, когда давле-

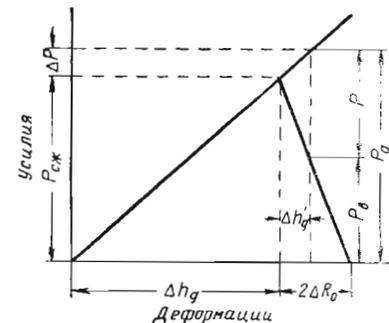


Рис. 73. График изменения упругой деформации клетки в зависимости от  $P_{сж}$  и  $P$

ние металла на валки будет равно усилию предварительного нагружения.

Рассмотрим случай нагружения валков гидравлическим установочным механизмом. В процессе работы клеть также нагружена силой предварительного сжатия валков  $P_{сж}$  и давлением прокатки  $P$ . Когда полоса находится в валках, они сжаты силой (см. рис. 72,б):

$$P_B = P_{сж} - P. \quad (156)$$

При этом радиальное сжатие валков уменьшится на величину

$$2 \Delta R_0 - 2 \frac{2kn_0 P_B}{l_0} = \frac{4kn_0 P}{l_0}.$$

Так как упругая деформация клетки численно равна изменению размера калибра по высоте, то получим

$$f_{н.в} = \frac{4kn_0 P}{l_0}. \quad (157)$$

Из уравнения (157) следует, что изменение упругой деформации клетки прямо пропорционально давлению прокатки и обратно пропорционально жесткости валков.

Для стальных валков из уравнения (157) имеем

$$f_{н.в} = \frac{n_0 P}{1,9 \cdot 10^6 l_0}. \quad (158)$$

Для чугунных валков

$$f_{н.в} = \frac{n_0 P}{1,5 \cdot 10^6 l_0}. \quad (159)$$

Усилие  $P_{сж}$ , действующее со стороны гидравлического установочного механизма на валки, подшипники и другие детали, остается постоянным до начала и в процессе прокатки. Такое равномерное нагружение клетки благоприятно сказывается на ее работе, так как действие постоянной нагрузки исключает динамические удары и поломки напряженных деталей.

Для облегчения расчетов по уравнениям (152), (153), (158) и (159) в табл. 24 и 25 приведены значения коэффициента  $n_0 = \frac{\delta}{2 \Delta R_0}$  для чугунных и стальных валков.

Прокатку между двумя предварительно сжатыми валками целесообразно вести при одном приводном валке, например нижнем. Это устранит относительное проскальзывание валков, уменьшит нагрев и износ контактных поверхностей.

Надежный захват металла валками в предчистовых и чистовых клетях проволочных и мелкосортных станков происходит при сравнительно малых углах захвата и наличии избыточного момента трения, приложенного к верхнему холостому валку.

Таблица 24

Значение коэффициента  $n_0$  для чугунных валков

Радиус бурта, мм	Длина бурта, мм	Коэффициент $n_0$ при различных усилиях предварительного сжатия, кн (Т)				
		98,1 (10)	196,2 (20)	294,3 (30)	392,4 (40)	490,5 (50)
100	100	6,00	5,65	5,40	5,25	5,20
150	100	6,21	6,84	5,55	5,46	5,39
200	100	6,37	6,00	5,70	5,58	5,54
250	100	6,45	6,10	5,80	5,68	5,64
300	100	6,54	6,17	5,92	5,75	5,73
100	150	6,20	5,85	5,70	5,55	5,40
150	150	6,30	6,05	5,80	5,70	5,60
200	150	6,35	6,20	5,95	5,85	5,75
250	150	6,50	6,30	6,05	5,95	5,85
300	150	6,65	6,40	6,15	6,05	5,90
100	200	6,30	6,00	5,80	5,65	5,50
150	200	6,50	6,15	6,05	5,85	5,75
200	200	6,60	6,30	6,15	6,00	5,90
250	200	6,70	6,40	6,20	6,10	6,00
300	200	6,80	6,50	6,30	6,15	6,05

Таблица 25

Значение коэффициента  $n_0$  для стальных валков

Радиус бурта, мм	Длина бурта, мм	Коэффициент $n_0$ при различных усилиях предварительного сжатия, кн Т				
		98,1 (10)	196,2 (20)	294,3 (30)	392,4 (40)	490,5 (50)
100	100	6,20	5,85	5,65	5,50	5,40
150	100	6,25	6,05	5,85	5,65	5,60
200	100	6,55	6,20	6,00	5,75	5,70
250	100	6,70	6,30	6,10	5,90	5,80
300	100	6,75	6,40	6,15	6,00	5,90
100	150	6,20	6,15	5,90	5,70	5,65
150	150	6,65	6,35	6,10	5,90	5,85
200	150	6,80	6,50	6,20	6,10	6,00
250	150	6,90	6,60	6,35	6,20	6,10
300	150	7,00	6,70	6,45	6,30	6,20
100	200	6,50	6,30	6,15	5,90	5,75
150	200	6,70	6,50	6,30	6,10	6,00
200	200	6,85	6,60	6,45	6,25	6,15
250	200	6,90	6,75	6,55	6,35	6,25
300	200	7,05	6,80	6,65	6,45	6,35

При сжатии валков момент сил трения на бочке холостого валка будет

$$M_{фр} = P_{сж} \mu \frac{D_0}{2}, \quad (160)$$

где  $\mu$  — коэффициент трения на бочке валка.

Момент сил трения на шейках холостого валка выразится

$$M_{тр} = P_{сж} \mu_{ш} \frac{d}{2}, \quad (161)$$

где  $d$  — диаметр шейки;

$\mu_{ш}$  — коэффициент трения шейки в подшипнике.

Избыточный момент сил трения верхнего холостого валка будет

$$M_{и} = M_{фр} - M_{тр} = P_{сж} \left( \mu \frac{D_0}{2} - \mu_{ш} \frac{d}{2} \right). \quad (162)$$

Момент прокатки определится

$$M_{пр} = P \psi l = 0,6 P \frac{D_0}{2} \alpha, \quad (163)$$

где  $l$  — длина дуги захвата;

$\alpha$  — угол захвата в радианах;

$\psi$  — коэффициент положения равнодействующей давления на валки [21].

Для захвата металла при одном приводном валке необходимо, чтобы  $M_{и} > M_{пр}$ , т. е.

$$P_{сж} \left( \mu \frac{D_0}{2} - \mu_{ш} \frac{d}{2} \right) > 0,6 P \frac{D_0}{2} \alpha. \quad (164)$$

Подставим в это неравенство значение величин  $\mu$ ,  $\mu_{ш}$ ,  $d$ ,  $D_0$ . Тогда для чистовой клетки проволочного стана получим

$$P_{сж} \left( 0,2 \cdot \frac{30}{2} - 0,05 \cdot \frac{16}{2} \right) > 0,6 P \frac{30}{2} \cdot 0,18,$$

т. е.  $2,6 P_{сж} > 1,6 P$  или  $M_{и}, M_{пр}$ .

Таким образом захват металла в предварительно напряженной клетке при одном обводном валке вполне возможен.

Пример. Произвести расчет упругой деформации чистовой напряженной клетки с предварительно сжатыми валками мелкосортного стана 280 при давлении металла на валки  $P = 313,9$  кн (32 Т). Для расчета принимаем:

$$D_0 = 300 \text{ мм}; l_0 = 100 \text{ мм}; P_{сж} = 392,4 \text{ кн (40 Т)}.$$

Поправочный коэффициент  $n_0 = 5,46$  (см. табл. 24).

1. Предварительное нагружение клетки производится винтовым установочным механизмом. Коэффициент жесткости стальной предохранительной детали при  $d = 45$  мм и  $H = 100$  мм будет

$$c_d = \frac{FE}{H} = \frac{3,14 \cdot 4,5^2 \cdot 2,2 \cdot 10^6}{4 \cdot 10} = 354 \text{ Мн/м (3,54} \cdot 10^6 \text{ кг/см)}.$$

Изменение упругой деформации клетки при прокатке найдем по уравнению (153)

$$f_{н.в} = \frac{P}{1,5 \cdot 10^6 \frac{l_0}{n_0} + c_d} = \frac{32000}{1,5 \cdot 10^6 \cdot \frac{10}{5,46} + 3,54 \cdot 10^6} = 0,0051 \text{ см}.$$

2. Предварительное нагружение клетки производится гидравлическим установочным механизмом. В этом случае изменение упругой деформации клетки найдем по уравнению (159):

$$f_{н.в} = \frac{n_0 P}{1,5 \cdot 10^6 l_0} = \frac{32000 \cdot 5,46}{1,5 \cdot 10^6 \cdot 10} = 0,0116 \text{ см}.$$

Следовательно, при прочих равных условиях, упругая деформация предварительно напряженной клетки в значительной степени зависит от способа нагружения валков и уменьшается с увеличением жесткости предохранительной детали винтового установочного механизма.

Сопоставляя величины упругой деформации клеток мелкосортного стана 280 обычной конструкции и с предварительно нагруженными подушками с величиной упругой деформации клетки с предварительно нагруженными валками при расположении буртов в середине бочки, получим

$$\frac{f_k}{f_{н.в}} = \frac{0,06}{0,0116} = 5,2 \text{ и } \frac{f_{н.к}}{f_{н.в}} = \frac{0,0252}{0,0116} = 2,2.$$

Таким образом, напряженная клетка с предварительно сжатыми валками жестче обычной клетки в 5,2 раза и жестче напряженной клетки с предварительно сжатыми подушками в 2,2 раза.

#### РАСЧЕТ ПРОФИЛЯ ВАЛКОВ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННОЙ КЛЕТКИ

Исходными данными для расчета профиля валков являются максимально возможное давление металла на валки при прокатке и величина прогиба валков при этом давлении. Исходя из

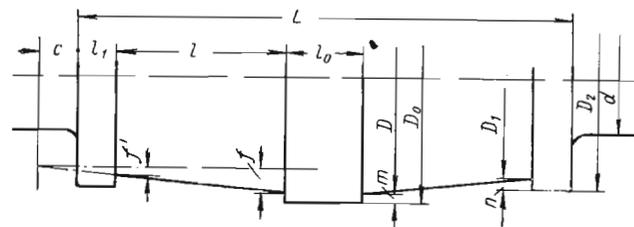


Рис. 74. Профиль прокатного валка

допускаемых напряжений сжатия на контактной поверхности, найдем длину среднего бурта валка (рис. 74).

Максимальное напряжение в центре площадки контакта будет

$$\sigma_{\max} = 0,418 \sqrt{P_1 E \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)}, \quad (165)$$

где  $P_1 = \frac{P_{сж}}{l_0}$  — давление на единицу длины цилиндра;  
 $R_1$  и  $R_2$  — радиус валков.

Из уравнения (165) найдем длину среднего бурта

$$l_0 = \frac{0,175 P_{сж} E \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)}{\sigma_{\max}^2}, \quad (166)$$

где  $P_{сж}$  — усилие предварительного сжатия валков.

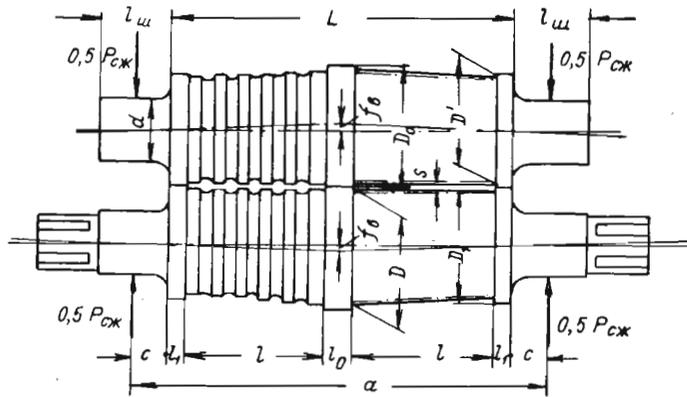


Рис. 75. Прокатные валки в сжатом состоянии

Высоту среднего бурта  $m$  в зависимости от требуемого зазора  $s$  после сжатия валков (рис. 75) определим из уравнения

$$m = \frac{s}{2} + \Delta R_0, \quad (167)$$

где  $\Delta R_0$  — радиальное сжатие валка.

Больший диаметр калиброванного участка валка

$$D = D_0 - 2m. \quad (168)$$

Меньший диаметр калиброванного участка валка

$$D' = D - 2(f - f'), \quad (169)$$

здесь  $f' = f \left( 1 - \frac{2l}{a - l_0} \right)$  из отношения  
 $f : f' = \frac{a - l_0}{2} : (c + l_1)$ .

Конусность калиброванного участка

$$K_b = \frac{D - D'}{l} = \frac{2(f - f')}{l}, \quad (170)$$

где  $f$  — стрела прогиба валка у торца рабочего бурта.

Длину крайних опорных буртов валка принимаем равной половине длины среднего бурта, т. е.

$$l_1 = 0,5 l_0. \quad (171)$$

Высоту крайних опорных буртов  $n$  принимаем равной половине зазора  $s$  между калиброванными участками:

Тогда диаметры крайнего бурта

$$D_1 = D' + 2n = D' + s; \quad (172)$$

$$D_2 = D_1 - K_b l_1 = D' + s - K_b l_1. \quad (173)$$

Валки напряженной клетки могут быть выполнены и с двумя рабочими буртами, расположенными симметрично относительно середины бочки (рис. 76). Как отмечалось ранее, влияние прогиба валков на размеры проката в такой клетке устранено только частично.

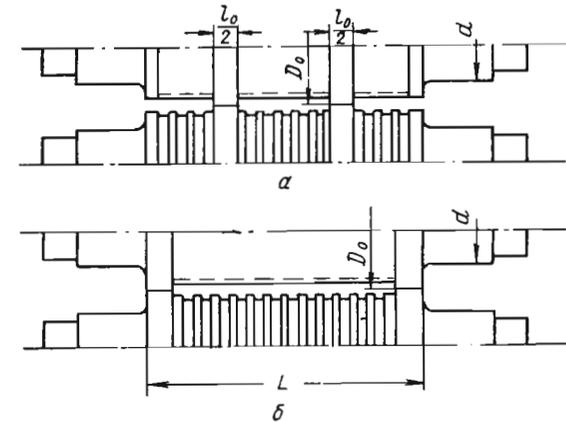


Рис. 76. Прокатные валки с двумя опорными буртами:  
 а — промежуточное расположение буртов; б — крайнее расположение буртов

Рассмотрим случай нагружения клетки гидравлическим установочным механизмом (рис. 77). Пусть рабочие валки сжаты силой  $P_{сж}$ , превышающей максимальное давление прокатки  $P$ . Под действием предварительной нагрузки они прогибаются, а контактные поверхности буртов, расположенные по краям бочки, сплющиваются. Общая стрела прогиба валка (рис. 77,б) от действия силы предварительного сжатия будет

$$f_b = f_1 + f_2,$$

где  $f_1$  — стрела прогиба от действия изгибающих моментов;  
 $f_2$  — стрела прогиба от действия поперечных сил.

По теореме Кастильяно [45] производная потенциальной энергии деформации по одной из независимых внешних сил равна перемещению, соответствующему этой силе, тогда

$$f_1 = \frac{\partial U_1}{\partial P} = \frac{1}{EI} \int M \frac{\partial M}{\partial P} dx, \quad (174)$$

$$f_2 = \frac{\partial U_2}{\partial P} = \frac{1}{GF} \int Q \frac{\partial Q}{\partial P} dx, \quad (175)$$

где  $U_1$  — потенциальная энергия системы от действия изгибающих моментов;  
 $U_2$  — потенциальная энергия системы от действия поперечных сил;  
 $P$  — внешняя сила в месте определения прогиба валка;  
 $M$  и  $Q$  — изгибающий момент и поперечная сила в любом сечении;  
 $E$  и  $G$  — модуль упругости и модуль сдвига;  
 $I$  — момент инерции поперечного сечения  $F$ .

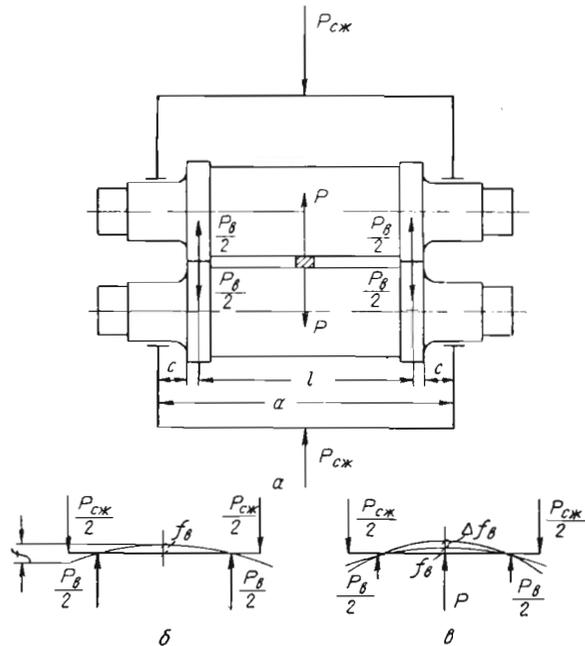


Рис. 77. Нагружение клетки гидравлическим установочным механизмом:  
 $a$  — схема сил, действующих на клетку;  $b$  — прогиб предварительно нагруженного валка;  $\delta$  — прогиб валка при прокатке

Изгибающий момент для отдельных участков предварительно нагруженного валка (рис. 77,а) будет

$$x = 0 \div \frac{a-l}{2}$$

при

$$M_1 = -\frac{P_{сж}}{2} x, \quad (176)$$

$$x = \frac{a-l}{2} \div \frac{a}{2}$$

при

$$M_2 = -\frac{P_{сж}}{2} x + \frac{P_{сж}}{2} \left(x - \frac{a-l}{2}\right), \quad (177)$$

$$P_{сж} = P_v.$$

где

Дифференцируя уравнения (176) и (177) по  $P_{сж}$ , находим

$$\frac{\partial M_1}{\partial P_{сж}} = -\frac{x}{2} \text{ и } \frac{\partial M_2}{\partial P_{сж}} = -\frac{a-l}{2}.$$

Подставляя значения моментов и частных производных в уравнение (174), найдем прогиб по середине валка:

$$f_1 = \frac{1}{EI_2} \int_0^c \frac{P_{сж}}{4} x^2 dx + \frac{1}{EI_1} \int_c^{\frac{a-l}{2}} \frac{P_{сж}}{4} x^2 dx +$$

$$+ \frac{1}{EI_1} \int_{\frac{a-l}{2}}^{\frac{a}{2}} \left[ -\frac{P_{сж}}{2} x + \frac{P_{сж}}{2} \left(x - \frac{a-l}{2}\right) \right] \left(-\frac{a-l}{4}\right) dx =$$

$$= \frac{P_{сж}}{96 EI_1} \left[ a^3 - 3al^2 - 2l^3 + 8c^3 \left(\frac{I_1}{I_2} - 1\right) \right], \quad (178)$$

где  $I_1$  — момент инерции сечения бочки валка;

$I_2$  — момент инерции сечения шейки валка.

Дифференцируя по  $x$  уравнения (176) и (177), найдем поперечные силы в отдельных сечениях валка:

при

$$x = 0 \div \frac{a-l}{2}$$

$$\frac{dM_1}{dx} = Q_1 = -\frac{P_{сж}}{2}, \quad (179)$$

при

$$x = \frac{a-l}{2} \div \frac{a}{2}$$

$$\frac{dM_2}{dx} = Q_2 = 0. \quad (180)$$

Тогда

$$\frac{dQ_1}{\partial P_{сж}} = -\frac{1}{2} \text{ и } \frac{\partial Q_2}{\partial P_{сж}} = 0.$$

Подставляя значение поперечных сил и частных производных в уравнение (175), получим

$$f_2 = \frac{1}{CF_2} \int_0^c \frac{P_{сж}}{4} dx + \frac{1}{GF_1} \int_c^{\frac{a-l}{2}} \frac{P_{сж}}{4} dx + \frac{1}{GF_1} \int_{\frac{a-l}{2}}^{\frac{a}{2}} 0 dx = \frac{P_{сж}}{8GF_1} \left[ a-l + 2c \left( \frac{F_1}{F_2} - 1 \right) \right]. \quad (181)$$

Для построения профиля валка необходимо определить стрелу прогиба  $f_b$  между буртами от действия силы предварительного сжатия.

Как следует из уравнений (178) и (181), прогиб бочки на этом участке происходит только от действия изгибающего момента и определяется из уравнения

$$f_b = \frac{1}{EI_1} \int_{\frac{a-l}{2}}^{\frac{a}{2}} \frac{P_{сж}}{16} (a-l)^2 dx = \frac{P_{сж}}{16EI_1} (a-l)^2 x \Big|_{\frac{a-l}{2}}^{\frac{a}{2}} = \frac{P_{сж}}{32EI_1} (a-l)^2 l. \quad (182)$$

В процессе прокатки клеть будет нагружена силой предварительного сжатия валков и давлением прокатываемого металла. При этом радиальное сжатие опорных буртов уменьшится на величину  $f_{н.в}$ , а прогиб валков увеличится на величину  $2\Delta f_b$ , (рис. 77, в). Тогда упругая деформация клетки, численно равная изменению размера калибра по высоте, будет

$$f_k = f_{н.в} + 2\Delta f_b, \quad (183)$$

где  $\Delta f_b$  — изменение прогиба валка.

Уменьшение радиального сжатия буртов найдем по формуле (157):

$$f_{н.в} = \frac{4kn_0 P}{l_0}.$$

Максимальное изменение прогиба валка составит

$$\Delta f_b = f'_b - f_b, \quad (184)$$

где  $f'_b$  — стрела прогиба валка между буртами при прокатке, когда  $P_{сж} = P$ ;

$f_b$  — стрела прогиба на этом же участке при отсутствии полосы в валках.

Высота крайнего бурта, с учетом требуемого зазора между калиброванными участками после сжатия валков, будет (рис. 78)

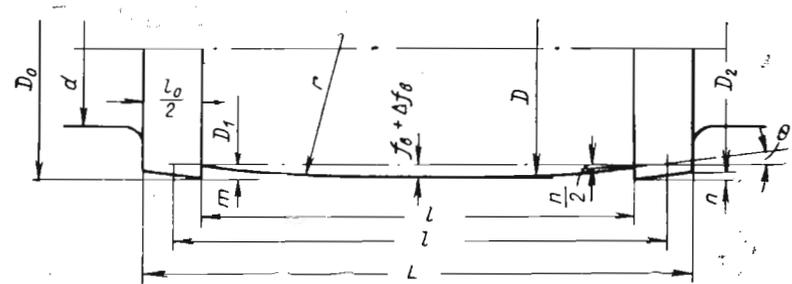


Рис. 78. Профиль валка с двумя опорными буртами

$$m = \frac{s}{2} + \Delta R_0.$$

Минимальный диаметр калиброванной части бочки составит

$$D_1 = D_0 - 2m, \quad (185)$$

а максимальный диаметр этой же части бочки с учетом прогиба валка будет

$$D = D' + 2(f_b + \Delta f_b) - n, \quad (186)$$

где  $n$  — удвоенная величина прогиба валка у торца рабочего бурта.

Расчеты показывают, что для коротких валков, когда длина бочки не превышает  $2D$ , величина  $\Delta f_b$  незначительна и ею можно пренебречь. Тогда

$$D = D_1 + 2f_b - n. \quad (187)$$

Значение  $n$  определим по выражению

$$n = \frac{l_0}{2} \operatorname{tg} \theta. \quad (188)$$

где  $\theta$  — угол поворота поперечного сечения бурта относительно первоначального положения.

Принимая валок за балку постоянного поперечного сечения и учитывая действие поперечных сил коэффициентом  $k$ , найдем [21, 45]

$$\theta = \frac{k P_{\text{сж}}}{8EI} (a - l) l.$$

Наружный диаметр рабочего бурта

$$D_2 = D_0 - 2n. \quad (189)$$

Полагая, что изогнутая ось валка является частью окружности и принимая расстояние между центрами буртов за хорду, найдем приближенно радиус кривизны калиброванного участка бочки. Формула для определения хорды имеет вид [70]:

$$a = 2 \sqrt{2hr - h^2},$$

откуда

$$r = \frac{a - 4h^2}{8h}, \quad (190)$$

где  $h$  — стрела сегмента;

$r$  — радиус окружности.

Подставляя в уравнение (190) вместо  $a$  и  $h$  соответственно  $l$  — расстояние между буртами и  $f_B$  — прогиб валка, получим

$$r = \frac{l^2}{8f_B} - \frac{f_B}{2}. \quad (191)$$

Несмотря на некоторые допущения, полученные зависимости позволяют с приемлемой для практики точностью, рассчитать элементы профиля рабочих валков напряженных клетей.

**Пример.** Произвести расчет элементов профиля чугунных валков предварительно напряженной клетки мелкосортного стана 280. Рабочие валки имеют два бурта, симметрично расположенных по краям бочки (рис. 78).

Исходные данные для расчета:

$$P_{\text{сж}} = 392,4 \text{ кН (40 Т)}; \quad E = 155 \text{ Гн/м}^2 (1,8 \cdot 10^6 \text{ кг/см}^2);$$

$$P = 313,9 \text{ кН (32 Т)}; \quad \sigma = 1460 \text{ Мн/м}^2 (15 \text{ 000 кг/см}^2);$$

$$a = 700 \text{ мм}; \quad D_0 = 300 \text{ мм}; \quad s = 2 \text{ мм}.$$

Общую длину рабочих буртов найдем из уравнения (166):

$$l_0 = \frac{0,175 P_{\text{сж}} E \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)}{\sigma^2} = \frac{0,175 \cdot 40000 \cdot 1,8 \cdot 10^6 \left( \frac{1}{15} + \frac{1}{15} \right)}{15000^2} = 7,5 \text{ см}.$$

Принимаем  $l_0 = 80 \text{ мм}$ .

Расстояние между буртами

$$l = L - \frac{l_0}{2} = 530 - \frac{80}{2} = 490 \text{ мм}.$$

Прогиб валка на участке  $l$  находим из уравнения (182):

$$f_B = \frac{P_{\text{сж}}}{32EI_1} (a - l)^2 l = \frac{40000 \cdot 64}{32 \cdot 1,8 \cdot 10^6 \cdot 3,14 \cdot 30^4} (70 - 49)^2 \cdot 49 = 0,0004 \text{ см}.$$

Радиальное сжатие буртов, согласно уравнению (145), будет

$$\Delta R_0 = \frac{2kn_0 P_{\text{сж}}}{l_0} = \frac{2 \cdot (1 - 0,25^2) \cdot 5,35 \cdot 40000}{8 \cdot 3,14 \cdot 1,8 \cdot 10^6} = 0,01 \text{ см},$$

где  $n_0 = 5,35$  — поправочный коэффициент (см. табл. 24).

Высота рабочего бурта составит

$$m = \frac{s}{2} + \Delta R_0 = \frac{2}{2} + 0,1 = 1,1 \text{ мм}.$$

Угол поворота поперечного сечения бурта при сжатии валков ( $k=1,5$ )

$$\theta = \frac{kP_{\text{сж}}}{8EI} (a - l) l = \frac{40000 (70 - 49) \cdot 49 \cdot 64 \cdot 1,5}{8 \cdot 1,8 \cdot 10^6 \cdot 3,14 \cdot 30^4} = \frac{108}{10^6} \text{ рад}.$$

Пренебрегая величинами прогиба валка у торца бурта и изменением прогиба валка в процессе прокатки (ввиду их малости), найдем диаметры калиброванной части бочки из уравнений (185) и (186):

$$D_1 = D_0 - 2m = 300 - 2 \cdot 1,1 = 297,8 \text{ мм}.$$

$$D = D_1 + 2f_B = 297,8 + 2 \cdot 0,004 = 297,81 \text{ мм}.$$

Радиус кривизны калиброванного участка бочки, согласно уравнению (191), будет

$$r = \frac{l^2}{8f_B} - \frac{f_B}{2} = \frac{490^2}{8 \cdot 0,004} - \frac{0,004}{2} = 7,5 \cdot 10^6 \text{ мм},$$

Из приведенного расчета следует, что при сравнительно коротких валках, когда отношение  $D : L \geq 0,5$ , калиброванный участок бочки может быть выполнен в виде цилиндра.

### КЛЕТИ С ПОДВИЖНЫМИ ОПОРНЫМИ БУРТАМИ ВАЛКОВ

Прокатку в чистовых клетях действующих сортовых станов с предварительно сжатыми валками можно производить: а) с двумя приводными валками, б) с одним приводным валком, в) с двумя приводными валками, имеющими подвижные опорные бурты.

Практика показала, что прокатка в предварительно напряженной клетке с двумя приводными валками, имеющими неодинаковые диаметры, сопровождается относительным проскальзыванием соприкасающихся буртов, вызывающим их износ и перегрузку привода. Изготовление валков с одинаковыми диаметрами буртов очень сложно и не всегда технологически возможно.

Прокатка с одним приводным валком лишена отмеченных недостатков, однако при этом относительно невелики углы захвата и возможны пробуксовки полосы в калибре.

Для сохранения стабильности процесса прокатки в предварительно сжатых валках и возможности регулирования высоты калибра целесообразно вести прокатку с двумя приводными валками, каждый из которых может иметь подвижные опорные бурты.

Высоту калибра обычной неработающей клетки определяют по размерам ручьев и величине зазора между валками:

$$K = h_{p1} + h_{p2} + s_0, \quad (192)$$

где  $K$  — установочная высота калибра;  
 $h_{p1}$  и  $h_{p2}$  — фактическая глубина нижнего и верхнего ручьев;  
 $s_0$  — зазор между валками без учета зазоров и люфтов между соприкасающимися деталями.

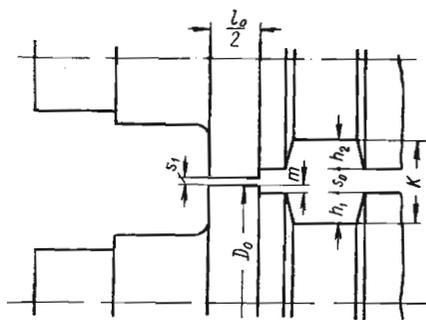


Рис. 79. Высота калибра для валков с опорными буртами

Для валков с опорными буртами (рис. 79) и калиброванной цилиндрической бочкой

$$s_0 = s_1 + 2m, \quad (193)$$

где  $s_1$  — зазор между опорными буртами;

$m$  — высота опорного бурта.

Тогда установочная высота калибра

$$K = h_{p1} + h_{p2} + s_1 + 2m. \quad (194)$$

Во время работы клетки высота калибра изменяется под действием упругой деформации деталей, износа калибров термического расширения валков и т. п. Поэтому рабочая высота калибра в определенный момент прокатки равна алгебраической сумме его погрешностей, т. е.

$$K_p = K + f_k + \Delta s + \Delta h_t + \Delta h_p + \Delta h_n + \Delta c, \quad (195)$$

где  $f_k$  — упругая деформация клетки;  
 $\Delta s$  — зазоры и люфты между соприкасающимися деталями;  
 $\Delta h_t$  — изменение высоты калибра вследствие нагрева валков;  
 $\Delta h_p$  — износ калибра по высоте;  
 $\Delta h_n$  — износ подшипников и других деталей клетки;  
 $\Delta c$  — изменение высоты калибра, вызываемое радиальным биением валков.

При соприкосновении валков в неработающей клетке высота калибра будет меньше на величину зазора между опорными буртами. При сжатии валков дальнейшее уменьшение высоты будет

вызвано устранением зазоров между соприкасающимися деталями и сплющиванием опорных буртов.

Высота калибра при сжатых валках

$$K_{сж} = h_{p1} + h_{p2} + 2(m - \Delta R_0) + 2f_b, \quad (196)$$

где  $\Delta R_0$  — радиальное сжатие опорных буртов;

$f_b$  — стрела прогиба валка между буртами от действия силы предварительного сжатия.

Радиальное сжатие опорных буртов определяют по формуле (145):

$$\Delta R_0 = \frac{2kn_0 P_{сж}}{l_0},$$

а стрелу прогиба валка между буртами — по формуле (182).

В период, когда полоса находится в предварительно сжатых валках, высота калибра увеличивается за счет уменьшения радиального сжатия буртов и увеличения стрелы прогиба валков. Тогда рабочая высота калибра

$$K_{p,сж} = K_{сж} + f_{н.в} + 2\Delta f_b + \Delta h_t + \Delta h_p + \Delta h_n + \Delta c, \quad (197)$$

где  $f_{н.в}$  — радиальное сжатие буртов от усилия прокатки;

$\Delta f_b$  — изменение стрелы прогиба валков между опорными буртами.

Изменение первоначальной высоты калибра составит

$$\delta_{сж} = K_{p,сж} - K_{сж}. \quad (198)$$

Подставляя в уравнение (198) значение  $K_{p,сж}$  и  $K_{сж}$ , получим

$$\delta_{сж} = f_{н.в} + 2\Delta f_b + \Delta h_t + \Delta h_p + \Delta h_n + \Delta c. \quad (199)$$

Таким образом, высота калибра при прокатке в клетке с предварительно сжатыми валками зависит от величины изменения радиального сжатия опорных буртов, приращения прогиба валков, износа калибров, подшипников, а также нагрева и биения валков.

Изменяя силу предварительного сжатия опорных буртов, можно, при прочих равных условиях, изменить упругую деформацию клетки ( $f_{н.в} + 2\Delta f_b$ ), а следовательно, регулировать размер по высоте.

Усилие предварительного сжатия может быть больше общего давления металла на валки при прокатке, равно ему или быть меньше. В сортовых клетях действующих станов опорные бурты можно нагружать силой несколько меньшей давления металла на валки, но достаточной для того, чтобы были устранены зазоры и люфты между сопряженными деталями, находящимися под нагрузкой. Предварительная нагрузка позволит избежать ударов при захвате металла валками и обеспечит более равномер-

ную работу клетки. Поскольку в момент нахождения полосы в калибре опорные бурты не будут соприкасаться между собой, срок их службы значительно увеличится.

Прокатка с предварительным нагружением опорных буртов может быть успешно осуществлена в клетях с двумя приводными валками (рис. 80), которые имеют подвижные опорные бурты. Наличие подвижных опорных буртов устраняет проскальзывание и износ соприкасающихся поверхностей при работе клетки. Каждый подвижной бурт 2 представляет собой наружное кольцо подшипника скольжения или качения с высокой грузоподъем-

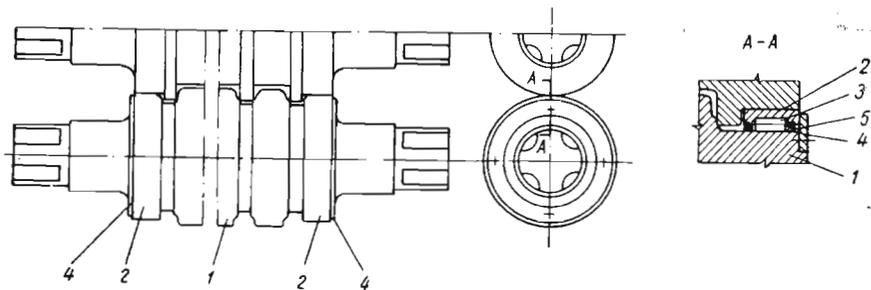


Рис. 80. Валки с подвижными и неподвижными опорными буртами

ностью. В последнем случае между буртом и телом валка 1 установлены ролики 3. Фиксация подвижного бурта в осевом направлении осуществляется с помощью шайбы 4. Для предохранения опоры подвижного бурта от попадания окалины и сохранения смазки предусмотрены уплотняющие кольца 5. В качестве опорных буртов можно использовать стандартные подшипники качения, однако в этом случае длина бочки рабочих валков должна быть значительно короче.

Перед прокаткой металла опорные бурты валков сжимают установочным механизмом для устранения всех зазоров и люфтов между деталями. Высоту калибра можно регулировать изменением силы предварительного нагружения.

На переточенные валки устанавливают подвижные бурты соответствующего внутреннего диаметра. Прокатка с предварительно сжатыми валками, снабженными подвижными опорными буртами, позволяет получить экономичные профили проката на действующих сортовых станах.

### НЕНАПРЯЖЕННЫЕ ПРОКАТНЫЕ КЛЕТИ

В последнее время разработаны и внедряются в производство новые конструкции рабочих клеток без предварительного нагружения. Ненапряженные клетки изготовляют без станин и со станинами, двухвалковые и многовалковые с установочными механизмами винтового, клинового и эксцентрикового типов.

На сортовых станах в Швеции, где прокатку простых и фасонных профилей ведут в одну нитку, нашли широкое применение ненапряженные жесткие клетки с короткими рабочими валками. Станы оборудованы универсальными шпинделями, обводными аппаратами и роликовыми проводками. Производительность этих станов не превышает 90 000 т проката в год.

Применяемые конструкции клетей позволяют получить прокат рядовых и качественных сталей с незначительными отклонениями размеров. Необходимую жесткость клетей получают устранением промежуточных деталей, компактным исполнением узлов, сокращением длины бочки валков до величины  $(1 \div 1,5)D$  и применением малогабаритных подшипников качения.

Разработанные для мелкосортных станов ненапряженные клетки трио и переменное дуо конструкции Норлинда имеют специальные подушки, скрепленные между собой винтами и гайками установочного механизма [50]. Собранные подушки устанавливают на стойках, укрепленных на плитовинах. Средние подушки неподвижные и закреплены на стойках так, что ось среднего валка совпадает с линией стана; верхние и нижние подушки могут перемещаться при настройке клетки. Зазор между валками регулируют установочным механизмом (рис. 81), который состоит из неподвижных винтов 2, выполненных заодно с подушками 1, и нажимных гаек 3, вращение которых осуществляется при помощи комбинированного редуктора 4 вручную или электродвигателем. Усилие прокатки, воспринимаемое верхними подушками 5, передается на нажимные гайки через опорные кольца 6. Сопряжение нажимных гаек и колец выполнено по сфере, что позволяет равномерно распределить нагрузку при возможных перекосах подушек и неточностях монтажа. Для опор рабочих валков применяют только самоустанавливающиеся сферические роликовые подшипники. На каждую шейку валка напрессовывают по одному подшипнику. Демонтаж подшипников при перевалках валков производят при помощи масла высокого давления. Осевые усилия, действующие на валки в процессе прокатки, воспринимаются упорными подшипниками, установленными с одной стороны клетки. Верхний валок уравнивается тарельчатыми пружинами; нижний валок удерживается установочными винтами. При этом устраняются зазоры между гайкой и винтом. Вал, соединяющий оба нажимных устройства клетки, снабжен муфтой, при помощи которой можно разобщать привод для отдельной установки подушек.

В новой конструкции клетки число ненапряженных деталей уменьшено, а валок имеет весьма короткую бочку. Поэтому упругая деформация клетки примерно в 3 раза меньше, чем в обычных клетях сортовых станов. Следует отметить, что при изготовлении клетей необходима высокая точность обработки и тщательная подгонка всех деталей при монтаже. Разборку, сборку, регулировку узлов клетки должны производить квалифицирован-

ные технические специалисты. Недостатком клетки является невозможность использования для опор валков самоустанавливающихся подшипников качения и жидкостного трения.

Шведской фирмой Voxholm установлены на непрерывном стане поворотные прокатные клетки с валками диаметром 290—380 мм. Особенность новой конструкции состоит в том, что про-

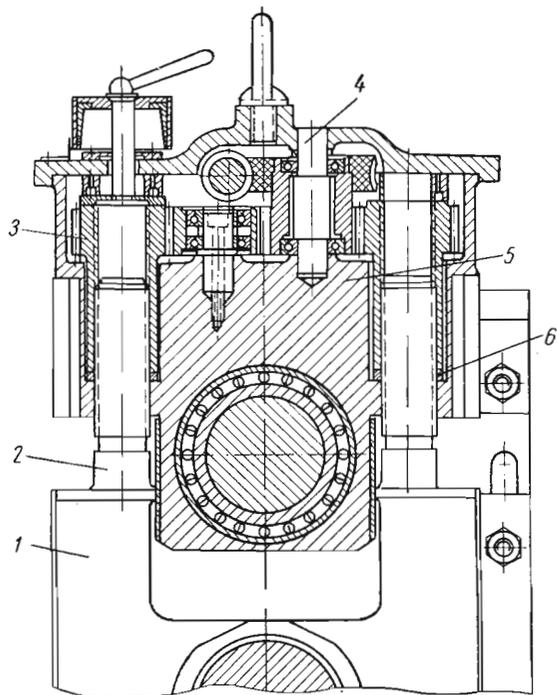


Рис. 81. Установочный механизм валков бесстанинной клетки конструкции Норлинда

катная клетка с проводками, рамой, шпиндельным соединением, шестеренной клетью, редуктором и приводным электродвигателем смонтирована на поворачивающейся головке, центр которой находится на линии прокатки [71].

На рис. 82 показана бесстанинная клетка, состоящая из нижних 1 и верхних 3 подушек, в которых установлены валки 2. Подушки и валки перемещаются винтами 4 установочного механизма 5. Винты имеют правую и левую нарезку, что обеспечивает при настройке клетки сохранение неизменного уровня оси прокатки.

Поворотная головка 8 смонтирована на стойке 10, которая укреплена на бетонном фундаменте. При помощи винтового соединения к поворотной головке крепится ползун 7, имеющий

прямоугольное отверстие для проводковой арматуры 9. Рама 6, на которой укреплена клетка, входит своими выступами в пазы ползуна и перемещается относительно последнего при смене калибров. В качестве опор валков применены четырехрядные конические роликовые подшипники с упорными подшипниками, которые воспринимают осевые усилия.

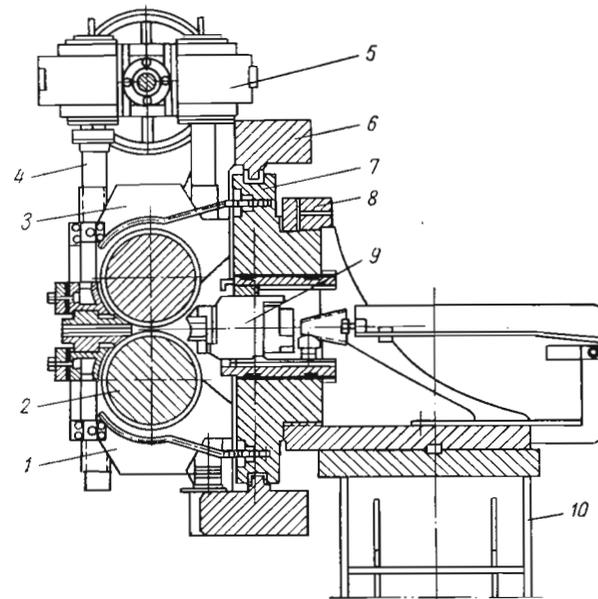


Рис. 82. Поворотная прокатная клетка

При замене клеток валки с подушками устанавливают на определенном расстоянии друг от друга относительно оси прокатки, после чего при помощи гидравлического устройства снимают головки универсальных шпинделей. Перед удалением клетки отводят вводные проводки и отсоединяют трубопроводы водяного охлаждения валков и циркулирующей системы смазки подшипников. Комбинированный редуктор, шестеренная клетка и электродвигатель ( $N=430$  квт,  $n=1200-2000$  об/мин) остаются на поворотной раме.

Новая конструкция чистовой клетки с самоустанавливающимися подушками разработана фирмой Schlöman для непрерывного проволочного стана [59]. Клетки предназначены для прокатки в две нитки катанки диаметром 5,5 мм с допусками  $\pm 0,15$  мм.

Новые клетки отличаются высокой стойкостью роликовых подшипников при скоростях прокатки 30 м/сек, которая возможна

благодаря применению поворотных цапф для самоустановления подушек (см. рис. 56).

Клеть (рис. 83) состоит из трех узлов: промежуточной плитовины 11, станины 6 закрытого типа и комплекта валков. На промежуточной плитовине с передней и задней сторон клетки закреплена вводная и выводная проводковая арматура 7. Во время смены калибров станина перемещается перпендикулярно оси прокатки при помощи винта 9. Фиксация станины относительно промежуточной плитовины осуществляется клиновым устрой-

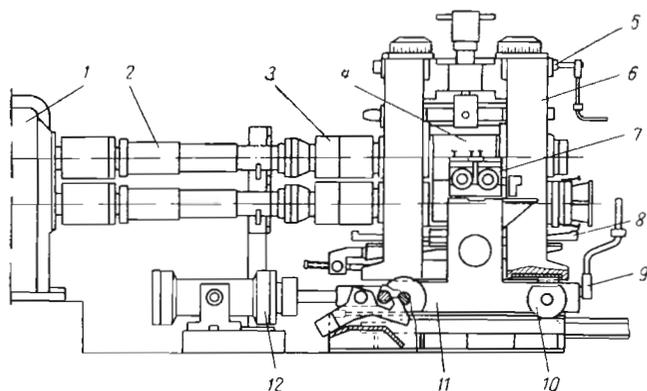


Рис. 83. Прокатная клеть проволочного стана

вом. Для перемещения всей клетки при перевах валков промежуточная плитовина снабжена специальными катками 10 и гидроцилиндром 12.

Подшипники верхнего и нижнего валков помещены в обоймах, которые скреплены между собой траверсами. Самоустановление каждой подушки при прогибе валка достигается двумя цапфами, которые полностью воспринимают усилие, действующее на шейку валка. Поскольку момент трения на цапфах при самоустановлении подушек мал, нагрузка, приходящаяся на подшипник, равномерно распределена по всей его длине. Точную вертикальную регулировку нижнего валка производят клиновым установочным механизмом 8. Перемещение верхнего валка 4 с траверсой уравнивающего устройства производят винтовым нажимным механизмом 5.

Рабочие валки соединяются с приводом 1 телескопическими шпинделями 2, снабженными быстро запирающимися муфтами 3. Перевалку валков на стане производят целыми клетями. Разборку, сборку и предварительную настройку клетей выполняют в мастерской.

К достоинствам клетки с шарнирными опорами подушек следует отнести возможность прокатки с большими скоростями при

значительных нагрузках на валки и небольшие затраты времени при перевах.

Для прокатки в одну—две нитки сортовых профилей повышенной точности авторами разработана конструкция клетки с подвижными поперечинами станин, жесткость которой в 2—3 раза выше существующих [72]. Новая ненапряженная клеть с

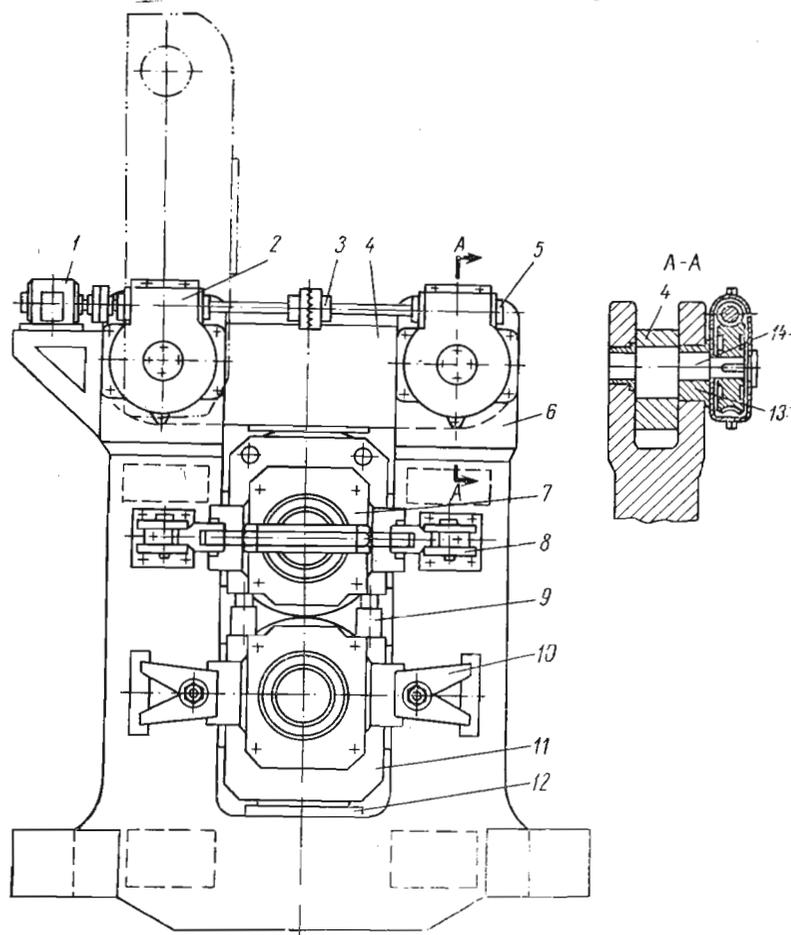


Рис. 84. Клеть с эксцентриковым установочным механизмом

эксцентриковым установочным механизмом может быть установлена на действующих сортовых станах, в чистовых и предчистовых клетях которых давления на валки достигают значительной величины.

На рис. 84 представлена клеть с эксцентриковым установочным механизмом, которая имеет станины открытого типа 6, гид-

равлическое или пружинное уравновешивающее устройство 9 верхнего вала и приспособление 8 для осевого регулирования. Верхние 7 и нижние 11 подушки соприкасаются через вкладыши с поперечинами станин. В качестве опор валков могут быть использованы как подшипники качения, так и подшипники жидкостного трения. Соосность нижнего вала и приводного шпинделя достигается установкой в гнезда нижних поперечин станин сменных цельных вставок 12. Фиксацию одной из нижних подушек в осевом направлении производят при помощи планок 10.

Расстояние между рабочими валками регулируют установочным механизмом, состоящим из электродвигателя 1, червячных редукторов 2 и 5, соединительной муфты 3 и подвижной верхней поперечины 4. Перемещение верхней поперечины параллельно оси прокатки производят при помощи эксцентриков 14, вмонтированных с втулками 13 в стойки станин.

Привод установочного механизма раздельный. Применение подвижных верхних поперечин позволяет устранить промежуточные детали, уменьшить габариты клетки и повысить ее жесткость. Такая конструкция клетки позволяет производить перевалку валков в сторону и вверх. При перевалке валков вверх подвижные поперечины 4 поворачиваются вокруг оси редуктора 2 до вертикального положения. Перевалку валков можно производить при установке клетки на отдельном стенде или непосредственно на стане.

Станину клетки с эксцентриковым установочным механизмом рассчитывают аналогично методике расчета станины открытого типа. Так как верхняя поперечина (крышка станины) удерживается на стойках эксцентриками, то сила  $P$ , действующая на нижнюю поперечину при прокатке, стремится повернуть стойки внутрь станины и зажать крышку. Максимальный изгибающий момент в нижней поперечине

$$M = \frac{Pl}{4} - N_1 l_1, \quad (200)$$

а напряжение изгиба

$$\sigma = \frac{M}{W},$$

где  $l$  — расстояние между нейтральными осями стоек;  
 $l_1$  — расстояние между эксцентриком и нейтральной осью нижней поперечины;  
 $N_1$  — реакция верхней поперечины на стойки;  
 $W$  — момент сопротивления поперечины.

Максимальный изгибающий момент в стойке от действия силы  $N_1$  определяют по уравнению

$$M_1 = N_1 l_1, \quad (201)$$

а суммарное напряжение на ее внутренней поверхности от совместного действия растяжения и изгиба составляет

$$\sigma_1 = \frac{M_1}{W_1} + \frac{P}{2F_1}, \quad (202)$$

где  $W_1$  — момент сопротивления стойки;  
 $F_1$  — площадь сечения стойки.

Полагая, что прогиб стойки станины в точке приложения силы  $N_1$  равен зазору в эксцентрикe, получим [21]

$$N_1 = \frac{\frac{Pl^2}{8} - \frac{\Delta EI}{l_1}}{l_1 \left( l + \frac{2}{3} l_1 \frac{l}{l_1} \right)}, \quad (203)$$

где  $\Delta$  — зазор в эксцентрикe;  
 $E$  — модуль упругости материала станины;  
 $I$  и  $I_1$  — момент инерции поперечины и стойки.

Рассматривая верхнюю поперечину как балку, работающую одновременно на сжатие и изгиб, найдем суммарное максимальное напряжение в середине поперечины:

$$\sigma_2 = \frac{Pl^2}{4W_2} + \frac{N_1}{2F_2}, \quad (204)$$

где  $W_2$  — момент сопротивления;  
 $F_2$  — площадь сечения.

Крутящий момент, который должен быть приложен к валу эксцентрика, чтобы опустить поперечину в момент нахождения полосы в рабочих валках, будет [73]

$$M_{кр} = \frac{P}{2} (m_1 + m_f), \quad (205)$$

где  $m_1$  — идеальное плечо крутящего момента (без учета трения);

$m_f$  — плечо крутящего момента с учетом трения.

Величины  $m_1$  и  $m_f$  находим из уравнений

$$m_1 = c \sin \alpha;$$

$$m_f = \mu_1 r_1 + \mu_2 r_2,$$

где  $\alpha$  — угол поворота эксцентрика;

$c$  — эксцентриситет;

$r_1$  — радиус цапфы;

$r_2$  — радиус эксцентрика;

$\mu_1$  и  $\mu_2$  — коэффициенты трения в подшипниках цапфы и эксцентрика.

Подставляя значения  $m_1$  и  $m_f$  в уравнение (205), получим

$$M_{кр} = \frac{P}{2} (c \sin \alpha + \mu_1 r_1 + \mu_2 r_2). \quad (206)$$

При  $\alpha = 90^\circ$  крутящий момент будет максимальным; тогда для двух эксцентриков получим

$$M_{кр} = P(c + \mu_1 r_1 + \mu_2 r_2). \quad (207)$$

Мощность двигателя установочного механизма для перемещения поперечины составит

$$N_d = \frac{M_{кр} n}{71620 \eta i}, \quad (208)$$

где  $n$  — число оборотов двигателя;

$\eta$  — коэффициент полезного действия червячной передачи;

$i$  — передаточное отношение редуктора.

Все механизмы вышеописанной клетки могут быть полностью автоматизированы. Кроме того, в ней отсутствуют многочисленные промежуточные детали прокладки, предохранительные стаканы, нажимные винты, гайки, что позволяет существенно уменьшить массу, габариты и повысить жесткость конструкции. Клеть с эксцентриковым установочным механизмом проста в исполнении, способна воспринимать значительные нагрузки и может быть применена на линейных и непрерывных станах для получения проката повышенной точности, а также и для фасонных экономичных профилей.

Британская исследовательская ассоциация железа и стали (BISRA) разработала конструкцию прокатной клетки с консольным расположением валков [74]. Новая клеть рассчитана на дав-

и шириной 35—45 мм. Валки установлены на четырехрядных конических подшипниках 6, воспринимающих радиальные и осевые нагрузки при прокатке. Для повышения жесткости валка консоль выполнен небольшой длины, а хвостовая часть валка снабжена дополнительным двухрядным коническим подшипником. Для защиты подшипников от окалины и воды предусмотрены лабиринтные уплотнения, заполняемые густой смазкой. Циркуляционная система смазки обеспечивает обильную подачу масла в подшипники обоих валков. Продолжительность работы подшипников между ремонтами составляет 8—9 мес. при семидневной рабочей неделе по 21 ч в сутки.

Верхняя подушка клетки отлита заодно со станиной 7. Нижняя подушка 4 опирается на клин 2, который расположен на основании станины. Регулирование зазора между валками в вертикальной плоскости производят при помощи клина, в теле которого расположен винт 3.

Для возможности смены валков нижнюю подушку вместе с клиновым устройством перемещают в сторону от верхней подушки при помощи гидравлического цилиндра двойного действия 9. В процессе прокатки этот цилиндр прижимает нижнюю подушку к упору 1, положение которого также регулируется отдельным клином, и устраняет зазоры между сопряженными деталями. При помощи двух гидравлических цилиндров 8, связанных с коленчатыми рычагами 10, упирающимися в приливы станины, создается предварительное напряжение по плоскостям контакта нижней подушки с клином и клина с основанием станины. Применение рычагов позволяет легко освободить нижнюю подушку от предварительного напряжения при смене валков. Проводковый брусок 11 можно регулировать в вертикальной плоскости.

Посадочное место под валки (калиброванные кольца) — цилиндрическое с буртом для крепления, крутящий момент передается шпонкой. Для предупреждения износа и коррозии вал хромирован, а посадочное место под валки и шпонки перед сборкой смазывают маслом. Для осевого крепления калиброванных колец на валах имеются специальные устройства, обеспечивающие надежное и быстрое крепление при большой жесткости конца вала. Наличие одной подвижной подушки, смещенное расположение опор консольных валков и применение безредукторного привода позволяют производить перевалку валков с минимальными затратами времени.

Новый высокоскоростной проволочный стан, разработанный фирмой Моган, установлен на металлургическом заводе в Гамильтоне (Канада). Стан предназначен для прокатки прутков диаметром 12,7—28,5 мм и проволоки диаметром 5,5—12,7 мм.

Стан имеет четыре чистовых блока, в которых ведется прокатка в одну нитку со скоростью 43,2—50 м/сек без кантовки полосы [75]. Каждый из чистовых блоков состоит из группы клетей (рис. 86), валки которых расположены по отношению к го-

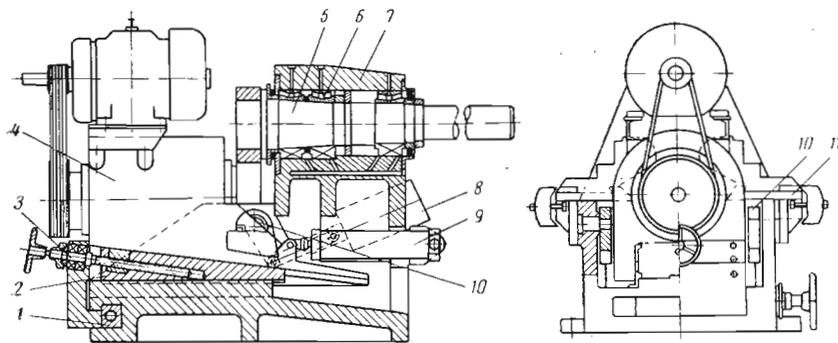


Рис. 85. Прокатная клеть с консольными валками

ление прокатки 147,2 кН (15 Т) и предназначена для чистовых групп мелкосортных станов. Привод рабочих валков не имеет шестеренной клетки и универсальных шпиндельных соединений. Вращение верхнего валка осуществляется асинхронным электродвигателем мощностью 132 кВт, нижнего валка — разгонным электродвигателем мощностью 7,3 кВт.

На рис. 85 показана прокатная клеть с консольными валками 5, на которые надеты калиброванные кольца диаметром 254

ризонту под углом  $45^\circ$ . Смежные клетки блока расположены относительно друг друга под углом  $90^\circ$ .

Консольно установленные валки диаметром 152 мм получают вращение от общего привода, комбинированный редуктор которого смонтирован в одном блоке с рабочими клетями. Неболь-

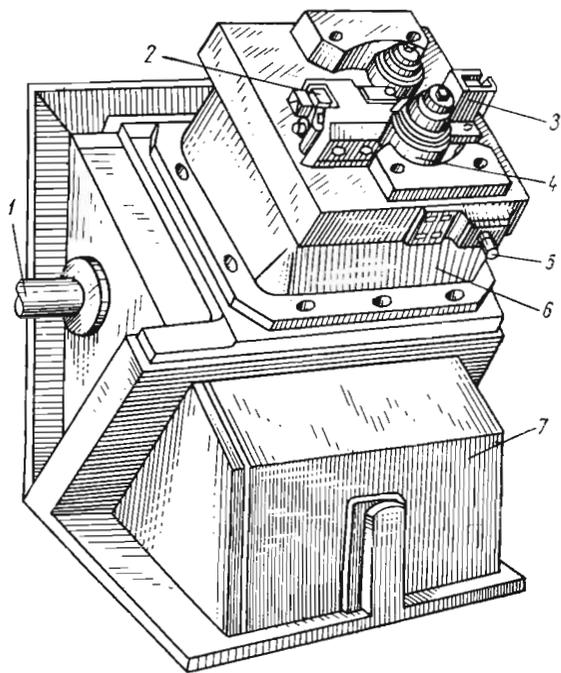


Рис. 86. Прокатная клеть чистой группы высокоскоростного проволочного стана:

1 — приводной вал; 2 — вводная проводка; 3 — выводная проводка; 4 — рабочий валок; 5 — регулировочный винт установочного механизма валков; 6 — корпус клетки; 7 — основание клетки

шее расстояние между клетями позволяет избежать скручивания овала при задаче его в круглый калибр, использовать проводки упрощенной конструкции и увеличить срок их службы.

Рабочий валок представляет собой вал, на который насажено калиброванное кольцо, изготовленное из карбида вольфрама. Регулирование установки валков производят симметрично относительно оси прокатки при помощи эксцентриковых втулок, в которых вращаются валы. Опорами валков служат подшипники скольжения. Комплект валков имеет небольшую массу и снабжен простым устройством для быстрой их переделки. Охлаждение валков производят водой, поступающей через сопла в ручки калиброванных колец.

Незначительная упругая деформация клетей и высокая стойкость валков обеспечивают получение проката точных размеров с качественной поверхностью.

Для прокатки сортовых профилей Челябинским политехническим институтом предложена специальная конструкция многовалковой клетки [15].

Клеть турельного типа (рис. 87) включает опорные приводные валки 9 с короткой бочкой, снабженные турелями 4, которые помещены в станине 10, имеющей нажимное устройство винтового или клинового типа 11.

Вокруг опорных валков по окружности расположены неподвижные рабочие валки 7 меньшего диаметра. Шейки рабочих

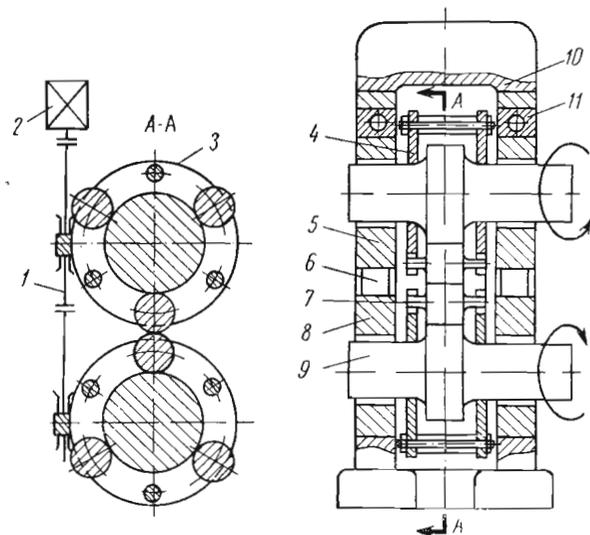


Рис. 87. Многовалковая клеть турельного типа

валков вращаются в подшипниках качения, помещенных в турели 4. Турель может поворачиваться относительно шеек опорных валков. При этом рабочие валки перемещаются по окружности вокруг опорных валков. Турель и рабочие валки фиксированы в осевом направлении относительно опорных валков. Правая и левая щеки турели жестко связаны между собой стержнями 3. При помощи устройства, состоящего из электродвигателя 2 и червячной передачи 1, турели верхнего и нижнего опорных валков поворачиваются синхронно таким образом, что каждая пара рабочих валков встречается в вертикальной плоскости, проходящей через оси опорных валков. В положении прокатки турели фиксируются червячной передачей.

Рабочие валки приводятся во вращение под действием сил трения опорными валками. Когда необходимо сменить пару, рабо-

чих валков (ввиду износа или перехода на новый профиль), турели поворачиваются на угол  $\varphi = \frac{300}{n}$ , где  $n$  — число рабочих валков на окружности. При этом в вертикальной плоскости оказывается новая пара рабочих валков. Изношенные валки в комплекте с подшипниками могут быть заменены, когда они находятся в нерабочем положении.

Подшипники 5 и 8 опорных валков нагружаются клином 6, что приводит к уменьшению зазоров в механизмах установки валков. Осевую регулировку рабочих валков и регулировку их в вертикальной плоскости осуществляют соответствующим перемещением опорных валков так же, как это делается в существующих конструкциях прокатных клетей. Перевалку опорных валков вместе с гурелями производят вдоль оси валков. Клеть турельного типа для точной прокатки обладает следующими особенностями: 1) высокая жесткость клетки за счет применения рабочих и опорных валков с короткой бочкой; 2) неприводные рабочие валки могут иметь малый диаметр. Благодаря этому обстоятельству их можно изготовить из специальных износостойких сталей, термически обработанных.

Некоторое увеличение расстояния между осями опорных валков позволяет установить их на крупногабаритных подшипниках качения или жидкостного трения. Смена рабочих валков может быть автоматизирована и производится очень быстро.

Применение рабочих валков малого диаметра создает благоприятные условия для деформации металла, а именно уменьшается уширение и повышается вытяжка. Последнее обстоятельство имеет большое значение для проволочных станов, так как появляется возможность прокатывать проволоку меньших диаметров.

Клеть гурельного типа целесообразно применять в качестве чистовой или калибрующей клетки для прокатки полосовой, мелкосортной стали и проволоки.

Рассмотренные конструкции новых ненапряженных клетей отличаются от обычных меньшими габаритами, компактным исполнением отдельных узлов, короткими рабочими валками и более высокой жесткостью.

## Глава VI

### ПРИМЕНЕНИЕ ЖЕСТКИХ КЛЕТЕЙ

#### ЛИНЕЙНЫЕ ПРОВОЛОЧНЫЕ СТАНЫ

Основную долю упругой деформации отделочных клетей проволочных станов составляет прогиб валков, длина бочки которых равна 750—950 мм. Однако сократить длину валков действующих станов нежелательно, поскольку это приведет к уменьшению числа одновременно прокатываемых ниток и снижению производительности. Упругая деформация клетей может быть уменьшена только за счет устранения промежуточных деталей и применения рациональных конструкций подушек, станин, установочных механизмов, а также подшипников качения или жидкостного трения.

Выбор типа клетей ограничен необходимостью использования имеющегося привода чистовых линий станов, сохранения длины бочки рабочих валков, установки новых клетей вместо существующих без переделки фундаментов, петлевых карманов, обводных аппаратов и моталок.

Для проверки возможности получения точных размеров профиля при многониточной прокатке была разработана и изготовлена предчистовая клеть для проволочного стана 260. Клеть имела валки диаметром 270 мм с длиной бочки 750 мм, станины закрытого типа и клиновое установочное устройство. Опорами валков служили сферические роликовые подшипники размером 140×240×80 мм по одному на шейку валка. Вращение валкам передавалось универсальными шпинделями от существующих клетей чистовой линии.

Для проверки жесткости конструкции, надежности в работе отдельных узлов и получения данных, необходимых при замене устаревших клетей сортовых станов более жесткими проводили опытную прокатку на проволочном стане 260 завода им. Петровского. Опытную прокатку в предчистовой клетке вели при полной загрузке стана в течение двух смен при 960—1040°C. Во время работы было установлено наблюдение за состоянием подшипников, универсальных шпинделей, установочных и регулирующих устройств.

Катанку номинальным размером 6,5 мм прокатывали в одну—пять ниток. Темплеты, отрезанные от переднего и заднего концов бунта, сопоставляли с темплетами, полученными при прокатке в старой клетке. Результаты замеров показали, что высота овала и в том, и в другом случаях увеличивается к концу полосы. Изменения высоты овала в новой клетке составляли в среднем 0,05 мм против 0,1 мм в старой клетке.

Незначительные колебания размеров овала по длине полосы дают возможность вести прокатку без подстройки валков в течение длительного времени. Колебания высоты готового профиля будут значительно меньше, если установить жесткую чистовую клетку, так как давление металла на валки при прокатке круга в 4—6 раз ниже, чем при прокатке овала. Следует учесть, что в случае длительной работы клетки и достаточной приработке ее элементов можно ожидать уменьшения контактных упругих деформаций деталей, а следовательно, и меньших колебаний размеров овала по высоте.

Влияние места расположения калибра на бочке на изменение высоты полосы свидетельствует о заметном прогибе рабочих валков. Действительно, прогиб валков диаметром 270 мм и длиной бочки 750 мм составляет большую часть деформации новой клетки и достигает 68%. Следовательно, жесткость клетки может быть значительно повышена при некотором оптимальном сокращении длины бочки рабочих валков.

Весьма небольшие расстояния между торцами валков (~ 400 мм) чистовой линии стана 260 затрудняют установку новой клетки и универсальных шпиндельных соединений. Постоянная вибрация коротких шпинделей и действие значительных радиальных и осевых усилий приводят к перегрузке и смещению подшипников вдоль шейки валка.

Сферические роликовые подшипники размером 140×240×80 мм не обеспечивают длительной работы клетки при нагрузках на шейку валка 147—196 кн (15—20 Т) и  $n=500-600$  об/мин. Установка стандартных подшипников качения аналогичного типа с более высоким коэффициентом работоспособности ограничена габаритами подшипников. Для отделочных клеток проволочных линейных станов необходимо использовать малогабаритные роликовые цилиндрические подшипники в комбинации с упорными подшипниками, воспринимающими осевое усилие.

Опытная проверка новой клетки и исследования точности проката показали, что простая замена существующих клеток линейных станов более жесткими без частичной реконструкции чистовых линий не решает задачи по улучшению качества продукции при многониточной прокатке [76].

Чистовые линии проволочных станов должны быть реконструированы с таким расчетом, чтобы в каждой чистовой и предчистовой клетках прокатывалось две—три нитки катанки. Рабо-

чие валки жестких чистовых и предчистовых клеток должны иметь длину 350—450 мм. При частичной реконструкции обычно используется значительная часть основного и вспомогательного оборудования. Работы по установке жестких клеток могут быть выполнены во время капитального ремонта стана.

На рис. 88 схематически представлены варианты частичной реконструкции чистовой линии проволочного стана.

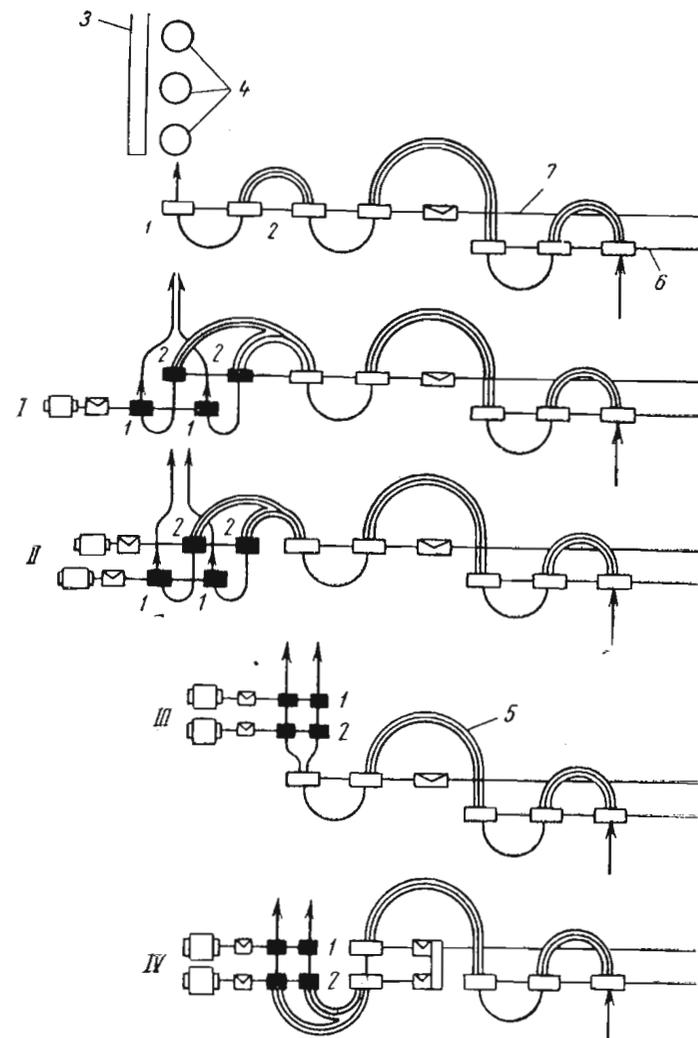


Рис. 88. Расположение оборудования при установке жестких клеток на чистовой линии проволочного стана:  
1 — чистовая клетка; 2 — предчистовая клетка; 3 — пластинчатый транспортер; 4 — моталки; 5 — обводной аппарат; 6 — предчистовая линия; 7 — чистовая линия (существующая)

*Вариант I* предусматривает установку двух чистовых клетей в отдельную линию с самостоятельным приводом, состоящим из электродвигателя и шестеренной клетки. Две предчистовые клетки помещают на существующие плитовины с использованием имеющегося привода. Применение коротких рабочих валков позволяет увеличить расстояние между клетями, что необходимо для установки универсальных шпинделей. Уменьшение угла наклона верхнего шпинделя к оси валка создает благоприятные условия для устойчивой работы стана без ударных нагрузок. Универсальные шпиндели уменьшают вибрацию в линии передачи, при этом появляется возможность использовать для жестких клетей подшипники качения и жидкостного трения. Расположение чистовых клетей в отдельную линию позволит регулировать длину петли предчистового овала, уменьшить охлаждение металла и улучшить качество катанки.

*Вариант II* предполагает установку двух чистовых и двух предчистовых клетей в отдельные линии с самостоятельными приводами, включающими электродвигатели и шестеренчатые клетки. Такое расположение дает возможность регулировать петли предчистовых квадрата и овала, увеличить скорость прокатки и повысить производительность стана.

В вариантах III и IV жесткие клетки расположены непрерывными группами. Это позволит полностью механизировать трудоемкие операции на чистовой линии, повысить скорость прокатки и сократить затраты времени на перевалку валков. Независимая установка жестких клетей и механизация трудоемких операций обеспечат ритмичную работу проволочного стана и позволят получать катанку точных размеров.

Из приведенных схем расположения оборудования чистовой линии наиболее рациональными являются схемы вариантов III и IV. При частичной реконструкции стана в качестве чистовых и предчистовых клетей могут быть использованы предварительно напряженные и ненапряженные клетки с рычажными, эксцентриковым, винтовыми установочными механизмами. В связи тем, что в каждой рабочей клетке прокатывают не более трех ниток катанки, а давление на шейку валка не превышает 98 кН (10 Т), то в качестве опор валков вполне возможно использование подшипников качения и жидкостного трения различных типов.

При самоустанавливающимися подушками рационально применять малогабаритные роликовые подшипники, например размером  $160 \times 240 \times 32$  мм, в комбинации с упорными шарикоподшипниками, воспринимающими осевые нагрузки. На каждую шейку валка может быть установлено по два роликовых и одному шариковому подшипнику.

Ниже приведен поверочный расчет на долговечность подшипниковых опор чистовой клетки при давлении металла на валки  $P = 98$  кН (10 Т) и  $n = 630$  об/мин.

Коэффициент работоспособности роликового подшипника размером  $160 \times 240 \times 32$  мм определяем по выражению [41]

$$c = 80 z^{0.7} d_p l_p, \quad (209)$$

где  $z$  — число роликов в подшипнике;  
 $d_p$  и  $l_p$  — диаметр и длина ролика соответственно;

$$c = 80 \cdot 24^{0.7} \cdot 19 \cdot 19 = 265\,000.$$

Условная нагрузка на подшипник

$$Q = R k_k k_\delta k_\tau, \quad (210)$$

где  $R$  — радиальная нагрузка;  
 $k_k, k_\delta, k_\tau$  — коэффициенты, учитывающие влияние характера и величины нагрузок, температурного режима, а также влияние вращения наружного или внутреннего кольца на срок службы подшипника;

$$Q = 5000 \cdot 1,3 \cdot 1,1 = 7150 \text{ кг.}$$

Требуемый коэффициент работоспособности найдем по формуле

$$c = Q(nh)^{0.3}, \quad (211)$$

где  $n$  — число оборотов в минуту;  
 $h$  — долговечность подшипника, ч.

Подставляя в формулу (211) значение  $Q = 7150$  кг,  $n = 630$  об/мин и  $h = 2500$  ч, получим  $c = 7150(630 \cdot 2500)^{0.3} = 520\,000$ .

Следовательно, на каждой шейке валка необходимо установить по два роликовых подшипника размером  $160 \times 240 \times 32$  мм.

В качестве упорных подшипников, воспринимающих только осевые усилия, могут быть установлены радиальные однорядные шарикоподшипники с коэффициентом работоспособности  $c = 200\,000 - 300\,000$  и допускаемой статической нагрузкой 118—157 кН (12—16 Т). Такие подшипники воспринимают в осевом направлении около 70% неиспользованной радиальной нагрузки.

Реальная возможность повышения точности размеров проката на действующих проволочных станах состоит в частичной реконструкции чистовых линий с применением более жестких клетей.

#### ЛИНЕЙНЫЕ СОРТОВЫЕ СТАНЫ

Целесообразность модернизации линейных сортовых станов подтверждается эффективностью производства экономичных профилей проката. Так, например, сравнительные данные работы сортовых станов металлургического завода им. Дзержинского свидетельствует о том, что с переходом на прокатку экономичных швеллеров и уголков производительность станов 500, 330 и 280 повысилась на 3—7%, а выход первого сорта составил 98,5—

99,5%. Расход металла на стане 500 снизился при прокатке швеллера № 8 на 10—18 кг/т и при прокатке уголков — на 3—5 кг/т. Расходы по переделу не увеличились, а себестоимость экономичных профилей снизилась примерно на 2—11% [90].

Особый интерес представляет замена устаревших клетей линейных станов более жесткими без их реконструкции. Трудности такой замены обусловлены наличием общего привода чистовых линий, отсутствием малогабаритных подшипников требуемой грузоподъемности и сравнительно небольшими расстояниями между клетями.

Из выпускаемых отечественной промышленностью подшипников качения для опор рабочих валков наиболее приемлемые радиально-сферические. Самоустановление этих подшипников компенсирует прогиб валка, а их небольшая ширина позволяет сохранить габариты клетки неизменными. Однако низкая грузоподъемность радиально-сферических подшипников ограничивает их применение на сортовых станах.

В табл. 26 представлены расчетные данные продолжительности работы некоторых подшипников на различных станах. Расчеты выполнены при условии, что на каждой шейке валка установлено по одному радиально-сферическому подшипнику, воспринимающему только радиальную нагрузку.

Таблица 26

Продолжительность работы радиально-сферических подшипников

Стан	Валки		Давление на валки		Подшипники		Условная нагрузка на подшипник	
	Диаметр, мм	число оборотов в минуту	кн	Т	размер, мм	долговечность, ч	кн	Т
Мелкосортный 250 . . . . .	250—280	450	127,5	13	140×240×80	450	186,0	19
Проволочный 260 . . . . .	260—310	630	147,0	15	140×240×80	200	215,8	22
То же . . . . .	260—310	630	147,0	15	150×270×73	250	215,8	22
Мелкосортный 280 . . . . .	285—340	400	196,0	20	160×265×84	350	284,5	29
То же . . . . .	285—340	400	196,0	20	150×270×73	160	284,5	29
Мелкосортный 330 . . . . .	350—390	320	294,0	30	180×320×86	200	421,8	43
Мелкосортный 360 . . . . .	360—390	210	392,4	40	190×340×92	150	559,0	57
Среднесортный 500 . . . . .	480—570	125	539,5	55	260×440×144	750	775,0	79

Из приведенных данных следует, что выпускаемые самоустанавливающиеся подшипники не могут обеспечить длительной работы чистовых и предчистовых клетей. Такие подшипники не-

пригодны для линейных станов, валки которых имеют сравнительно небольшие диаметры. Для жестких клетей должны быть разработаны и освоены малогабаритные подшипники качения новых типоразмеров, воспринимающие значительные радиальные и осевые нагрузки. Таким образом, применение на линейных станах жестких клетей с предварительно сжатыми или несамостоятельными подушками сдерживается отсутствием ролико-сферических подшипников требуемых характеристик.

Замена устаревших клетей новыми ограничена также небольшими расстояниями между ними, которые не позволяют использовать универсальные шпиндельные соединения. Так, расстояние между торцами валков чистовых и предчистовых клетей мелкосортных станов составляет 500—600 мм. При установке опор качения или жидкостного трения это расстояние сокращается, поэтому конструктивно невозможно выполнить шпиндельное соединение, надежное в работе и удобное в обслуживании. При установке новых клетей необходимо либо увеличить расстояние между ними, либо расположить их так, чтобы была возможность применить отдельные приводы.

Недостаточная жесткость чистовых и предчистовых клетей линейных сортовых станов затрудняет получение проката по суженным допускам. Кроме того, ограниченное число калибров чистовых валков не позволяет вести прокатку в две нитки. Так же, как и на линейных проволочных станах, простая замена существующих клетей жесткими без частичной реконструкции чистовых линий не решает задачи получения сортовых профилей точных размеров. Чистовые линии сортовых станов должны быть реконструированы с таким расчетом, чтобы обеспечить получение простых и фасонных профилей точных размеров при одновременной прокатке двух ниток. Затраты на установку новых клетей должны быть минимальными.

На рис. 89 представлены варианты реконструкции чистовой линии мелкосортного стана при установке жестких клетей, обеспечивающие получение простых и сложных профилей точных размеров, а также прокатку в две нитки.

*Вариант I* предусматривает установку двух жестких клетей с использованием имеющегося привода для чистовой клетки. Чистовая клеть может быть установлена на существующих плитах. Дополнительная клеть имеет самостоятельный привод и служит для калибровки полос и тонкостенных профилей. Прокатку в жестких клетях ведут в одну нитку.

*Вариант II* предполагает самостоятельный привод двух жестких чистовых клетей. Вращение валков предчистовой жесткой клетки осуществляется имеющимся приводом. Отдельный привод чистовых клетей обеспечивает регулировку длины петли, что уменьшает перепад температур переднего и заднего концов раската. Наличие двух чистовых клетей позволит вести прокатку сортовых профилей в две нитки.

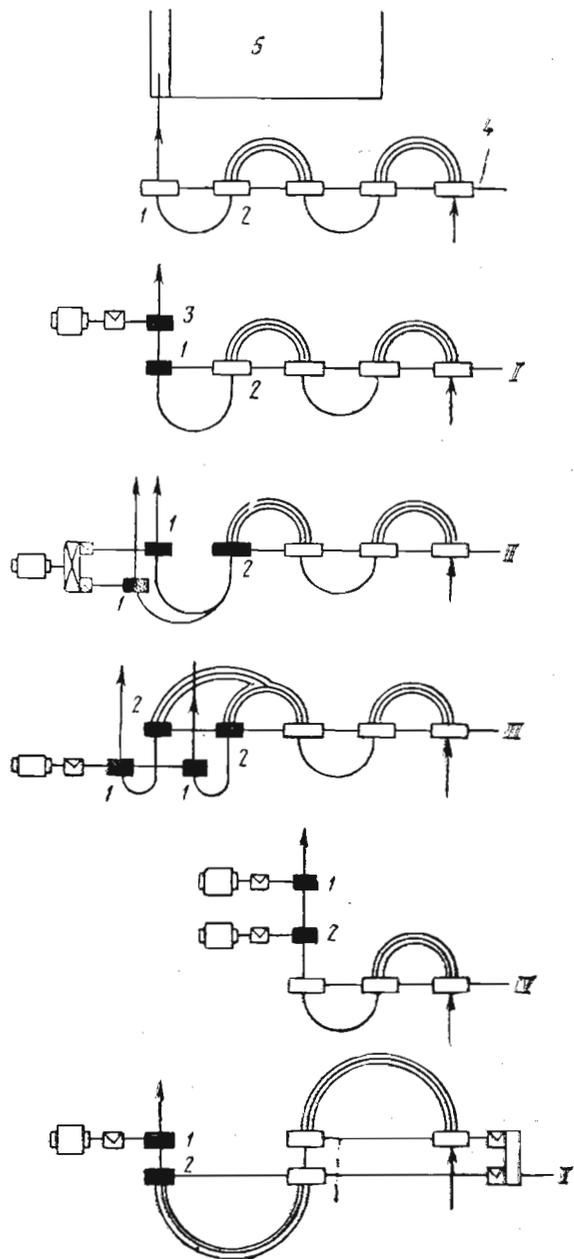


Рис. 89. Расположение оборудования при установке жестких клеток на чистой линии мелкосортного стана:  
 1 — чистовая клетка; 2 — предчистовая клетка; 3 — дополнительная чистовая клетка; 4 — чистовая линия (существующая); 5 — холодильник

По варианту III чистовые клетки образуют отдельную линию с самостоятельным приводом, состоящим из электродвигателя и шестеренной клетки. Две предчистовые клетки расположены вдоль существующей линии стана. Вращение рабочих валков предчистовых клеток осуществляется от имеющегося привода. Эта схема расположения оборудования позволяет получить точные размеры профиля при двухниточной прокатке.

Расположение чистовых и предчистовых клеток непрерывными группами предусмотрено вариантами IV и V. Целесообразность такого расположения подтверждает практика металлургического завода им. Коминтерна, на котором мелкосортный стан 260 реконструирован по варианту V.

При реконструкции стана 260 механизировали передачу раската из одной непрерывной группы в другую установкой обводных аппаратов. Для обеспечения требуемой величины межклетевого натяжения полосы и возможности прокатки всего сортамента стана (круглых, квадратных и оконорманных профилей) усовершенствовали калибровку валков. Реализация отмеченных мероприятий, как показал трехлетний опыт, позволила значительно улучшить технико-экономические показатели работы стана и повысить сортность проката. В результате реконструкции объем производства увеличился на 38%, скорость прокатки возросла в 1,5 раза, расходы по переделу сократились на 17% и уменьшились простои стана.

В качестве чистовой и предчистовой клеток на стане 260 будут применены жесткие качающиеся клетки, обеспечивающие контроль межклетевого натяжения металла и получение проката точных размеров.

Для улучшения условий производства экономичных профилей необходимо модернизировать и существующие среднесортные линейные станы. Например, в чистовых клетях трио стана 500 завода им. Дзержинского, стана 550 Енакиевского металлургического завода и других длина бочки рабочих валков равна 1400—1600 мм, что резко снижает жесткость клеток и затрудняет прокатку экономичных профилей. Конструкция чистовой клетки этих станов не позволяет применить современные подшипники качения или жидкостного трения. На станах подобного типа целесообразно установить дополнительно новые двухвалковые клетки с короткими рабочими валками, современными подшипниками и универсальными шпиндельными соединениями. Чистовые клетки должны быть оснащены роликовой проводковой арматурой, обеспечивающей легкую задачу раската в валки и надежную его фиксацию в требуемом положении. Роликовая арматура имеет большую стойкость по сравнению с обычной арматурой и гарантирует лучшее качество поверхности проката.

На рис. 90 представлены варианты установки новых клеток при частичной реконструкции чистовой линии среднесортного стана.

*Вариант I* предусматривает установку жесткой клетки дуо 4, расположенной после существующей чистовой клетки 3. Новая клетка снабжена отдельным приводом, состоящим из шестеренной клетки и электродвигателя с регулируемым числом оборотов. Установка дополнительной клетки позволит рационально распре-

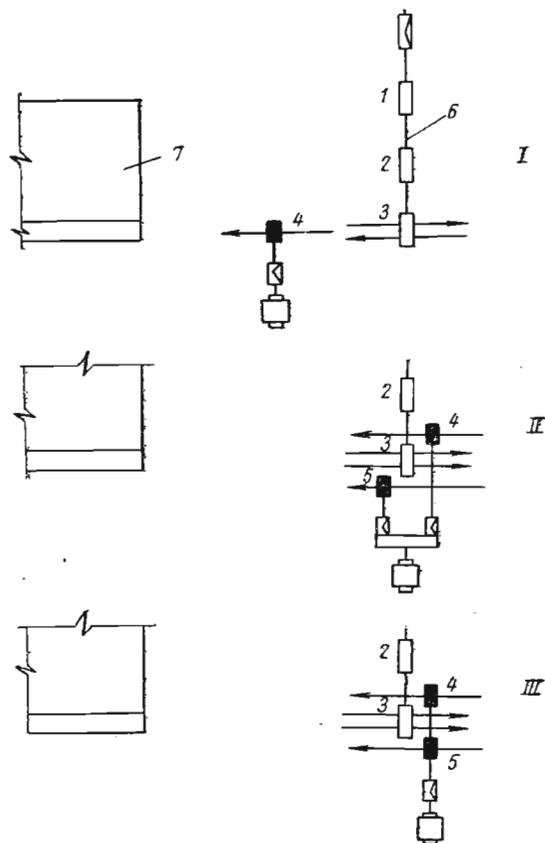


Рис. 90. Расположение оборудования при установке жестких клеток на чистовой линии средне-сортового стана:

1—3— существующие клетки; 4 и 5— дополнительные чистовые клетки; 6— чистовая линия (существующая); 7— холодильник

лить обжатия по проходам в существующей чистовой клетки, получить равномерную по длине толщину профиля и повысить его точность.

По варианту II требуется установить дополнительно две жестких клетки 4 и 5 с отдельным приводом. Существующая чистовая клетка трио 3 работает как клетка дуо, прокатка в ней ведется

в одном направлении, что позволяет увеличить пропускную способность чистовой линии стана.

*Вариант III* предусматривает установку двух новых клеток 4 и 5 в одну линию с регулируемым приводом, состоящим из электродвигателя и шестеренной клетки. Расположение клеток по варианту III более рационально по сравнению с вариантом II, так как отпадает необходимость в редукторе и упрощается обслуживание стана.

Частичная реконструкция чистовых линий с применением более жестких клеток может быть осуществлена без длительной остановки станом. Реализация этого важного мероприятия позволит получить экономичные профили с толщиной стенки 2—3 мм, повысить точность размеров проката и значительно увеличить его выпуск для народного хозяйства страны.

Необходимость реконструкции чистовых линий для установки жестких клеток подтверждается работой мелкосортных станом 250 и 350 Донецкого металлургического завода. Чистовые и предчистовые клетки этих станом при прокатке сортовых профилей повышенной точности заменяют напряженными клетями с предварительно сжатыми подушками. Установка новых клеток вместо старых с использованием имеющегося привода значительно затрудняет их эксплуатацию. Для монтажа новых чистовой и предчистовой клеток на стане (установка, крепление к плитовинам, соединение универсальных шпинделей) требуется не менее трех часов. Установку же старой клетки или перевалку валков непосредственно на стане осуществляют в течение 30—40 мин.

Ограниченность места, частые перевалки и необходимость использования существующего привода снижают эффективность применения жестких клеток на действующих сортовых станом. Установка жестких клеток в случае реконструкции чистовой линии позволяет устранить трудоемкие операции при обслуживании стана и повысить его производительность.

На ряде станом при многониточной прокатке сортовых профилей не исключена возможность применения клетей кварто с диаметром рабочих валков в два—три раза меньше диаметра валков клетей дуо. В клетях кварто можно увеличить вытяжку, снизить усилие прокатки, уменьшить уширение металла и в значительной мере повысить точность проката.

Использование клетей кварто в качестве чистовых и предчистовых для сортовых станом ограничено величиной их упругой деформации, основную часть которой составляет упругое сплюсывание валков. В клетях кварто рабочие валки должны соприкасаться с опорными не по всей длине бочки, как в листопрокатных клетях, а только небольшими участками. Часть бочки, на которой нарезаны ручьи, не имеет опоры. Расчеты показывают, что клетка дуо, имеющая относительно короткие валки, жестче клетки кварто. Однако, когда отношение длины бочки к диаметру

превышает определенную величину, клеть дуо уступает по жесткости клетки кварто и последняя может быть использована в качестве чистой при многониточной прокатке.

Как отмечалось ранее, точность прокатки повышается при равномерном нагреве полос, рациональной форме отделочных калибров и меньшем износе валков.

Исследования, проведенные на сортовых станах 300 Магнитогорского металлургического комбината при прокатке круглой

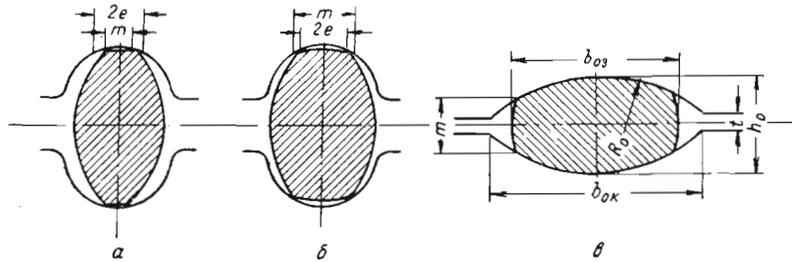


Рис. 91. Схема прокатки в круглом калибре овалных полос:

*a* — форма овала, не обеспечивающая центрирование полосы; *b* — форма овала обеспечивающая центрирование полосы; *в* — основные размеры овального калибра

стали диаметром 20—48 мм, показали, что на точность размеров готового профиля существенное влияние оказывает система калибровки валков [77]. На указанных станах отношение длины бочки к диаметру валка составляет 2,3—2,5, а пружина чистовых клетей достигает 1,5—2,5 мм.

По старой калибровке в последних трех чистовых клетях обжатия были сравнительно большими, что вызывало появление значительных крутильных колебаний в системе привода. Необходимые вытяжки в чистовом и предчистовом калибрах достигались применением весьма вытянутых овалов. Такие овалы плохо центрировались в чистовом круглом калибре, а готовый профиль получался несимметричным по длине раската относительно вертикальной оси. Холодные кромки вытянутых овалов способствовали быстрому и неравномерному изнашиванию чистового калибра. Под действием большой неравномерности деформации по ширине полосы быстро выходили из строя предчистовые калибры.

Для прокатки круглой стали повышенной точности на шести последних клетях стана 300 применили калибровку типа овал—круг, которая обеспечила достаточно большие вытяжки и равномерную деформацию металла по ширине полосы. Предчистовые однорядные овалы были выгнуты с увеличенной кривизной поверхности. На клетях установили роликовые вводные проводки для задачи овальной полосы в круглый калибр. Для лучшей центровки полосы в круглом калибре овалы изготовили с притупленными боковыми кромками (рис. 91). Величину притупле-

ния *m* выбирали с таким расчетом, чтобы при входе в круглый калибр полоса касалась его стенок в точках, расстояние между которыми превышает удвоенную величину смещения *e* овальной полосы по горизонтали, т. е.  $m > 2e$ .

Размеры круглых калибров рассчитывали с учетом допусков на данный размер круглой стали и температурной усадки профиля. Все круглые калибры были выполнены одним радиусом. Для повышения стойкости чистового калибра его диаметр плавно уменьшали на 0,3—0,4 мм в местах касания с овальной полосой при захвате.

Расчет предчистового овального калибра (см. рис. 91, *в*) производили с учетом размеров овальной полосы. Ширину овала находили из выражения

$$b_{o.з} = d + \Delta h_k, \quad (212)$$

где *d* — диаметр круглого калибра;  
 $\Delta h_k$  — абсолютное обжатие в чистовом круглом калибре.  
 Толщина овала

$$h_o = d - \Delta b_k, \quad (213)$$

где  $\Delta b_k$  — уширение овальной полосы в круглом калибре. Радиус овала определяли по математическим таблицам в зависимости от отношения высоты стрелы  $0,5(h_o - m)$  к хорде  $b_{o.з}$ . Ширину овального калибра находили по формуле

$$b_{o.к} = 2 \sqrt{(h_o - t) [R_o - 0,25(h_o - t)]}, \quad (214)$$

где *t* — зазор между валками;

*R<sub>o</sub>* — радиус овального калибра.

Внедрение новой калибровки с незаполнением овальных калибров и уменьшением обжатий в последних трех чистовых клетях дало возможность увеличить в два раза стойкость рабочих валков и получить круглую сталь с отклонениями по диаметру  $\pm 0,2$  мм.

#### ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ПРОКАТА НА НЕПРЕРЫВНЫХ СТАНАХ

На сортовых и проволочных станах с непрерывным расположением клетей скорости прокатки в два—три раза выше, чем на станах с линейным расположением клетей. Это позволяет уменьшить потери тепла прокатываемых полос, а следовательно, и колебания давления металла на валки.

Так, на линейном мелкосортном стане 260 при прокатке круглой стали диаметром 14 мм перепад температуры между передним и задним концами раската составляет 60—90 град, что приводит к повышению давления металла на валки чистовой клетки на 15—30%. При прокатке этого же профиля на непрерывном стане 250 перепад температуры раската, имеющего большую

длину, составляет 20—40 град. Точность прокатки на непрерывных станах в значительной мере зависит от величины межклетевого натяжения полосы.

При высоких скоростях прокатки в чистовых группах клетей проволочных станов (табл. 27) и незначительных поперечных сечениях раскатов регулирование величины натяжения или петли имеет первостепенное значение. Это положение подтверждается исследованиями параметров прокатки на ряде непрерывных проволочных станов [47, 78]. В табл. 28 приведены данные экспериментальных замеров при прокатке с натяжением в чистовой группе клетей непрерывного проволочного стана 250-2 Магнитогорского металлургического комбината.

Исследования показали, что геометрические размеры профиля определяются условиями прокатки в чистовой группе стана. Основным фактором, влияющим на получение качественного профиля, является заднее натяжение полосы в чистовой клети, колебание которого приводит к изменению заполнения чистового круглого калибра металлом и к колебаниям размеров катанки по длине раската. Следовательно, для получения качественного готового профиля прокатку в чистовой группе клетей следует вести при определенной величине удельного заднего натяжения. Необходимая величина этого натяжения зависит от геометрических соотношений между размерами свального калибра и готового профиля, а также от соотношения между числом оборотов валков предчистовой и чистовой клетей стана.

На проволочном стане 250-2 ММК имеется четыре чистовые группы, каждая из которых состоит из двух рабочих клетей. Предчистовая клеть выполнена с вертикальным, а чистовая — с горизонтальным расположением валков. Валки снабжены индивидуальным безредукторным приводом от двигателей постоянного тока с независимым возбуждением. Это упрощает конструкцию клетей и облегчает наладку чистовой группы стана. Требуемое соотношение скоростей валков легко установить регулированием скорости приводных двигателей. Величина петли перед клетями чистовой группы регулируется автоматически с помощью фотоэлементов. Если величина петли больше допустимой, то автоматически увеличиваются обороты валков предчистовой и чистовой клетей, а также трайб-аппарата моталок, и наоборот.

Заслуживает внимания опыт работы металлургического завода «Криворожсталь» по автоматизации петлерегулирования на непрерывных проволочных станах 250-1 и 250-2. Регулирование петли осуществляется на однониточных петлевых столах перед чистовыми группами клетей с помощью бесконтактных датчиков и статических устройств преобразования сигналов. Внедрение системы регулирования петли упростило настройку стана, облегчило труд операторов и значительно снизило брак катанки [79].

Система автоматического регулирования петли конструктивно состоит из двух устройств: датчика петли, установленного на

Таблица 27

Техническая характеристика чистовых групп клетей непрерывных проволочных станов

Стан	Завод	Число групп	Число клетей в группе	Диаметр валка, мм		Мощность двигателей, кВт	Число оборотов в минуту	Скорость прокатки, м/сек	Диаметр катанки, мм
				вертикального	горизонтального				
250-1 и 250-2	Криворожский Макеевский	4	4	270	270	4 × 200	500/1500	28	6—8
		2	6	—	240—270	1 × 1472	500/1000	23	6—8
		4	4	270	270	4 × 200	550/1500	28	6—8
250-2	Магнитогорский	4	2	260	260	88; 130	800/1600 1400/2000	26	6—8
250	Череповецкий	4	4	255—280	255—280	4 × 275	800/1600	32	5—10
280	»	4	6	260—280	260—280	6 × 175	745/2240	32	5—10
250	Енаклеевский	4	4	250	250	4 × 158/450	700/3900	40—45	6—10
250-1	Западно-Сибирский	4	4	250	250	4 × 158/450	700/3900	40	5—10

Таблица 28

Результаты экспериментальных замеров при прокатке катанки на стане 250-2 [78]

Размер овала, мм	Диаметр круга, мм		Удельное натяжение		Относительное обжатие в клетях, %		Температура прокатки, °С	
	высота	ширина	вертикальный	горизонтальный	Мн/мм <sup>2</sup>	кг/мм <sup>2</sup>		предчистовой
5,08	11,46	6,70	6,18—6,48	2,95—17,7	0,3—1,8	18,6—21,2	1073—1100	33,1—35,2
5,25	11,28	6,64	6,04—6,50	21,6—44,1	2,2—4,5	19,5—19,8	1039—1071	32,0—33,3
5,32	11,21	6,68	5,70—6,44	33,4—75,5	3,4—7,7	18,3—19,6	1040—1070	32,0—34,7
5,33	10,96	6,67	6,20—6,48	11,7—40,2	1,2—4,1	13,3—16,1	1000—1076	29,3—33,6
5,53	10,26	6,64	5,70—6,25	23,6—63,8	2,4—6,5	1,9—9,0	998—1068	30,6—34,0

однониточном петлевом столе, и регулятора петли, находящегося на посту управления. Принцип действия системы регулирования показан на рис. 92.

Датчик петли 2 состоит из десяти фоторезисторов, чувствительных к красной и близкой к ней инфракрасной области спектра излучения прокатываемого металла. Такое число фоторезисторов применяют для обеспечения достаточной точности и надежности работы схемы. Они заключены в специальные оптические устройства, фиксирующие энергию излучения на поверхности чувствительных элементов фоторезисторов и позволяющие

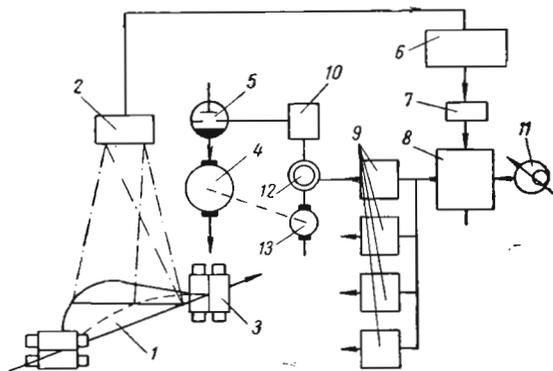


Рис. 92. Блок-схема автоматического регулирования петли перед чистой группой клетей

производить настройку полей зрения каждого из них в пределах петлевого стола 1.

Сигналы фоторезисторов, несущие информацию о положении петли металла на раскатном поле петлевого стола, поступают в блок формирования сигналов 6, состоящего из десяти триггеров, собранных на двойных триодах. Здесь сигналы преобразуются и усиливаются так, что на выходах триггеров они становятся независимыми от температуры металла и окружающей среды.

Сформированные сигналы суммируются на общем сопротивлении в блоке суммирования сигналов 7 и сравниваются с заданным напряжением.

Результующее напряжение отражает положение петли металла на раскатном поле стола (отклонение от натянутого состояния). Оно создает ток в обмотке управления магнитного усилителя 8, собранного по трехфазной схеме с внутренней положительной обратной связью и выходом на переменном токе. После магнитного усилителя сигнал поступает в четыре трансформатора 9, выпрямленное вторичное напряжение которых является

эталонным для регуляторов скорости 10 электродвигателей чистовых клетей. Магнитный усилитель питается от потенциал-регулятора 11, посредством которого при необходимости можно осуществлять ручное управление.

Таким образом, эталонное напряжение регуляторов скорости соответствующей группы чистовых клетей изменяется в функции от положения петли металла на петлевом столе.

В устройстве сравнения 12 оно сопоставляется с напряжением тахогенератора 13, который механически связан с прокатным двигателем 4, питающимся от управляемого ртутного выпрямителя 5. Уровень эталонного напряжения устанавливается при настройке стана оператором и корректируется при существенных изменениях технологических условий. Изменение эталонного напряжения воздействует на скорости вращения прокатных двигателей всех клетей чистовой группы одновременно. Поэтому при плавном регулировании петли соотношение скоростей вращения и величины натяжений в межклетевых промежутках чистовой группы практически остаются неизменными.

В момент входа металла в первую чистовую клеть 3 его скорость движения в желобе петлевого стола ниже линейной скорости валков этой клетки. Поэтому раскат извлекается из желоба и натягивается. В это время его скорость становится на 7—10% выше соответствующей условиям свободной прокатки; величина скорости металла видна по потенциал-регулятору.

При появлении натянутого раската в поле зрения датчика петли одновременно засвечиваются все десять фоторезисторов. При этом на выходе блока суммирования развивается максимальное напряжение, что вызывает соответствующее понижение эталонного напряжения. Прокатные двигатели снижают скорость вращения и начинается образование петли. По мере увеличения петли фоторезисторы последовательно один за другим теряют засвечивание, при этом эталонное напряжение частично восстанавливается. Этот процесс продолжается до тех пор, пока величина петли не будет равна заданной. Задание регулируется уровнем выходного напряжения блока суммирования и зависит от конкретных условий прокатки. Любое отклонение величины петли в процессе прокатки от заданной приводит к изменению числа засвеченных фоторезисторов и соответственно изменяет скорость вращения двигателей чистовых клетей.

В конце цикла прокатки по мере выхода заднего конца раската из предшествующих клетей петля перед чистовыми клетями постепенно растет. Это вызывает уменьшение общего количества засвеченных фоторезисторов и увеличение скоростей вращения двигателей чистовых клетей, что ведет к ограничению роста петли. При уходе раската с петлевого стола все фоторезисторы теряют засвечивание и скорость вращения двигателей вновь увеличивается на 7—10%, что служит сигналом приема нового раската. Далее цикл регулирования повторяется.

Процесс автоматического регулирования происходит плавно, в полном соответствии с требуемыми условиями.

При производстве катанки на непрерывных проволочных станах образуется значительное количество поверхностной окалины. На метизных заводах при травлении катанки потери металла в окалину составляют 3—3,5%. Для катанки, полученной на линейных станах, потери при травлении составляют около 1,5% первоначальной массы металла.

Повышенное количество окалины на непрерывных станах образуется ввиду более высокой температуры прокатки (1000—1100°C) по сравнению с линейными станами (850—900°C) и большой массы бунтов. Под влиянием этих факторов увеличивается время охлаждения бунтов и тем самым создаются более благоприятные условия для окалинообразования. Охлаждение катанки до 600°C, когда значительно замедляется процесс окалинообразования, происходит на непрерывных станах в течение 30 мин, а на линейных станах 15 мин, т. е. в два раза быстрее. Основные потери металла в окалину наблюдаются при сматывании бунта и его дальнейшем охлаждении на транспортере. Максимальное количество окалины образуется в центре бунта (до 40 кг/т), минимальное — на поверхности бунта (до 20 кг/т). Такое неравномерное распределение окалины по сечению бунта происходит вследствие более медленного охлаждения катанки внутри бунта.

Окалинообразование вызывает большие потери времени, металла и серной кислоты при травлении катанки на метизных заводах. Кроме того, различие в количестве окалины на наружных и средних витках бунта приводит к тому, что бунты выдерживают в травильных ваннах до полного стравливания окалины со средних витков. Поэтому с наружных витков, уже освободившихся от окалины, удаляется некоторое количество неокисленного металла, что создает неустойчивый режим работы волочильных станов. Попытки сократить продолжительность травления приводят к тому, что на отдельных центральных витках бунта остается слой окалины, который усложняет процесс волочения и уменьшает срок службы волочильного инструмента.

В связи с увеличением производства катанки на непрерывных проволочных станах уменьшение окалинообразования становится важной проблемой в борьбе за экономию черных металлов. Уменьшение окалинообразования можно достичь, во-первых, снижением температуры конца прокатки за счет охлаждения катанки в проводящих трубах водой высокого или низкого давления и, во-вторых, ускоренным охлаждением бунтов в моталках и на транспортерах воздухом или воздушно-водяной смесью. Скорость окалинообразования при охлаждении бунтов на воздухе, определенная опытным путем на Криворожском металлургическом заводе, приведена в табл. 29. Из табл. 29 следует, что если, например, уменьшить температуру сматывания бунтов до 800—

850°C и одновременно ускорить охлаждение металла в моталках, то можно довести окалинообразование до 7 кг/т, из которых 5 кг/т составит прокатная окалина и лишь 2 кг/т окалина, образующаяся после прокатки. Наиболее целесообразно снижение температуры конца прокатки осуществлять водой под высоким

Таблица 29  
Скорость окалинообразования при охлаждении бунтов катанки на воздухе

Интервал температур, °C	Скорость охлаждения, град/мин	Скорость окисления, г/(м <sup>2</sup> ·мин)	Количество окалины	
			кг/т	г/м <sup>2</sup>
1050—950	1,7	40	12,6	159
950—800	10	5,5	6,7	85
800—600	9	3	4,7	59
600—500	8	1,5	1,3	17
500—400	5	0	0	0

Примечание. При выходе катанки из чистой клетки количество окалины составляло 4,7 кг/т (60 г/м<sup>2</sup>).

давлением в проводящих трубах, расположенных между чистой клетью и моталками, а также водой под низким давлением в трубах и в моталках с помощью индивидуальных форсунок. В табл. 30 представлены результаты исследования катанки, охлажденной различными способами. Приведенные данные подтверждают возможность получения катанки с уменьшенным ко-

Таблица 30  
Результаты исследования качества катанки при охлаждении ее различными способами

Способ охлаждения водой	Расход воды, м <sup>3</sup> /ч	Расход воздуха, м <sup>3</sup> /ч	Температура на выходе из моталок, °C	Угар при травлении, кг/т	Продолжительность травления, мин	Предел прочности		Относительное удлинение, %
						Мн/мм <sup>2</sup>	кг/мм <sup>2</sup>	
На воздухе . . . . .	—	—	1060	31—33	55	314—343	32—35	23—29
В трубах при $p = 2 \text{ Мн/м}^2$ (20 ат)	12,5	—	900	20	30	343—392	35—40	—
То же, при $p = 0,15—0,30 \text{ Мн/м}^2$ (1,5—3 ат) . . .	13,0	—	920	22	35	343—392	35—40	—
То же, в моталках с кольцевой форсункой . . . . .	25,0	1650	800—840	11,6	15—20	382—402	39—41	17—28
То же, в моталках с индивидуальными форсунками . . . . .	16,5	250	800—820	9,3	15—20	363—412	37—42	18—27

личеством окалины на ее поверхности и более высокими механическими свойствами.

На непрерывных сортовых станах повышение качества проката достигается в результате модернизации оборудования, совершенствования технологии, стабилизации режимов межклетевого натяжения полосы и термического упрочнения профилей с использованием тепла прокатного нагрева.

Рабочие клетки чистовых групп ряда действующих станов могут быть улучшены реконструкцией отдельных узлов. Рассмотрим, например, чистовую клеть мелкосортного стана 250.

Клеть с горизонтальными валками (см. рис. 32) крепят к плитовинам крюками зажимного устройства. Однако она может перемещаться перпендикулярно оси прокатки вправо или влево на 200 мм со скоростью 10 мм/сек. Привод клетки осуществляется от индивидуального электродвигателя постоянного тока через редуктор, шестеренную клеть и универсальные шпиндели. Клеть снабжена литой станиной открытого типа, верхним и нижним винтовыми нажимными устройствами с ручным приводом и приспособлением для осевого регулирования валков. Перемещение валков по вертикали, считая от середины клетки, составляет  $\pm 30$  мм, осевое перемещение  $\pm 10$  мм. Один оборот штурвала нажимного устройства соответствует перемещению валка на 0,5 мм. Максимальный диаметр рабочих валков 335 мм, минимальный 248 мм, длина бочки 500 мм, материал валков — закаленный чугун. Валки установлены на радиально-сферических подшипниках (по два подшипника на шейку), рассчитанных на усилие прокатки 392 кН (40 Т) при скорости вращения 300—1200 об/мин. Охлаждение валков водяное, смазка подшипников — густая, централизованная.

Съемные верхние поперечины клетки выполнены заодно с траверсой. Крепление их к стойкам станин осуществляется при помощи откидных стяжных болтов и клиньев, величина затяжки которых не контролируется. Уравновешивание верхнего валка производится упорными стержнями, снабженными тарельчатыми пружинами и фиксирующими гайками. Между нижними подушками и нажимными винтами установлены стаканы со сферической поверхностью, обеспечивающие самоустановление подушек. При перевалке валков клеть снимают с плитовин электромостовым краном, устанавливают на стенд, где производят разборку, ремонт, смену валков и предварительную настройку.

Наличие стяжных болтов, клиньев и прокладок для крепления верхних поперечин, предварительная затяжка которых не контролируется, а также четырех нажимных винтов и стаканов приводит к значительным упругим деформациям клетки. Наблюдается быстрый износ подшипников, воспринимающих осевые усилия, что вызывает игру валков и искажение профиля. Универсальные шпиндели, передающие вращение рабочим валкам, испытывают значительные вибрации и динамические удары при

высоких скоростях прокатки. Вкладыши шарниров в результате трения быстро изнашиваются.

Для повышения долговечности опор и улучшения осевой фиксации валков подшипники должны быть заменены более надежными. Целесообразно заменить клиновое крепление верхних поперечин станин гидравлическими гайками, а также применить более совершенные шарнирные узлы для универсальных шпинделей.

В чистовых группах клеток непрерывных сортовых станов, так же как и на проволочных станах, прокатку ведут как с образованием петли между клетями, так и с натяжением. Прокатка без петли является наиболее простой по настройке и высокопроизводительной, но требует постоянно действующих устройств для поддержания между клетями заданного натяжения. Поскольку расстояния между клетями невелики, при прокатке с петлей величина ее ограничена и должна поддерживаться в определенных границах.

Регулирование величины натяжения на непрерывных сортовых станах имеет особо важное значение при освоении прокатки двутавровых балок, швеллеров и других. Образование петли между клетями чистовой группы для фасонных профилей недопустимо вследствие значительных сечений раската и возможных искажений его геометрических размеров. В качестве чистовых клеток при прокатке с натяжением двутавровых балок и швеллеров целесообразно использовать качающиеся клетки, позволяющие измерять и регулировать межклетевое натяжение бесконтактным способом [80].

Разработка и внедрение надежных постоянно действующих систем и устройств для регулирования величины петли и натяжения является одной из актуальных задач, требующих скорейшего решения. Применение вышеописанных систем и устройств даст возможность автоматизировать процесс прокатки, увеличить производительность станов и улучшить качество готовой продукции.

Термическое упрочнение проката является одним из наиболее эффективных путей повышения качества и экономии металла в народном хозяйстве. Упрочняющая термическая обработка в среднем в 1,5—2 раза повышает прочность стали при сохранении высокой ее пластичности. Это позволяет экономить по отдельным видам проката от 15 до 40% металла, повышает хладостойкость стали, уменьшает склонность ее к старению, снижает потери в виде окалины, ускоряет охлаждение проката и тем самым уменьшает потребность в больших площадях для холодильников. Наряду с этим термическое упрочнение увеличивает срок службы и надежность конструкций и машин [81, 82].

Наиболее рациональной схемой термического упрочнения большинства видов прокатных изделий, как показал опыт, является упрочнение в потоке стана интенсивным охлаждением изде-

лий водой на выходе из чистовой клетки. В этом случае на строительство установок требуется в несколько раз меньше капиталовложений, чем на строительство термического цеха.

Термическое упрочнение с прокатного нагрева обеспечивает высокое качество изделий. В результате использования эффекта термомеханической обработки при закалке немедленно после прокатки получают примерно вдвое более высокое относительное удлинение, чем при упрочнении с отдельного нагрева. При обычной упрочняющей термической обработке, которую производят с отдельного нагрева, этот эффект отсутствует.

За последнее время созданы новые технологические процессы, спроектировано и изготовлено оборудование для упрочнения большинства видов сортового проката, в частности арматуры для железобетона, фасонных профилей (балки, швеллеры, уголки), труб и другой прокатной продукции.

Установки для термического упрочнения круглых профилей и стержневой арматуры для железобетона работают на непрерывных мелкосортных станах 250-1 и 350-2 Криворожского и Макиевского металлургических заводов.

На стане 250-1 установка состоит из девяти охлаждающих секций, расположенных в одну линию. Длина каждой секции 3 м, расстояние между ними 0,2 м. На участке охлаждающих секций полоса движется под действием кинетической энергии водовоздушной смеси, которая подается в направлении движения проката. Вся установка размещена параллельно рольгангу, после барабанных ножниц. Полосы длиной 80 м подаются на установку со скоростью 14 м/сек при помощи специальной передвижной стрелки. После упрочнения с прокатного нагрева арматурные стержни диаметром 10 и 14 мм из Ст.3, Ст.5 и 35ГС имеют временное сопротивление разрыву 1177—1373 Мн/м<sup>2</sup> (120—140 кг/мм<sup>2</sup>). Термически упрочненная арматура выходит из закалочной установки прямой и с меньшим поверхностным слоем окалины.

Максимальная разность прочности металла по длине полосы не превышает 69 Мн/м<sup>2</sup> (7 кг/мм<sup>2</sup>), что почти в три раза меньше, чем допускаемая по ГОСТ 10884—64.

На крупносортном стане 650 завода «Азовсталь» термическое упрочнение фасонных профилей с использованием тепла прокатного нагрева производится в закалочной установке, расположенной за чистовой клетью на отводящем рольганге.

Установка, разработанная Институтом черной металлургии совместно с заводом, состоит из нескольких одинаковых секций, представляющих собой камеры струйного охлаждения. Каждая секция снабжена поворотной рамой, на которой укреплены коллекторы с форсунками, подающими воду на упрочняемый фасонный прокат. Расстояние и углы наклона форсунок относительно раската регулируются, что позволяет производить упрочнение любого профиля, прокатываемого на стане. Аналогичные уста-

новки могут быть применены на непрерывных и полунепрерывных сортовых станах.

Исследования показали, что прочностные характеристики тонкостенных профилей швеллеров и двутавровых балок № 16—18, а также толстолистового уголка 200×200×25 мм из стали марок Ст.3сп и Ст.3пс в результате термического упрочнения возрастают в 1,3—1,5 раза [82, с. 45—48]. Так, предел текучести металла швеллеров и двутавровых балок повышается до 392 Мн/м<sup>2</sup> (40 кг/мм<sup>2</sup>), что на 60% выше требований ГОСТ 380—60.

## Глава VII

### ИЗМЕРЕНИЕ И АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ РАЗМЕРОВ ПРОКАТА

#### ИЗМЕРЕНИЕ СОРТОВЫХ ПРОФИЛЕЙ

Непрерывное измерение геометрических размеров проката позволяет своевременно выявить нарушения технологического режима и автоматизировать настройку стана. Несмотря на повышенные требования к точности прокатной продукции, до настоящего времени не разработаны надежно действующие приборы для автоматического контроля размеров сортовых и фасонных профилей в потоке.

Такие приборы существуют для контроля ширины и толщины при прокатке тонких листов и лент. Значительная часть прокатной продукции — сортовой прокат не контролируется в потоке, что приводит к большим потерям металла. Поэтому неотложной задачей прокатного производства, наряду с улучшением оборудования и совершенствованием технологии, является создание приборов для измерения в потоке геометрических размеров сортовых и фасонных профилей (круга, квадрата, уголка, швеллера и др.) с последующей подачей сигнала исполнительным механизмом, регулирующим положение рабочих валков.

В автоматических приборах, непрерывно контролирующих толщину или ширину прокатной полосы, используются различные принципы и методы измерений. Широкое применение получили бесконтактные приборы, принцип действия которых основан на измерении поглощения рентгеновских и радиоактивных излучений в толще металла. Толщину прокатываемого профиля можно измерять по усилию прокатки суммированием показаний мездоз. Имеются также приборы, использующие для измерения толщины металла электромагнетизм и ультразвук.

Для измерения ширины полосы применяют фотоэлектрические измерители. Работа этих бесконтактных приборов основана на определении угла зрения, под которым видны кромки тела, соответствующим образом ориентированные в пространстве. В настоящее время разработаны различные фотоэлектронные приборы, основанные на фотокомпенсационном, фотоследящем и фотонимпульсном принципах измерения, а также вычислительные устройства, вырабатывающие программу работы агрегатов. Для контроля геометрических размеров проката могут быть ис-

пользованы также приборы, работающие с применением индуктивности и емкости, пневматики и оптики.

Ниже приведено краткое описание некоторых приборов для измерения геометрических размеров проката.

Одна из фирм США разработала прибор для измерения диаметра проволоки в потоке стана. В основу прибора положен оптический принцип. Прибор рассчитан на диапазон измерений от 4,6 до 9,6 мм. Однако погрешность измерения может составлять 0,075 мм, что в несколько раз меньше стандартных допусков для проволоки указанного диаметра. В приборе использован

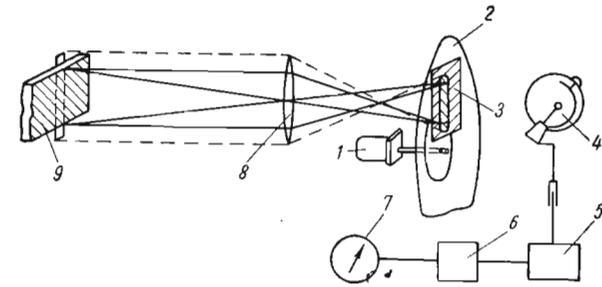


Рис. 93. Принципиальная схема фотоимпульсного измерителя проката

фотоэлемент, имеющий максимальную чувствительность в инфракрасной части спектра, что позволяет измерять металл, нагретый от 650 до 1000°C [83].

В Англии разработан фотоэлектрический индикатор, контролирующий выход размеров прокатываемой проволоки из пределов допусков. Индикатор может контролировать размеры с точностью до 0,025 мм. Такая точность достигается за счет высокой чувствительности фотоэлемента и наличия специальной системы отдува для защиты светового тракта от загрязнения [84].

В Центральной лаборатории автоматизации разработаны фотоэлектрические приборы для автоматического бесконтактного измерения геометрических размеров профиля холодного и горячего проката [85, 86, 87, 88].

Наиболее эффективным в промышленных условиях оказался времяимпульсный принцип измерения, заключающийся в измерении тени предмета, проектируемой оптической системой на экран. За экраном устанавливают механическое устройство развертки изображения тени и фотоэлемент. Длительность затемнения фотоэлемента пропорциональна размеру тени, т. е. размеру проката. Специальная электронная схема, преобразуя световую энергию в электрическую, позволяет по отклонению стрелки вольтметра определить геометрические размеры проката.

Принципиальная схема фотоимпульсного измерителя проката малых поперечных размеров показана на рис. 93.

При помощи линзы 8 измеряемое тело 9 проектируется на щелевую диафрагму 3, перед которой вращается диск 2 с прорезью, имеющей форму архимедовой спирали. При непрерывном вращении диска двигателем 1 и прохождении света от тела через прорезь в щелевую диафрагму осуществляется строчная развертка изображения измеряемого тела, воспринимаемая находящимся за щелевой диафрагмой фотоэлементом 4, который засвечивается светом измеряемого тела. Поле действия оптической системы ограничено шагом архимедовой спирали и параметрами линзы. В процессе развертки фотоэлемент засвечивается периодически. Длительность одной развертки прямо пропорциональна размеру поля оптической системы. Некоторая часть этого времени, соответствующая периоду от начала засвечивания до начала затемнения фотоэлемента, пропорциональна контролируемому размеру тела.

Для усиления импульсов тока, возникающих в цепи фотоэлемента, имеется электронный усилитель 5, связанный с фотоэлементом через дифференцирующий конденсатор, не пропускающий постоянную составляющую тока фотоэлемента в усилитель, и необходимый для определения начала и конца импульса фототока. Сигналы с электронного усилителя подаются на триггерную схему 6, в которой импульс, соответствующий началу засвечивания фотоэлемента, вызывает срабатывание триггера, а импульс конца засвечивания — его закрытие. Для измерения среднегеометрического значения тока применяют интегрирующий контур, к выходу которого подключен автоматический указывающий потенциометр 7.

Поскольку в процессе прокатки температура металла, а следовательно, и свечение могут изменяться, используют свет, излучаемый осветителем, который расположен за телом и снабжен оптической системой, направляющей параллельный пучок света на оптическую систему фотоэлемента. Приборы этого типа имеют ряд особенностей, которые позволяют использовать их в промышленных условиях весьма эффективно. К таким особенностям относятся 1) бесконтактность, позволяющая измерять размеры холодного и горячего проката, движущегося с высокой скоростью; 2) измерение с необходимой точностью в условиях вибрации и перемещений контролируемого проката в пределах поля зрения прибора, что обеспечивается применением телеобъектива и линейной развертки изображения с высокой точностью; 3) отсутствие погрешности измерения при значительных загрязнениях пространства между объектом измерения и прибором. Это объясняется тем, что размер прокатываемого металла определяется не по степени затемнения, а по длительности импульса затемнения фотоэлементов; 4) стабильность работы прибора и простота первичной настройки, что объясняется релейно-импульсным режимом работы электронной схемы и построением схемы на полупроводниковых триодах и диодах.

На основе времяимпульсного принципа разработаны приборы для измерения диаметра проволоки и ширины полосы.

Прибор для измерения диаметра и овальности проволоки установлен на непрерывном проволочном стане Магнитогорского металлургического комбината. Этот прибор измеряет одновременно два взаимно перпендикулярных размера горячекатаной проволоки при помощи двух независимых оптических систем, показания которых совмещены на двухстрелочном указателе с общей шкалой. Шкала прибора с ценой деления 0,05 мм рассчитана на измерение проволоки диаметром 4,5—8,5 мм. Точность измерения порядка 1—1,5%.

На рис. 94 показана схема аппаратуры измерителя ширины полосы. В состав измерителя входят две измерительные головки, силовой блок, полупроводниковый блок, показывающий прибор, осветители с блоком питания, стабилизатор напряжения и разделительный трансформатор.

Измерительная головка 2 закреплена на каретках, перемещающихся по направляющим станины 6 механизма передвижения головок, на определенной высоте от измеряемой полосы 4.

Механизм передвижения головок смонтирован на специальной металлической арке, расположенной за последней клетью стана. Для защиты механизма передвижения от тепловой деформации на станах, прокатывающих полосы в горячем состоянии, над аркой и по бокам ее имеются два ряда отражающих экранов. Предусмотрена также защита арки от механических ударов.

Осветители 5 установлены на тележке под рольгангом так, чтобы светящаяся полоска лампы попадала в объектив измерительной головки во всем диапазоне размеров по ширине измеряемых полос (в плите рольганга в этом месте делается вырез по всей длине осветителя).

Показывающий прибор 12 находится вблизи рабочего места. Регистрирующий прибор 1 установлен на посту управления чистовыми клетями. Силовой 11 и полупроводниковый 8 блоки, стабилизатор напряжения 9, разделительный трансформатор 10, блок питания осветителей и двигателя 7 передвижения измери-

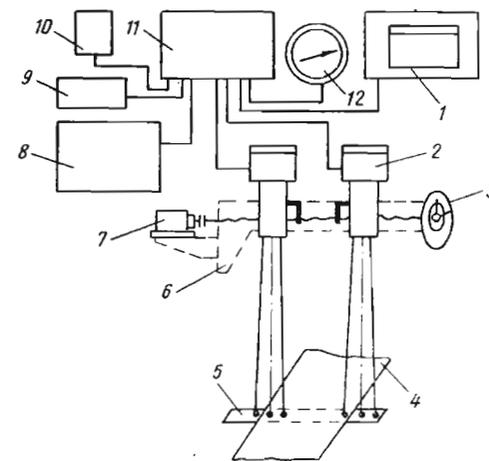


Рис. 94. Схема фотоимпульсного измерителя ширины полосы

тельных головок смонтированы в специальном шкафу, установленном у рабочего места вальцовщика.

Перед началом прокатки измерительные головки при помощи электродвигателя раздвигаются на расстояние, равное заданной ширине прокатываемой полосы, которая фиксируется на указателе 3. Управление электродвигателем осуществляется от кнопочной станции.

В случае измерения ширины горячекатаной полосы расстояние между измерительными головками устанавливается по указателю 3 с поправкой на линейное расширение от температуры.

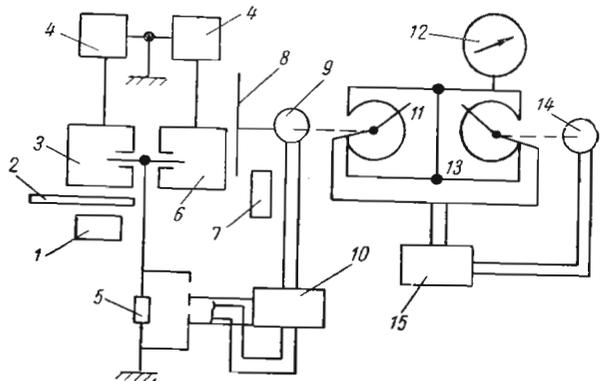


Рис. 95. Принципиальная схема радиоактивного измерителя толщины

Зона обзора каждой головки  $\sim 200$  мм, что определяет допустимые боковые перемещения полосы во время прокатки. Измерительные головки с соответствующими трактами электроники вырабатывают напряжения, определяющие положение кромок полосы в зоне обзора каждой головки. Суммарное напряжение, пропорциональное отклонению ширины от номинала, подается на вход следящих систем показывающего и регистрирующего приборов. Положение стрелок указателя и регистратора отмечает величину отклонения ширины полосы от номинала.

При колебаниях напряжения в сети на  $\pm 20\%$  и двухкратном изменении амплитуды сигнала из-за колебаний яркости осветителя, прозрачности среды и запыленности оптики погрешность незначительна. Прибор устойчиво работает в условиях электрических помех в цехе.

Для бесконтактного измерения толщины полосы используют приборы, принцип действия которых основан на фиксации степени поглощения рентгеновских или радиоактивных излучений в толще металла (рис. 95).

Источник 1 радиоактивных излучений установлен под измеряемой полосой 2, над которой расположена ионизационная ка-

мера 3, получающая питание от выпрямителя 4. В цепи ионизационной камеры находится высокоомное сопротивление 5, по которому течет ток, вызываемый ионизацией газа в камере. Сила тока зависит от степени ионизации камеры, пропорциональной энергии излучения, прошедшего через полосу 2. Для уменьшения внешних помех в приборе используется компенсационный метод измерения с двумя дифференциально включенными ионизационными камерами 3 и 6, имеющих собственные источники излучения 1 и 7.

Между излучателем 7 и камерой 6 расположена шторка 8, уменьшающая излучение, попадающее в камеру, и приводимая в движение реверсивным двигателем 9, который получает питание от электронного фазочувствительного усилителя 10. На вход этого усилителя через вибропреобразователь подается напряжение, снимаемое с сопротивления 5. Для дистанционного изменения положения шторки 8 с валом ее двигателя связан реостатный датчик 11, включенный в схему автоматического моста. Мост соединен с прибором 12, показывающим толщину, шкала которого градуирована в долях миллиметра. Второй реостатный датчик 13 автоматического моста соединен с электродвигателем 14, получающим питание от электронного усилителя 15.

Поскольку мощность излучения радиоактивных препаратов мала, необходимо применять довольно широкий пучок сечением  $30 \times 50$  мм; поэтому минимальная ширина измеряемой полосы составляет 60 мм.

Следует отметить, что характер распространения рентгеновских и радиоактивных излучений не позволяет использовать их для контроля проката малых размеров, например проволоки, круглых и квадратных профилей.

Для измерения поперечных размеров и длины сортовых профилей как в лабораторных, так и в промышленных условиях применяют различные устройства с контактными роликами. Такие устройства обеспечивают достаточную точность измерений при скоростях движения полосы 2—10 м/сек и незначительных ее вибрациях.

На рис. 96 показан измеритель, применяемый для замера ширины полки уголка между клетями непрерывного сортового стана 250. Измеритель конструкции Днепропетровского металлургического института состоит из корпуса 2, в котором смонтированы и встроены на определенный профиль и размер сменные удерживающие ролики 1 и 3. Два измерительных ролика 4 могут перемещаться на кронштейне 5 в процессе настройки измерителя. При измерении размеров прокатываемой полосы ролик 4 перемещается вместе с планкой 8 сердечника 7 индуктивной мезоды 6.

При перемещении сердечника индуктивность катушки, обмотки которой включены в качестве плеч электрического моста, изменяется.

Балансировку моста производят с помощью переменного сопротивления, а его питание — переменным током от электрической сети через понижающий трансформатор. Выходное напряжение с моста поступает на выпрямитель. Для уменьшения пульсации напряжения к выходу выпрямителя подключен индуктивно-емкостной фильтр. Выпрямленное и отфильтрованное напряжение подводится к вибратору осциллографа.

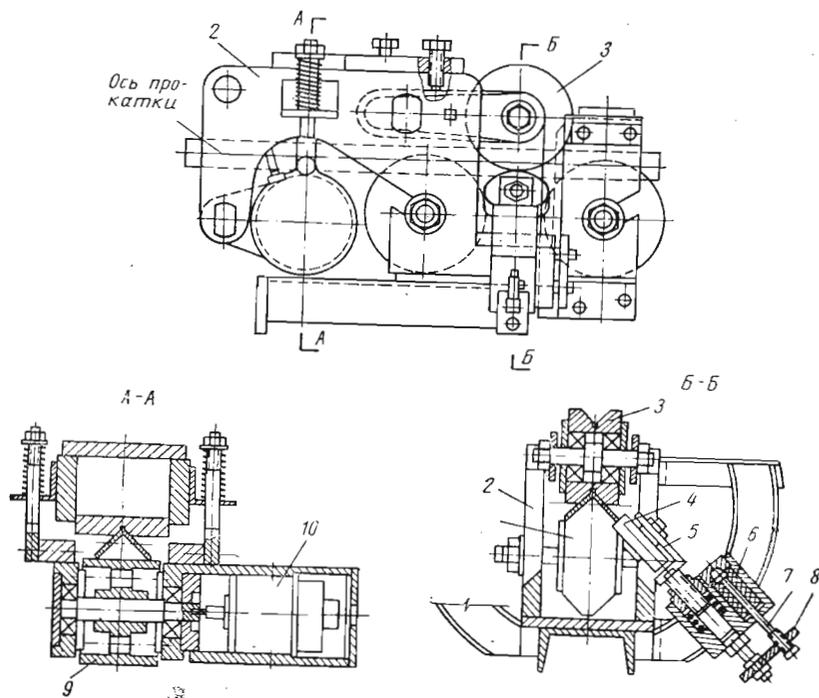


Рис. 96. Измеритель ширины полок уголка

В корпус измерителя ширины полок уголка вмонтирован также ролик 9 датчика скорости полосы, приводимый во вращение тахогенератором 10. Тахогенератор установлен для измерения разности скоростей полосы и вала.

На рис. 97 изображено устройство, предназначенное для измерения диаметра и длины круглого профиля [89].

Основными узлами устройства являются два конических ролика 9, один цилиндрический ролик 11 и пневмоцилиндр 1, которые установлены на подвижной траверсе 2 и раме 10. Все узлы собраны на сварном основании 6.

Конический ролик консольно установлен в корпусе 4 и имеет электромагнитный датчик-импульсатор для измерения углов по-

ворота ролика. Импульсатор представляет собой якорь 7 из электротехнической стали с одним зубом, насаженным через втулку 5 на вал ролика.

При каждом обороте ролика зуб якоря замыкает магнитную цепь статора 8, на магнитопроводе которого намотаны две катушки. Напряжение на вторичной обмотке возникает при изменении сцепленного с ней магнитного потока во время прохожде-

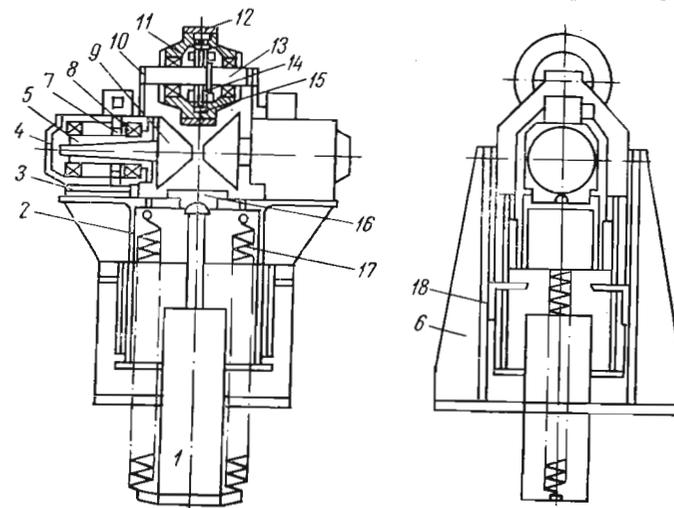


Рис. 97. Измеритель диаметра и длины круглого профиля

ния зуба якоря под полюсами статора. Таким образом, импульсатор дает один импульс за один оборот ролика. Ролики настраивают при помощи винтов 3.

Цилиндрический следящий ролик 11 представляет собой разборный корпус со сменным кольцом 12, вращающимся на неподвижном валу 13. Внутри ролика вмонтирован датчик-импульсатор, который дает 200 импульсов за один оборот ролика.

Якорь 15 импульсатора выполнен в виде зубчатого колеса, имеющего 100 зубьев. Статор 14 имеет две магнитные системы с зубчатыми полюсами. Шаг зубьев на полюсах равен шагу зубьев на якоре, но зубцы одной магнитной системы смещены относительно зубцов второй системы на половину шага. При каждом совпадении зубцов якоря и статора на вторичных катушках магнитных систем статора возникают импульсы. Количество импульсов, которые дает импульсатор на оборот ролика, равно 200.

Корпус пневмоцилиндра 1 жестко соединен с рамой 10 цилиндрического ролика 11, а его шток через сухарь 16 упирается в траверсу 2 конических роликов 9. При включенном пневмоцилиндре траверса лежит на упорах 18, а цилиндрический ролик

вместе с рамой и пневмоцилиндром с помощью пружины 17 находится в крайнем верхнем положении. В этом случае ролики максимально разведены и измеряемый образец проходит мимо, не задевая их.

При включенном пневмоцилиндре шток растягивает пружину 17 и перемещает цилиндрический ролик вниз. Как только ролик коснется поверхности образца, траверса поднимается вверх до тех пор, пока образец не будет зажат роликами. При выключении пневмоцилиндра ролики пружиной возвращаются в исходное положение.

Диаметр цилиндрического ролика, взаимное расположение конических роликов и угол их конуса подобраны таким образом, что цена импульса датчика цилиндрического ролика равна 0,1 мм измеряемого диаметра. Счет импульсов с датчика конического ролика производится по десятичной схеме — декатронами.

На выходе декатрона вырабатывается сигнал после десяти импульсов, поданных на его вход, что соответствует девяти полным оборотам конического ролика. Поскольку образующие конических роликов составляют между собой угол 90°, можно производить измерение одновременно в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. Сигналы датчика цилиндрического ролика поступают одновременно в два канала, где за девять оборотов каждого конического ролика импульсы отсекаются и происходит их независимый счет в специальном устройстве.

Вдоль рольганга расположены три ферродатчика с осветителями. В исходном состоянии ролики разведены и прокат, двигаясь по рольгангу, проходит между ними. Когда передний конец проката пересекает луч света, идущий от осветителя к фотодатчику, подается команда пневмоцилиндру на сведение роликов. При этом профиль зажимается между коническими и цилиндрическими роликами, которые начинают вращаться. В катушках импульсаторов наводятся сигналы, которые усиливаются электронной схемой.

Электронная схема измерителя запускается по сигналу с ферродатчика, который установлен так, что при подходе к нему переднего конца профиля ролики приобретают скорость движения проката. Импульсы цилиндрического ролика, предварительно усиленные, поступают в счетчик электронной схемы.

В момент поступления 10-го импульса конического ролика на выходе декатрона вырабатывается сигнал, который поступает в схему формирования сигнала окончания счета. Эта схема выдает импульс прекращения прохождения сигналов конического и цилиндрического роликов и окончания счета импульсов цилиндрического ролика счетным устройством. На блоке индикации появляется цифра, соответствующая диаметру измеряемого образца.

По команде от ферродатчика, при прохождении заднего конца профиля, система возвращается в исходное положение. Таким

образом, диаметр измеряется на определенной длине и в определенном месте образца.

В последнее время предложены способы и разрабатываются устройства непрерывного измерения длины движущегося проката. Измерение длины осуществляется подсчетом числа магнитных меток, наносимых через определенные расстояния по длине профиля. Магнитные метки наносятся при помощи записывающей магнитной головки, включение которой производится по сигналу воспроизводящей магнитной головки, расположенной на определенном расстоянии от первой головки по ходу прокатки.

Рассмотренные приборы автоматического измерения размеров проката не связаны с установочными механизмами клетей, поэтому их настройка в процессе прокатки производится обычным образом.

В связи с отсутствием в настоящее время надежных бесконтактных измерителей геометрических размеров различных профилей, а также бесконтактных измерителей величины зазора между рабочими валками не представляется возможным полностью автоматизировать настройку сортовых станов в производственных условиях.

#### ИЗМЕРЕНИЕ МЕЖКЛЕТЕВОГО НАТЯЖЕНИЯ

Прокатку сортовых профилей на современных непрерывных станах ведут как с петлей, так и с натяжением. При прокатке с петлей требуются сложные и громоздкие петлерегуляторы, которые усложняют технологию, не позволяют задавать полосы друг за другом и снижают производительность. Кроме того, довольно трудно прокатать с петлей фасонные профили без искажения их формы и размеров.

Практика работы сортовых непрерывных станов подтверждает целесообразность прокатки с натяжением между клетями, что позволяет получать круглые, квадратные и угловые профили высокого качества по всей длине полосы [91]. Основное условие надежной работы станов — это постоянный контроль межклетевого натяжения. При известной величине натяжения можно регулировать число оборотов валков, что особенно важно при прокатке фасонных профилей.

В настоящее время отсутствуют надежные постоянно действующие устройства для измерения натяжения полосы без образования петли. Это затрудняет комплексную автоматизацию непрерывных сортовых станов, препятствует расширению сортамента, улучшению качества продукции и увеличению скорости прокатки.

Измерение натяжения при опытных прокатках может производиться с помощью контактных роликов, замером боковых сил, действующих на подушки рабочих валков, замером горизонтальных сил, действующих на станины клетей, по осциллограммам

токов главных приводных двигателей, а также установкой датчиков в прокатываемой полосе и др.

Способ измерения натяжения, основанный на принципе контакта натяжного ролика с полосой, имеет ряд недостатков. Во время замеров полоса должна изгибаться на определенном участке, а угол ее отклонения от прямолинейного направления должен оставаться постоянным. Малая величина угла отклонения полосы при значительных поперечных сечениях профиля и небольших расстояниях между клетями резко снижает чувствительность этого способа измерения.

Для измерения натяжения при помощи фиксации боковых сил, действующих на нижние подушки, последние устанавливают на ролики или цилиндрические опоры. Между подушками и стойками станин укреплены месдозы, которые удерживают подушки в определенном положении при их перемещении относительно опор. Этот способ измерения натяжения не дает надежных результатов, поскольку невозможно точно учесть силы трения, возникающие между подушками, стойками станин и деталями нажимного механизма. Кроме того, неравномерное распределение моментов прокатки между валками вносит существенную погрешность при измерении натяжения.

Для определения натяжения путем замера горизонтальных сил, действующих на станины клетей, последние устанавливают на упругие опоры или специальные катки. Расчеты показывают, что минимальная величина натяжения, определяемая таким способом, равна силе трения, которая удерживает клеть от перемещения. При определении натяжения должны учитываться силы, опрокидывающие клеть, вызываемые неравномерным распределением моментов прокатки между валками, а также силы сопротивления в упругих опорах, препятствующие свободному перемещению клетки.

Способ измерения натяжения по осциллограммам токов приводных двигателей требует точного замера величины тока, напряжения на якоре двигателя и числа оборотов валков в момент определения натяжения. На сортовых станах с общим приводом этот способ измерения неприменим.

Способ измерения натяжения при помощи датчиков, установленных в прокатываемой полосе, применим только в лабораторных условиях.

Для обеспечения постоянного контроля определенного натяжения полосы, возможности прокатки фасонных тонкостенных профилей, автоматизации работы непрерывного сортового стана и увеличения его производительности авторами разработан способ замера натяжения полосы, отличающийся тем, что полное усилие натяжения автоматически фиксируется месдозами, установленными по оси прокатки между качающейся рабочей клетью и стойками специального основания, на котором шарнирно укреплена клеть [92].

Клеть непрерывного стана с измерителями натяжения, для прокатки фасонных профилей без образования петли, показана на рис. 98. Качающаяся клеть 1 для уменьшения ее габаритов выполнена предварительно напряженной и установлена на специальном основании 2. Крепление клетки к основанию осуществляется при помощи шарниров 3, расположенных с обеих сторон

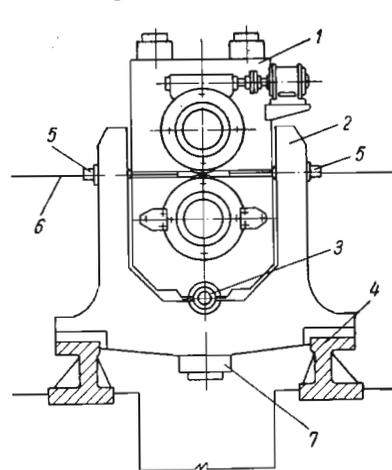


Рис. 98. Качающаяся прокатная клеть

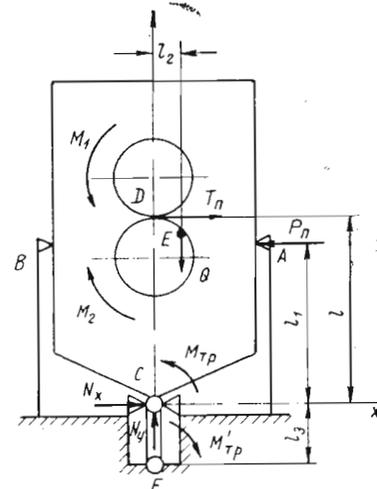


Рис. 99. Схема сил, действующих на качающуюся клеть

клетки. Основание клетки находится на плитовинах 4 и может при смене калибров перемещаться перпендикулярно оси прокатки.

Между качающейся клетью и стойками основания на уровне прокатываемой полосы 6 установлены измерители натяжения (месдозы) 5, которые удерживают клеть в вертикальном положении и фиксируют полное усилие натяжения полосы. Положение клетки относительно основания регулируется перемещением шарниров 3 по вертикали с помощью установочного механизма 7.

Во время прокатки при наличии натяжения полосы между клетями сигналы, воспринимаемые месдозами, поступают в соответствующую измерительную аппаратуру, снабженную регистрирующими и показывающими приборами. Усиленные сигналы, могут подаваться также исполнительным механизмам привода рабочих валков или нажимных устройств.

Рассмотрим силы, действующие на качающуюся клеть, укрепленную в шарнире С и зафиксированную в вертикальном положении месдозами А и В (рис. 99). На клеть действуют собственная масса  $Q$  в точке  $E$ , сила переднего натяжения полосы  $T_n$  в точке  $D$ , моменты  $M_1$  и  $M_2$ , приложенные к валкам со стороны привода, а также момент сил трения  $M_{тр}$  в шарнире  $C$ .

Определим реакции в точках опор  $A$ ,  $B$  и  $C$ .

Для решения задачи отбросим опоры, заменив их реактивными силами. Кроме активных сил  $Q$  и  $T_n$ , на клеть действуют реактивные силы со стороны месдоз и шарнира. Предположим, что между месдозой  $B$  и качающейся клетью имеется зазор. Тогда клеть при переднем натяжении полосы давит на месдозу  $A$ . В результате со стороны месдозы  $A$  возникает горизонтальная реакция  $P_n$ ; со стороны месдозы  $B$  реакции не будет. Реакция в шарнире  $C$  в общем случае состоит из двух составляющих  $N_x$  и  $N_y$ . Эта реакция может быть также определена величиной одной силы и направлением.

Проведем координатные оси через шарнир клетки, как показано на рис. 99. За центр моментов возьмем точку  $C$ . Система сил будет находиться в равновесии, если

$$\Sigma X = 0, \quad (215)$$

$$\Sigma Y = 0, \quad (216)$$

$$\Sigma M_C = 0. \quad (217)$$

Составим уравнения равновесия сил, действующих на рабочую клеть:

$$T_n + N_x - P_n = 0, \quad (218)$$

$$N_y - Q = 0, \quad (219)$$

$$P_n l_1 + M_1 - M_2 + M_{тр} - T_n l - Q l_2 = 0, \quad (220)$$

где  $l$  — расстояние от шарнира  $C$  до оси прокатываемой полосы;

$l_1$  — расстояние от шарнира  $C$  до оси месдозы;

$l_2$  — расстояние от оси клетки, проходящей через шарнир, до центра тяжести клетки.

Реакции в точках опор  $A$  и  $C$  будут

$$P_n = \frac{M_2 - M_1 - M_{тр} + Q l_2 + T_n l}{l_1}, \quad (221)$$

$$N_x = P_n - T_n, \quad (222)$$

$$N_y = Q. \quad (223)$$

При установке месдоз на уровне прокатываемой полосы ( $l=l_1$ ) и совпадении центра тяжести клетки с ее вертикальной осью ( $l_2=0$ ) уравнение (220) примет вид:

$$P_n l + M_1 - M_2 + M_{тр} - T_n l = 0. \quad (224)$$

Непосредственное измерение горизонтальной реакции  $P_n$  месдозой  $A$  позволяет определить величину натяжения полосы  $T_n$ . Из уравнения (224) сила натяжения прокатываемой полосы

$$T_n = P_n + \frac{M_1 - M_2 + M_{тр}}{l}. \quad (225)$$

Величина момента сил в шарнире  $C$  может быть определена по формуле

$$M_{тр} = Q d \mu,$$

где  $Q$  — нагрузка на шарнир, равная собственной массе клетки;

$d$  — диаметр опоры;

$\mu$  — коэффициент трения в подшипниках шарнира.

Так, например, при  $Q=49$  кН (5000 кг),  $d=100$  мм и  $\mu=0,003$  (для подшипников качения)

$$M_{тр} = 5000 \cdot 10 \cdot 0,003 = 14,7 \text{ н}\cdot\text{м} \text{ (150 кг}\cdot\text{см)}.$$

Принимая расстояние шарнира до оси полосы 1000 мм, получим

$$\Delta T_n = \frac{M_{тр}}{l} = \frac{150}{100} = 1,5 \text{ н (1,5 кг)},$$

что составляет 0,03% от массы рабочей клетки.

Из расчета следует, что усилие, необходимое для преодоления момента сил трения в шарнире при повороте клетки, весьма незначительно и им можно пренебречь. Тогда уравнение (225) примет вид

$$T_n = P_n + \frac{M_1 - M_2}{l}. \quad (226)$$

В условиях работы непрерывного стана момент привода передается непосредственно валкам одной клетки. Поэтому опрокидывающий момент, действующий на клеть от привода, в результате прокатки будет

$$M_{о.п} = M_1 - M_2.$$

Если моменты, приложенные к верхнему и нижнему валкам, равны ( $M_1=M_2$ ), то опрокидывающий момент клетки дуо равен нулю. В этом случае сила натяжения полосы, согласно уравнению (226):

$$T_n = P_n. \quad (227)$$

Таким образом, установка месдоз по оси прокатки между рабочей клетью и стойками специального основания, на котором шарнирно укреплен клеть, позволяет полностью фиксировать силу натяжения прокатываемой полосы.

На непрерывном стане можно вести прокатку с одним приводным валком, например нижним. Тогда весь момент привода будет передаваться этому валку и сила натяжения полосы

$$T_n = P_n - \frac{M_2}{l}. \quad (228)$$

Полученные расчетные формулы (225) — (228) применимы при наличии переднего натяжения полосы. Если прокатку в кле-

ти ведут с задним натяжением, то уравнение (225) будет иметь следующий вид:

$$T_3 = P_3 - \frac{M_1 - M_2 - M_{тр}}{l}. \quad (229)$$

Пренебрегая, ввиду малости, моментом сил трения в шарнире, получим

$$T_3 = P_3 - \frac{M_1 - M_2}{l}. \quad (230)$$

Из уравнения (230) следует, что при равенстве моментов, приложенных к верхнему и нижнему валкам, сила заднего натяжения полосы полностью фиксируется месдозой, т. е.

$$T_3 = P_3. \quad (231)$$

В случае прокатки в клетке с одним приводным нижним валком сила заднего натяжения полосы будет

$$T_3 = P_3 + \frac{M_2}{l}. \quad (232)$$

Часто в рабочих клетях черновой и чистовой групп сортового непрерывного стана (кроме первой и последней клетки группы) прокатку ведут одновременно с передним и задним натяжением. Тогда измерители шарнирно укрепленных клеток будут фиксировать разность сил натяжения. Следовательно, при  $T_n > T_3$

$$P_n = T_n - T_3; \quad (233)$$

при  $T_n = T_3$

$$P_n = P_3 = 0; \quad (234)$$

при  $T_n < T_3$

$$P_3 = T_3 - T_n, \quad (235)$$

где  $T_n$  и  $P_n$  — соответственно сила переднего натяжения и горизонтальная реакция, фиксируемая передней месдозой;

$T_3$  и  $P_3$  — соответственно сила заднего натяжения и горизонтальная реакция, фиксируемая задней месдозой.

Найдем натяжение прокатываемого металла между клетями непрерывной группы стана при помощи измерения горизонтальных реакций  $P_n$  и  $P_3$ . Из условия равенства полосы между двумя смежными клетями следует, что алгебраическая сумма действующих на нее сил равна нулю, т. е.

$$T_{ni} + T_{3(i-1)} = 0. \quad (236)$$

Для группы клеток

$$\sum_{i=1}^{n-1} T_{ni} + \sum_{i=2}^n T_{3i} = 0, \quad (237)$$

или

$$T_{n1} + T_{32} + T_{n2} + \dots + T_{3(n-1)} + T_{n(n-1)} + T_{3n} = 0. \quad (238)$$

Результирующие горизонтальных реакций, измеряемые месдозами в каждой клетке:

$$P_1 = T_{n1},$$

$$P_2 = T_{32} + T_{n2},$$

$$P_3 = T_{33} + T_{n3},$$

.....

$$P_{n-1} = T_{3(n-1)} + T_{n(n-1)},$$

$$P_n = T_{3n}.$$

Тогда уравнение (238) можно записать следующим образом:

$$P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_{n-1} + P_n = 0, \quad (239)$$

где  $P_1$  — результирующая горизонтальных реакций первой клетки;

$P_2$  — то же, второй клетки и т. д.

Следовательно, алгебраическая сумма сил, фиксируемых измерителями натяжения в непрерывной группе клеток, равна нулю.

Учитывая, что алгебраическая сумма действующих на полосу сил между двумя смежными клетями равна нулю, уравнение (238) может быть записано в виде

$$T_{n1} + T_{32} + T_{n2} + \dots + T_{3(i-1)} + T_{3i} = 0 \quad (240)$$

или

$$P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_{i-1} + T_{3i} = 0, \quad (241)$$

откуда

$$P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_{i-1} = -T_{3i}. \quad (242)$$

Так, имея показания месдоз, легко найти натяжение прокатываемой полосы между любыми двумя смежными клетями.

Необходимо отметить, что действующие на полосу силы натяжения могут быть определены и в том случае, если по какой-либо причине вышли из строя месдозы на одной из клеток непрерывной группы стана.

Пример. Чистовая группа непрерывного сортового стана состоит из восьми клеток, в которых прокатку ведут с натяжением или подпором. Определить натяжение полосы между клетями, если показания месдоз следующие:

$$P_1 = -294,3 \text{ н } (-30 \text{ кг}); \quad P_2 = -196,2 \text{ н } (-20 \text{ кг});$$

$$P_3 = 98,1 \text{ н } (+10 \text{ кг}); \quad P_4 = 588,6 \text{ н } (+60 \text{ кг});$$

$$P_5 = -392,4 \text{ н } (-40 \text{ кг}); \quad P_6 = -490,5 \text{ н } (-50 \text{ кг});$$

$$P_7 = -98,1 \text{ н } (-10 \text{ кг}); \quad P_8 = 784,8 \text{ н } (+80 \text{ кг}).$$

Будем считать, что силы натяжения и горизонтальные реакции имеют положительный знак, когда они направлены в сторону прокатки. Подставляя показания месдоз в уравнение (241), получим

$$\begin{aligned} T_{32} &= -294,3 \text{ н } (-30 \text{ кг}); \\ T_{33} &= -30 - 20 = -490,5 \text{ н } (-50 \text{ кг}); \\ T_{34} &= -30 - 20 + 10 = -392,4 \text{ н } (-40 \text{ кг}); \\ T_{35} &= -30 - 20 + 10 + 60 = +196,2 \text{ н } (+20 \text{ кг}); \\ T_{36} &= -30 - 20 + 10 + 60 - 40 = -196,2 \text{ н } (-20 \text{ кг}); \\ T_{37} &= -30 - 20 + 10 + 60 - 40 - 50 = -686,7 \text{ н } (-70 \text{ кг}); \\ T_{38} &= -30 - 20 + 10 + 60 - 40 - 50 - 10 = -784,8 \text{ н } (-80 \text{ кг}). \end{aligned}$$

Из расчета следует, что  $T_{35}$  имеет положительный знак, т. е. между четвертой и пятой клетями имеется подпор прокатываемого металла. Между остальными клетями прокатка идет с натяжением.

Моменты, приложенные к верхнему и нижнему валкам сортопрокатных клетей, как показывают опытные замеры, не равны между собой. Особенно значительная неравномерность распределения моментов между валками наблюдается при прокатке балочных профилей. Поэтому при измерении натяжения полосы необходимо учитывать опрокидывающий момент ( $M_1$ — $M_2$ ), действующий на качающуюся клеть.

Учет опрокидывающего момента может быть осуществлен за мером месдозами реакции  $N_x$  в шарнире  $C$ . Возможность перемещения верхнего шарнира  $C$  достигается благодаря введению в конструкцию неподвижного нижнего шарнира  $F$ , с помощью которого качающаяся клеть закреплена в основании (см. рис. 99).

Как следует из уравнения (218), переднее натяжение полосы

$$T_n = P_n - N_x. \quad (243)$$

Подставляя в уравнение (243) значение  $T_n$  из уравнения (226), получим

$$N_x = \frac{M_2 - M_1}{l}, \quad (244)$$

т. е. горизонтальная составляющая реакции  $N_x$  верхнего подвижного шарнира полностью учитывает влияние неравномерного распределения моментов между валками.

Рассмотрим возможные случаи прокатки.

При  $M_1 < M_2$  направление опрокидывания клетки совпадает с направлением силы  $T_n$ . Горизонтальная составляющая реакции шарнира  $C$  имеет положительное направление и фиксируется задней месдозой ( $N_3$ ). Тогда уравнение (243) примет вид:

$$T_n = P_n - N_3. \quad (245)$$

При  $M_1 > M_2$  направление опрокидывания клетки противоположно направлению силы  $T_n$ . Если при этом сила натяжения  $T_n$  превышает величину  $\frac{M_2 - M_1}{l}$ , то горизонтальная составляющая реакции шарнира  $C$  фиксируется передней месдозой ( $N_n$ ) и натяжение определяют по уравнению

$$T_n = P_n + N_n. \quad (246)$$

Если же сила натяжения  $T_n$  меньше величины  $\frac{M_2 - M_1}{l}$ , то горизонтальная составляющая реакции шарнира  $C$  фиксируется передней месдозой ( $N_n$ ), но при этом часть опрокидывающего усилия будет восприниматься задней месдозой ( $P_3$ ). В этом случае натяжение

$$T_n = N_n - P_3. \quad (247)$$

Когда сила  $T_n$  равна величине  $\frac{M_2 - M_1}{l}$ , то показания верхних месдоз  $P_n = 0$ ,  $P_3 = 0$ , а натяжение фиксируется нижней месдозой ( $N_n$ ), т. е.

$$T_n = N_n. \quad (248)$$

По аналогии с предыдущими выводами получим формулы для расчета заднего натяжения. Все формулы для расчета переднего и заднего натяжения представлены в табл. 31.

Таблица 31

Формулы для расчета натяжения по показаниям месдоз качающейся клетки

Соотношение моментов	Переднее натяжение	Заднее натяжение
$M_1 = M_2$	$T_n = P_n$	$T_3 = P_3$
$M_1 < M_2$	$T_n = P_n - N_3$	$T_3 > \frac{M_2 - M_1}{l}; T_3 = P_3 + N_3$ $T_3 < \frac{M_2 - M_1}{l}; T_3 = N_3 - P_n$
$M_1 > M_2$	$T_n > \frac{M_2 - M_1}{l}; T_n = P_n + N_n$ $T_n < \frac{M_2 - M_1}{l}; T_n = N_n - P_3;$ $T_n = \frac{M_2 - M_1}{l}; T_n = N_n$	$T_3 = \frac{M_2 - M_1}{l}; T_3 = N_3$ $T_3 = P_3 - N_n$

Таким образом, при неравномерном распределении моментов между рабочими валками и наличии опрокидывания клетки натяжение полосы определяется алгебраическим суммированием показаний верхних и нижних месдоз.

Необходимо отметить, что показания месдоз ( $N_3$  и  $N_n$ ) несколько занижены, так как при качании клетки в нижнем шарнире  $F$  возникает момент сил трения  $M'_{тр}$ . Усилие, необходимое для преодоления этого момента, незначительно и им можно пренебречь. Так, например, при массе клетки  $Q=49$  кн (5000 кг), диаметре шарнира  $d=100$  мм, коэффициенте трения в шарнире  $\mu=0,003$  и  $l_3=300$  мм

$$\Delta N_x = \frac{Qd\mu}{l_3} = \frac{5000 \cdot 10 \cdot 0,003}{30} = 45 \text{ н (5 кг)},$$

что составляет 0,1% от массы рабочей клетки.

Натяжение прокатываемого металла между качающимися клетями непрерывного стана найдем по измерению горизонтальных реакций  $P_n$  и  $P_3$ , действующих на месдозы по оси прокатки, и горизонтальных составляющих  $N_n$  и  $N_3$  реакций, действующих на месдозы подвижных шарниров.

Результирующая натяжения (подпора) для каждой клетки

$$T_{n1} = P_1 - N_1 = T_1,$$

$$T_{32} + T_{n2} = P_2 - N_2 = T_2,$$

$$T_{33} + T_{n3} = P_3 - N_3 = T_3,$$

$$\dots \dots \dots$$

$$T_{3(n-1)} + T_{n(n-1)} = P_{n-1} - N_{n-1} = T_{n-1},$$

$$T_{3n} = P_n - N_n = T_n.$$

Подставляя значения  $T_{n1}$ ,  $T_{32} + T_{n2}$  и т. д. в уравнение (238), получим

$$\sum_{i=1}^n (P_i - N_i) = 0$$

или

$$T_1 + T_2 + T_3 + \dots + T_{n-1} + T_n = 0, \quad (249)$$

где  $T_1$  — результирующая сила натяжения (подпора) I клетки;  $T_2$  — то же, второй клетки и т. д.

Из уравнения (249) следует, что алгебраическая сумма результирующих сил натяжения или подпора в непрерывной группе клеток равна нулю. Поскольку сумма сил, действующих на полосу между двумя клетями, равна нулю, то, подставив в уравнение (240) результирующие силы, получим

$$T_1 + T_2 + T_3 + \dots + T_{i-1} + T_{3i} = 0, \quad (250)$$

откуда

$$T_1 + T_2 + T_3 + \dots + T_{i-1} = -T_{3i}. \quad (251)$$

Следовательно, определив результирующие силы по показаниям месдоз, легко найти натяжение (подпор) прокатываемой полосы между двумя смежными клетями.

Экспериментальная проверка нового способа измерения натяжения проведена в Институте черной металлургии на непрерывном лабораторном стане 60. Стан (рис. 100) состоит из трех

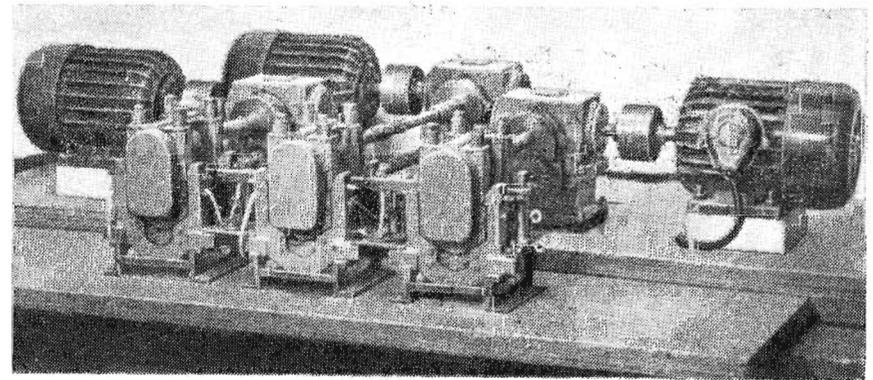


Рис. 100. Лабораторный непрерывный стан с качающимися клетями

качающихся клеток, установленных на общем основании. Каждая клеть снабжена отдельным приводом, включающим электродвигатель, редуктор, шестеренную клеть и универсальные шпиндели. Компонка стана позволяет вести прокатку с натяжением или подпором в одной, двух и трех клетях одновременно. Качающиеся клетки оснащены аппаратурой для измерения давления металла на валки, момента прокатки и межклетевого натяжения полосы. Шесть измерителей, установленных на уровне оси прокатки и верхнего подвижного шарнира, обеспечивают постоянный контроль величины и направления горизонтальных сил, действующих на качающуюся клеть.

Опытные данные, полученные при прокатке круга, квадрата и полосы на непрерывном лабораторном стане, подтверждают возможность измерения натяжения при помощи качающихся клеток с точностью 3—7%. Установка измерителей на уровне подвижного шарнира позволяет учесть влияние неравномерного распределения моментов между рабочими валками на натяжение прокатываемой полосы.

На основании опытных данных разработаны, изготовлены и находятся в стадии освоения жесткие качающиеся клетки для

мелкосортного стана 260 металлургического завода им. Коминтерна. Измерение и автоматическое регулирование межклетевого натяжения с помощью жестких качающихся клеток дает возможность получить сортовой прокат с допусками  $\pm 0,15$  мм и сэкономить 2—3% металла.

На непрерывно-заготовочных станах и в черновых группах непрерывных сортовых станов, где образование петли и перегибов раската недопустимо, целесообразно постоянно регулировать межклетевое натяжение.

Межклетевое натяжение на непрерывно-заготовочных станах и в черновых группах непрерывных сортовых станов измеряют с

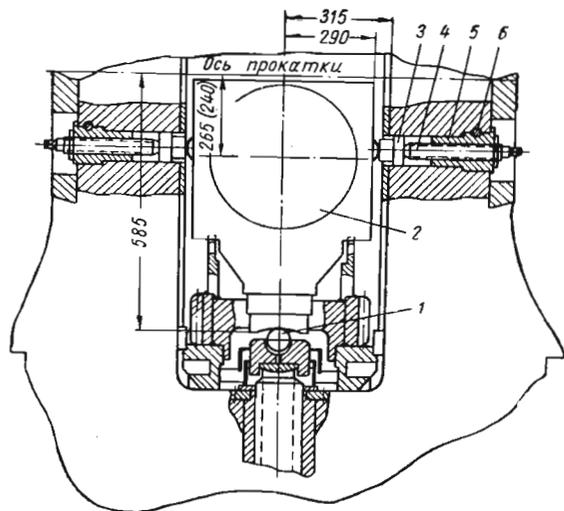


Рис. 101. Конструкция устройства для замера натяжения на непрерывно-заготовочном стане

помощью фиксирования боковых сил, действующих на подушки [93, 94, 95]. Для этого нижняя подушка клетки установлена на цилиндрической опоре, а между подушкой и станиной имеются зазоры, обеспечивающие возможность поворота подушки относительно опоры. Под действием горизонтальных сил подушка стремится повернуться. Однако этому повороту препятствуют месдозы, установленные с обеих сторон подушки и воспринимающие усилия натяжения. Таким методом измеряется разность переднего и заднего натяжений в клетке. При известной величине этой разности для каждой клетки можно подсчитать натяжение прокатываемой полосы.

Конструкция устройства, предназначенного для измерения натяжения на непрерывно-заготовочном стане, показана на рис. 101. Подушка 2 через опорную гайку опирается на цилиндр 1. Сопряжение опоры подушки и цилиндра осуществляет-

ся по двум цилиндрическим поверхностям радиусом 40 и 90 мм. Это обеспечивает устойчивое положение подушки и препятствует ее перемещению в горизонтальной плоскости под действием толчков и вибраций. В отверстиях станины с обеих сторон от подушки установлены две месдозы 3, воспринимающие усилие натяжения. Подушка при регулировке может перемещаться на 15 мм в вертикальном направлении. На эту же величину будут перемещаться точки приложения сил на поверхности месдоз. Изменение точки приложения силы не должно влиять на работу месдоз. Это будет достигнуто, если отношение высоты рабочего элемента месдозы к ее диаметру будет достаточно велико.

С помощью нажимных винтов 4 месдозы предварительно прижаты к подушке. Этими же винтами осуществляется установка подушки так, чтобы несовпадение осей валка и нажимного винта не превышало 1 мм. Во время перевалки валков винты 4 отвинчивают на несколько оборотов. Месдозы можно заменять быстро, не вынимая подушки из станины. Для этого необходимо извлечь шпильку 6 и гайку 5 с винтом 4, а затем месдозу.

Материалом цилиндра 1 может служить сталь ШХ15, подвергаемая термической обработке, при этом будет обеспечена достаточная прочность поверхности контакта.

В качестве силоизмерительного элемента могут быть использованы датчики сопротивления, индуктивные и магнитоупругие датчики. Поскольку элементы должны быть достаточно чувствительными. Обычно рабочие элементы выполняют в виде пустотелых цилиндров, на поверхности которых наклеивают датчики сопротивления.

Индуктивные датчики, применяемые при измерениях натяжения, имеют ряд преимуществ по сравнению с датчиками сопротивления. Так, индуктивные датчики конструкции ЦНИИТМАШа могут работать токами промышленной частоты и иметь достаточный по величине выходной сигнал. Этот сигнал может быть использован не только для записи на пленку осциллографа или для работы показывающего прибора, но и применен в системах автоматического регулирования.

Для оценки возможности применения способа измерения натяжения с помощью фиксации боковых сил Южуралмашзавод и Челябинский политехнический институт провели исследование энергосиловых параметров на черновой группе непрерывного сортового стана 300-2 Челябинского металлургического завода. При исследовании измеряли натяжения и давления на всех пяти горизонтальных клетях с помощью магнитоупругих месдоз.

Опыты показали, что магнитоупругие месдозы являются надежными датчиками давлений и натяжений. Они просты по конструкции и не требуют специальной усилительной аппаратуры. На точность их работы практически не влияет влажность и температура (до 150°C).

При измерении натяжения на показания мессдоз может оказывать влияние усилие прокатки, если ось нижнего валка не совпадает с осью нажимного винта, а также неравномерное распределение крутящих моментов между рабочими валками. Точность замеров величины натяжения по приведенному способу равна 15—20%.

### ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ ПРОКАТКИ

Скорость прокатки сортовых и фасонных профилей за последние годы возрастает. На непрерывных станах скорость достигает 35—40 м/сек при прокатке катанки и 15—25 м/сек при прокатке сорта. Следует ожидать, что в дальнейшем на станах бесконечной прокатки она будет увеличена.

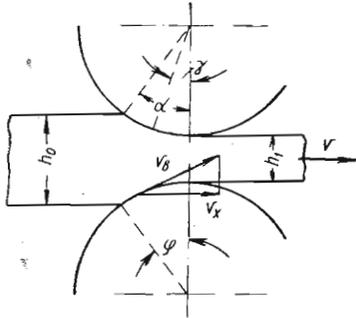


Рис. 102. Окружная скорость валков и скорость прокатываемой полосы

При известной величине скорости движения полосы между клетями непрерывного стана прокатку можно вести с регулируемым натяжением, своевременно воздействовать на привод рабочих валков и автоматизировать работу стана.

Известно, что средняя скорость движения прокатываемого металла в очаге деформации не постоянна. Горизонтальная проекция окружной скорости любой точки поверхности валка при изменении угла  $\varphi$  в пределах  $\varphi \div \alpha$  (рис. 102) больше средней скорости движения прокатываемого металла, т. е.

$$v_b \cos \varphi > v_{x \text{ ср}} \quad (252)$$

где  $v_b$  — окружная скорость валка;  
 $v_{x \text{ ср}}$  — средняя скорость движения металла.

При изменении угла  $\varphi$  в пределах  $\varphi \div 0$  средняя скорость движения металла больше горизонтальной проекции окружной скорости валка:

$$v_b \cos \varphi < v_{x \text{ ср}} \quad (253)$$

Только в нейтральном сечении ( $\varphi = \alpha$ ) скорости движения металла и валков равны.

При выходе из очага деформации металл скользит по поверхности валков в сторону их вращения и опережает валки. В зависимости от величины опережения изменяется в конечном итоге и скорость прокатки.

Обычно скорость прокатки на гладких валках определяют по уравнению

$$v = v_b \lambda, \quad (254)$$

где  $\lambda$  — коэффициент опережения.

Для калиброванных валков скорость прокатки может быть отнесена к любой точке калибра. В этом случае скорость выхода металла из валков может быть приближенно определена как средняя окружная скорость в калибре  $v_c$ , умноженная на усредненный коэффициент опережения  $\lambda_c$ , т. е.

$$v = v_c \lambda_c \quad (255)$$

Среднюю окружную скорость в калибре вычисляют по формуле

$$v_c = \frac{\pi D_c n}{60}, \quad (256)$$

где  $D_c$  — средний катающий диаметр валка, определяемый как разность между идеальным диаметром и средней высотой калибра;

$n$  — число оборотов валков в минуту.

Поскольку величины опережения и катающего диаметра непостоянны, точно рассчитать скорость выхода прокатываемой полосы из калиброванных валков довольно трудно.

Для измерения скорости прокатки используют тахогенератор, механически связанный с валками рабочей клетки, однако погрешность измерения при этом составляет несколько процентов.

Более точное измерение скорости движения проката осуществляют с помощью метода магнитных меток. По этому методу магнитные метки, наносимые на движущуюся стальную полосу специальной записывающей головкой, воспринимаются воспроизводящей головкой, находящейся на определенном расстоянии от записывающей. Частота воспринимаемых меток пропорциональна скорости металла. Несмотря на высокую точность измерений (погрешность измерения не превышает 0,1% в диапазоне скоростей 0,75—12 м/сек) метод магнитных меток пока не получил распространения из-за трудности поддержания постоянного зазора между поверхностью металла и считывающими головками. Кроме того, он может быть применен только при холодной прокатке стали, так как температура металла при горячей прокатке превышает точку Кюри (770°C).

Для замера скорости движения полосы в лабораторных и промышленных условиях применяют измеритель-вертушку. Измеритель (рис. 103) представляет собой трубчатый корпус 2, внутри которого вращается вал, опирающийся на подшипники качения. На одном конце вала насажен рифленый ролик 1 диаметром 80 мм, на другом — контактный диск 4 с врезанной в него пластинкой из изоляционного материала. На корпусе укреп-

лен изолированный электросъемник 3, щетка которого скользит по окружности контактного диска. Электросъемник, контактный диск, дополнительное сопротивление 7 и шлейф осциллографа 6 составляют электрическую цепь, питаемую сухим элементом 5.

Во время замеров рифлений ролик прижимается к прокатываемой полосе и передает вращение контактному диску. При каждом обороте контактного диска изоляционная пластинка последнего, набегающая на щетку, размыкает электрическую цепь, и шлейф

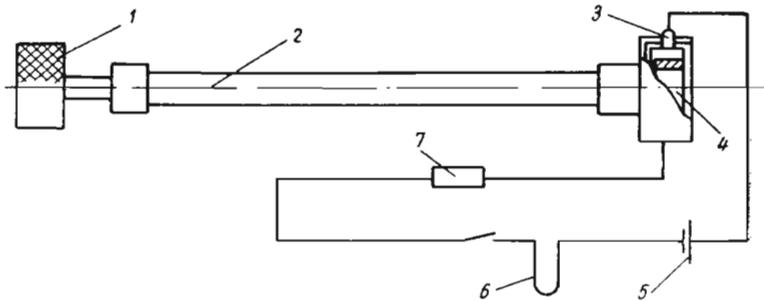


Рис. 103. Схема контактного измерителя скорости движения полосы

осциллографа делает отметку на пленке. Зная скорость движения пленки осциллографа и число отметок, определяют скорость движения прокатываемой полосы по формуле

$$v = \frac{\pi dz v_n}{L} \text{ м/сек,} \quad (257)$$

где  $d$  — диаметр ролика, м;

$z$  — число отметок;

$v_n$  — скорость движения пленки, м/сек;

$L$  — длина пленки, м.

Проскальзывание контактного ролика и значительные вибрации движущейся полосы затрудняют измерение скоростей прокатки, превышающих 15 м/сек.

На рис. 104 схематически изображено устройство для бесконтактного измерения скорости движения прокатываемой полосы [96]. Устройство состоит из статора 12, измерительной пластины 2, которая закреплена на оси 5 через двуплечий рычаг 6 со спиральной пружиной 4 и расположена в коробке 3 из непроводящего материала, фазового датчика 7, генератора высокой частоты 8, фазочувствительного выпрямителя 9, генератора 10 низкой частоты и измерительного прибора 11.

Статор 12 находится под прокатываемой полосой 1 и питается трехфазным током. Пластина 2 помещена в коробку 3 для того, чтобы исключить влияние потока воздуха, вызываемого движением прокатываемой полосы. Бегущее поле статора движется

относительно полосы со скоростью  $v_6$  и индуцирует в ней вихревые токи, экранирующие поле статора. Поэтому вращающий момент, действующий на пластину, зависит от скорости полосы  $v_n$ . При равенстве скоростей движения поля и полосы ( $v_6 = v_n$ ) вращающий момент достигает максимума, и смещение пластины будет наибольшим.

Противодействующий момент системы создается при помощи спиральной пружины. Чувствительность устройства повышается за счет перемещения пластины с помощью рычажных или зубча-

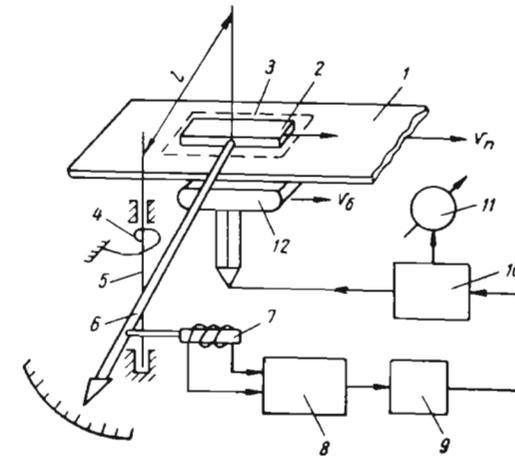


Рис. 104. Схема устройства для бесконтактного измерения скорости движения прокатываемой полосы

тых передач. Максимальное смещение пластины с помощью чувствительного индуктивно-фазового датчика 7 преобразуется в электрические сигналы, используемые для управления частотой генератора 10, питающего обмотки статора 12.

Подстройка частоты генератора 10 осуществляется так, чтобы  $v_6 = v_n$ . В этом случае частота тока генератора пропорциональна скорости движения прокатываемой полосы. В устройстве используется силовая функция бегущего поля, что исключает влияние пульсирующих составляющих поля на работу системы. Следовательно, абсолютная скорость движения полосы определяется без контакта устройства с прокатываемым металлом.

Для бесконтактного измерения скорости движения проката предложены также устройства, принцип действия которых основан на явлении возникновения электродвижущей силы в катушках постоянных магнитов при прохождении полосы через их полюсы. При этом используется эффект изменения величины магнитного потока, проходящего через полосу при наличии ее ускорения.

В последние годы в СССР и за рубежом ведутся работы по разработке нового бесконтактного метода измерения скорости, основанного на автоматическом вычислении взаимной корреляционной функции двух отраженных сигналов, получаемых с двух точек движущейся поверхности, и на определении временного сдвига между этими сигналами. Этот метод, получивший название корреляционного, оказался весьма перспективным. К достоинствам корреляционных измерителей скорости следует отнести их бесконтактность, высокую точность измерения скорости (при скорости движения металла 2,5 м/сек погрешность измерения составляет  $\sim 0,1\%$ ) и возможность создания на их основе автоматических измерительных систем и систем автоматического регулирования.

Корреляционный метод измерения скорости проката предложен Британской научно-исследовательской ассоциацией стали и железа [97]. Этот метод может быть использован для измерения скорости как холодного, так и горячего проката. Кроме того, в связи с тем, что при измерении не требуется контакта с движущейся поверхностью и не предъявляется никаких требований к ее магнитным и электрическим свойствам, он может быть использован также для измерения скорости движения цветных металлов: алюминия, меди.

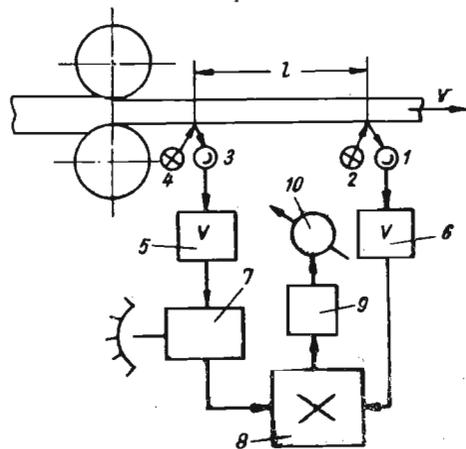


Рис. 105. Блок-схема корреляционного измерителя скорости движения проката

Несмотря на то что этот метод первоначально разрабатывался для определения отношения скоростей движения полосы на входе и выходе из валков, он пригоден и для измерения абсолютной скорости в широком диапазоне — от 0,5 до 50 м/сек.

Сущность корреляционного метода измерения скорости движения проката состоит в следующем (рис. 105). На поверхности металла, движущегося со скоростью  $v$ , при помощи двух осветителей с линейными нитями накаливания 2 и 4 через оптическую систему проектируются два ярких резких световых штриха, оси которых перпендикулярны направлению движения полосы. Штрихи расположены вдоль по направлению прокатки на фиксированном расстоянии  $l$  один от другого.

Вследствие различных структурных неоднородностей поверхности металла, наличия на поверхности металла трещин, пятен и окалины яркость штрихов изменяется. Изображения штрихов вос-

принимаются приемной оптической системой и проектируются на катоды двух фотоэлементов 1 и 3, с которых снимаются сигналы, пропорциональные яркости каждого из штрихов. Усилители 5 и 6 усиливают эти сигналы до уровня, достаточного для нормальной работы коррелятора, состоящего из блока регулируемого запаздывания (БРЗ) 7, множительного устройства 8 и интегратора (или сглаживающего фильтра) 9.

Поскольку второй штрих смещен относительно первого в направлении прокатки на расстояние  $l$ , то сигнал  $f_1(t)$ , характеризующий яркость первого штриха, повторится на втором штрихе с некоторым транспортным запаздыванием  $\tau_T$ , прямо пропорциональным расстоянию  $l$  между штрихами и обратно пропорциональным скорости движения проката  $v$ :

$$\tau_T = \frac{l}{v}. \quad (258)$$

Второй сигнал  $f_2(t)$  через интервал  $\tau_T$  по форме будет близок к первому сигналу:

$$f_2(t) \approx f_1(t - \tau_T).$$

При достаточно малом расстоянии между штрихами и параллельности их осей, при отсутствии поперечных смещений полосы и одинаковых характеристиках усилителей оба сигнала были бы идентичными. В реальных условиях сигналы хотя и близки по форме, но все же несколько отличаются друг от друга.

В канал первого сигнала включен БРЗ, который может быть выполнен, например, в виде магнитной ленты или магнитного барабана с подвижной читающей головкой, устанавливаемой при помощи ходового винта. Выходной сигнал коррелятора представляет собой взаимную корреляционную функцию сигналов  $f'_1(t) = f_1(t - \tau)$  и  $f_2(t) = f_1(t - \tau_T)$ . Выходной сигнал коррелятора максимален при  $\tau = \tau_T$ , т. е. при равенстве введенного регулируемого запаздывания  $\tau$  транспортному запаздыванию сигнала второго фотоэлемента. Изменяя величину регулируемого запаздывания  $\tau$ , получают максимальные показания индикатора 10 и тем самым обеспечивают условие  $\tau = \tau_T$ . Учитывая, что при фиксированном расстоянии между штрихами  $l$  транспортное запаздывание однозначно связано со скоростью  $v$ , можно по показанию БРЗ определить скорость движения металла, так как

$$v = \frac{l}{\tau}. \quad (259)$$

Шкалу БРЗ можно проградуировать непосредственно в единицах измерения скорости.

Кроме описанной схемы для определения корреляционной функции непрерывным перемножением входных сигналов, можно также применять схему, в которой перемножение сигналов заменяется их вычитанием или суммированием с последующим возведением в квадрат.

В Институте электротехники АН УССР разработана дифференциальная схема автоматического корреляционного измерителя скорости движения полосы, которая позволяет упростить аппаратуру коррелятора и обеспечить надежную его работу.

На рис. 106 приведена блок-схема корреляционного измерителя скорости проката по дифференциальной схеме с БРЗ, исполь-

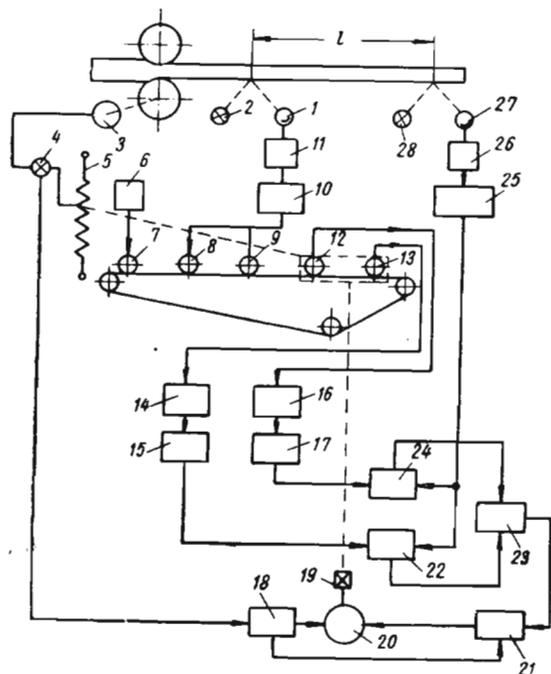


Рис. 106. Блок-схема корреляционного измерителя скорости проката с блоком регулируемого запаздывания, использующим магнитную запись сигнала

зующим магнитную запись [97]. Устройство работает следующим образом.

Снимаемый с фотодатчика 1 непрерывный сигнал осветителя 2 усиливается предварительным усилителем 11 и подается на вход усилителя записи 10. Нагрузкой усилителя записи являются две записывающие головки для двухдорожечной записи 8 и 9. Считанный при помощи головок воспроизведения 12 и 13 сигнал усиливается усилителями воспроизведения 16 и 14 и несколько раз подвергается поочередному усилению и ограничению в усилителях-ограничителях 17 и 15 для получения сигнала с большой крутизной фронта.

В описываемой схеме сигнал со второго фотодатчика 27 усиливается и ограничивается усилителями 25 и 26 без предвари-

тельной записи на ленту. Однако в последнем варианте схемы предусмотрен дополнительный канал записи и воспроизведения этого сигнала, делающий выходной сигнал коррелятора более симметричным и позволяющий измерять более высокие скорости металла. При отсутствии этого канала записи предельная измеряемая скорость ограничивалась минимальным расстоянием между головками записи и воспроизведения БРЗ.

Изменение запаздывания  $\tau$  осуществляется до формирования сигнала смещением блока читающих головок относительно записывающих головок 8 и 9 при помощи ходового винта. Вращение ходового винта может осуществляться как вручную, так и при помощи исполнительного двигателя 20, работающего от сигнала рассогласования двух каналов коррелятора, который выполнен по дифференциальной схеме.

Магнитная запись в БРЗ ведется одновременно на две дорожки непрерывного кольца стандартной магнитной ленты (ширина 6,35 мм, тип 2), протягиваемой со скоростью 381 мм/сек. Применение двухдорожечной записи позволяет получить небольшое дополнительное постоянное запаздывание  $\Delta\tau = \tau_1 - \tau_2$ , необходимое для работы дифференциальной схемы. Предварительное стирание записи на обеих дорожках производится одновременно при помощи одной одноканальной стирающей головки 7, питаемой током генератора 6 с частотой 70 кГц. Удовлетворительное стирание записи может быть получено и при помощи цилиндрических постоянных магнитов, одновременно служащих направляющими колонками для магнитной ленты.

Сигналы обоих каналов коррелятора, а также сигнал второго фотодатчика подаются на схемы совпадения 24 и 22. Разность выходных сигналов схем совпадения, получаемая на выходе вычитающего устройства 23, усиливается усилителем 21 и подается на исполнительный двигатель 20, вал которого через редуктор 19 вращает ходовой винт блока считывающих головок до отыскания максимума корреляционной функции и достижения равновесия схемы. После этого скорость движения проката определяют по положению блока считывающих головок.

Лента протягивается однофазным синхронно-реактивным конденсаторным двигателем ДВС-VI. Очень важно, чтобы лента двигалась равномерно, без быстрых продольных колебаний. При скорости движения ленты 381 мм/сек одна половина сигнала с частотой 2000 гц составляет  $\sim 0,1$  мм. Следовательно, на частоте 2000 гц продольные колебания ленты с амплитудой 0,1 мм привели бы к тому, что вместо полного совпадения импульсов и максимального сигнала на выходе схемы был бы получен сигнал минимального совпадения. Поэтому при конструировании блока регулируемого запаздывания уделено большое внимание стабилизации скорости ленты. Для стабилизации скорости протягивания ленты на оси ведущего валика предусмотрен маховик, а лентопротяжный тракт упрощен за счет уменьшения числа направля-

ющих роликов. Устройство может записывать входные сигналы как на замкнутое кольцо магнитной ленты, так и на кассету емкостью 500 м.

Во время предварительных опытов в лаборатории световые штрихи проектировались на диаметрально противоположные края стального диска, приводимого во вращение электродвигателем.

Оптический блок лабораторного макета включает осветители, фотодатчики и их оптику. Осветители и фотодатчики снабжены длиннофокусной оптикой ( $F=40$  см), позволяющей поместить оптический блок на достаточном удалении от движущегося металла. В качестве осветителей применены лампы накаливания (12 в, 40 вт) с прямой нитью  $8 \times 1,2$  мм, в качестве фотодатчиков — фотоумножители ФЭУ-2. Тубусы фотодатчиков снабжены щелевой диафрагмой в плоскости изображения для регулирования толщины воспринимаемого светового штриха. Размер светового штриха на металле  $\sim 10 \times 1,5$  мм. Фотодатчики помещены в зеркальноотраженном луче осветителей. Плоскость, проходящая через нить накала осветителя, световой штрих и фотодатчик, перпендикулярна направлению движения полосы проката, благодаря чему уменьшается влияние вертикальных колебаний прокатываемой полосы на величину расстояния между штрихами и резкость последних.

В связи с тем что пик корреляционной функции очень узок и при значительном начальном рассогласовании система сама не смогла бы его отыскать, к разработанной схеме была добавлена система грубого поиска экстремума, работающая от тахогенератора 3, который связан с валками прокатного стана. Выходное напряжение тахогенератора изменяется пропорционально скорости металла с точностью до нескольких процентов. Это напряжение на вычитающем устройстве 4 (поляризованное реле) сравнивается с напряжением, снимаемым с потенциометра 5, движок которого механически связан с блоком воспроизводящих головок. Положение блока головок в уравновешенной схеме должно соответствовать скорости металла. При значительном рассогласовании схемы, превышающем зону нечувствительности канала грубого поиска экстремума, исполнительный двигатель через контакты трехпозиционного реле управляется каналом грубого поиска. При этом возбуждается последовательно включенное реле 18 и отключает точный канал. Когда схема грубого поиска уравновешивается, начинает работать канал точного поиска экстремума, который при помощи контактов реле управляет исполнительным двигателем и окончательно устанавливает блок головок в правильное положение.

Кафедрой обработки металлов давлением Днепропетровского металлургического института под руководством инж. С. А. Ольдзиевского разработано устройство для измерения опережения и межклетевой деформации прокатываемого металла. В состав

устройства входят вычислительный блок и фотоимпульсные датчики, позволяющие замером числа оборотов валков и роликов, контактирующих с движущейся полосой, записывать непосредственно на пленку величину опережения. На основании замеров скорости  $v_1$  выхода полосы из предыдущей клетки непрерывного стана и скорости  $v_2$  входа полосы в последующую клетку осциллограф фиксирует на пленку межклетевую деформацию металла.

$$\epsilon = \frac{v_2 - v_1}{v_1} 100\% \quad (260)$$

На рис. 107 представлена блок-схема измерительного устройства, которое состоит из датчика 3 оборотов валков, датчика 2 скорости прокатываемой полосы на выходе из предыдущей кле-

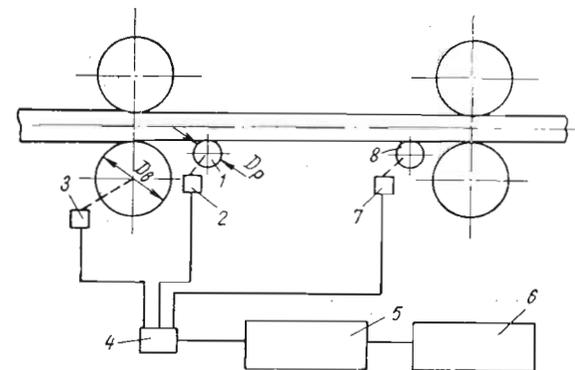


Рис. 107. Блок-схема устройства для замера опережения и межклетевой деформации металла

ти, датчика 7 скорости полосы на входе в последующую клетку, вычислительного блока 5, переключателя 4 и осциллографа 6 типа Н-102. Датчик оборотов валков установлен на крышке нижнего подшипника и соединен гибкой муфтой с торцом валка. Датчики скорости движения полосы закреплены на специальных стойках и соединены с контактными роликами 1 и 8. Все датчики снабжены дисками с отверстиями, равномерно расположенными по окружности, источниками света, фотодиодами и усилителями импульсов. Приборы собраны в герметическом корпусе, предохраняющем их от влаги, масла и др. вредных воздействий.

Принцип действия фотоимпульсного датчика заключается в следующем. При вращении диска происходит прерывание светового потока, идущего от источника света (лампы) к фотодиоду. В результате этого на выходе усилителя возникают электрические импульсы, частота которых зависит от числа оборотов диска и количества его отверстий:

$$f = \frac{zn}{60} = k_d n, \text{ гц}, \quad (261)$$

где  $k_d$  — постоянная датчика.

Подключение датчиков к вычислительному блоку производится поочередно с помощью переключателя 4. При замере опережения подключаются датчики 2 и 3, при замере межклетевой деформации — 2 и 7. Вычислительный блок позволяет получить на выходе ток, пропорциональный относительной разности частот датчиков:

$$I = k_6 \frac{f_2 - f_1}{f_2}, \quad (262)$$

где  $k_6$  — постоянная вычислительного блока.

Вычислительный блок имеет два предела измерения относительной разности частот: 15 и 30%. Выходной ток обоих пределов измерения составляет 1 mA, что позволяет регистрировать сигналы осциллографом. Проверка работы устройства в заводских условиях показала, что погрешность измерения опережения прокатываемого металла на непрерывном стане не превышает 2%.

Следует отметить, что подобное устройство и метод замера были предложены ранее Выдриным и др. [46] для исследования опережения на непрерывном мелкосортном стане.

#### АВТОМАТИЧЕСКАЯ НАСТРОЙКА КЛЕТЕЙ

Впервые в отечественной практике устройство для точной прокатки сортовых профилей было разработано и опробовано в производственных условиях А. П. Чекмаревым [18]. В основу устройства был положен принцип контроля зазора между валками и поддержания этого зазора постоянным автоматизацией работы нажимных винтов.

Устройство состоит из трех основных частей: следящего прибора, панели автоблокировки и нажимного механизма рабочей клетки. Следящий прибор при помощи скользящего рычажного или клинового устройства фиксирует величину зазора между валками, электрически преобразует полученный сигнал и передает его через панель автоблокировки исполнительной части установки — нажимному механизму.

Схема расположения устройства на стане показана на рис. 108. Контакты следящего прибора помещены в канавках верхнего и нижнего или верхнего и среднего валков. При прокатке профилей, не требующих кантовки перед последним проходом (уголки, балки, швеллеры, широкие полосы и т. д.), достаточно установить аппаратуру только на одной последней отделочной клетки. Канавки при этом делаются на верхнем и нижнем валках. При прокатке профилей с кантовкой перед последним проходом (круги, квадраты, узкие полосы при наличии

предпоследнего ребрового калибра и т. д.) аппаратура должна быть использована и в предпоследнем проходе, который на мелкосортных, проволочных и современных средне- и крупносортных станах осуществляется либо в отдельной предотделочной клетки дуо, либо в клетки трио. В последнем случае приборы должны быть установлены в канавках верхнего и среднего валков.

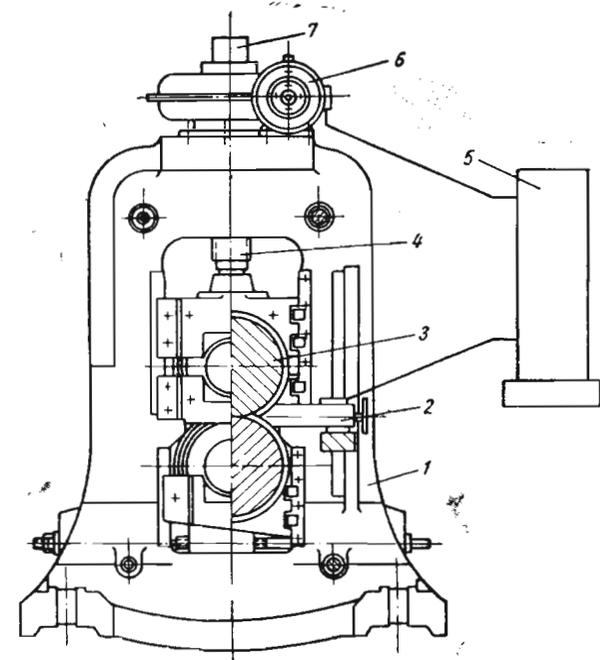


Рис. 108. Схема установки устройства для точной прокатки:

1 — станна; 2 — следящий прибор; 3 — валок; 4 — нажимный винт; 5 — панель автоблокировки; 6 — электродвигатель; 7 — редуктор нажимного механизма

Для передачи импульса соответствующая часть следящего прибора может быть выполнена в бесконтактном и контактном вариантах.

В последнем варианте следящий прибор имеет рычаг, конец которого снабжен контактной щеткой, скользящей по разрезанным контактным пластинам шкалы. При заданном (нормальном) зазоре между валками щетка касается среднего контакта, имеющего ширину, равную ширине щетки. Крайние контакты шкалы отделены от среднего узкой изоляционной прослойкой. При изменении определенного зазора между валками, а следовательно, при изменении высоты канавки, щетка перемещается вверх или вниз, посылая импульс в исполнительный механизм,

который регулирует раствор валков. Исполнительный механизм работает до тех пор, пока щетка снова не установится на среднем контакте, т. е. на нейтрали. При этом восстанавливается заданное расстояние между валками.

Первоначальное установление этого расстояния производится ручной настройкой следящего прибора; которая производится следующим образом. В начале работы настройка прокатной клетки производится вручную до тех пор, пока размер темплета металла не будет лежать в заданных пределах. Затем включаются сигнальные лампы полуавтоматической схемы, показывающие положение щетки на контактной шкале. Далее с помощью установочного штурвала в процессе прокатки производится перемещение шкалы до тех пор, пока щетки не совпадут со средним нейтральным контактом; при совпадении загорается зеленая сигнальная лампа.

После этого включается цепь автоблокировки, снова отбирается проба металла и происходит окончательная настройка следящего прибора вращением установочного штурвала. При работе стана периодически производят отбор проб проката, замеры этих проб и дальнейшую текущую настройку следящего устройства, которая позволяет учесть износ контактов, поверхности валков или калибров и устранить влияние этих факторов на изменение заданной толщины проката.

Работа двух следящих приборов должна обеспечить постоянную параллельность рабочих валков независимо от причин, которые могут воздействовать на каждую шейку валка (износ вкладышей подшипников, деформация станин и т. д.). Применение двух следящих приборов будет наиболее целесообразным в том случае, когда используются калибры, расположенные на концах бочки валков.

Первоначальная настройка стана с двумя следящими приборами в одной клетке сводится к тому, чтобы нулевое положение стрелки на контактной шкале каждого прибора соответствовало параллельности валков. Для этого замеряют зазоры при помощи щупов разной толщины во время вращения валков. Поворачивая установочный штурвал следящего прибора и одновременно замеряя щупом зазоры, можно добиться, чтобы величина их была одинаковой по длине валков. Постоянство зазоров будет поддерживаться автоматически после включения электрической цепи автоблокировки. Так как износ контактов следящих приборов может быть неодинаковым, то через определенные промежутки времени (один—два раза в смену) следует щупом проверить величину зазоров на концах бочки и в случае необходимости изменить ее при помощи поворота установочных штурвалов следящих приборов.

Для устройства, обеспечивающего точную прокатку, разработано несколько конструкций следящих приборов. Наиболее простой является конструкция клинового следящего прибора.

При этом на расстоянии 20—30 мм от торцов бочек валков диаметр уменьшается на 20—40 мм. На полученные ступеньки с задней стороны клетки заводится клин, имеющий небольшой уклон, соответствующий игре валков во время прокатки. Скользящие плоскости клина, изготовленные из износоустойчивого металла, распираются пружинами и прижимаются к валкам. Клин навинчен на стержень и удерживается от выталкивания из валков пружиной. Установка клина между валками регулируется штурвалом, насаженным на стержне, который навинчен в клин. При вращении штурвала клин получает продольное перемещение. На стержне укреплен шайба с пальцем и щеткой, скользящей по плоской шкале с контактами. Испытание этого следящего прибора дало хорошие результаты.

Исполнительный механизм установки для точной прокатки представляет собой электропривод нажимного механизма, состоящий из электродвигателя, редуктора и нажимного винта. При регулировании валков в процессе прокатки винты должны поворачиваться на угол порядка  $\sim 20^\circ$ . Поэтому необходимо применить редуктор с большим передаточным числом, достигающим до 1000. Такое передаточное число имеют редукторы с двумя червячными парами или червячно-цилиндрические с двумя цилиндрическими ступенями. Выбранный вначале для мелко-сортного стана редуктор имел две червячных и одну цилиндрическую пару с общим передаточным числом около 2500. Это позволило установить электродвигатель мощностью 1,5 квт. Работа этого нажимного механизма показала, что для сокращения периода установки верхнего валка до 0,1—0,2 сек, вместо 0,4—0,5 сек, целесообразно снизить передаточное число до 700—900 и соответственно повысить мощность электродвигателя.

Следящий прибор имеет скользящий контакт (шкала, щетка), подводящие и отводящие проводники, изоляционные пластины и другие детали, которые находятся постоянно под воздействием влаги. Поэтому для электрической цепи следящего прибора выбрали напряжение 12 в. Такое малое напряжение, получаемое трансформированием и выпрямлением переменного тока, гарантирует минимальное подгорание контактов шкалы и удовлетворяет требованиям техники безопасности.

В зависимости от положения щетки следящего прибора включается одно из трех первичных реле: при заданном зазоре, при отклонении его на плюс и на минус. Для производственных условий разработаны электрические схемы управления как на постоянном, так и на переменном токе.

На рис. 109 представлена схема автоблокировки аппаратуры, обеспечивающей точную прокатку для клинового следящего прибора и нажимного механизма серийным электродвигателем, питающимся от напряжения 220 в. Имеется пусковое сопротивление и две ступени сопротивления ускорения. Торможение электродвигателя (для сокращения времени регулирования) произ-

водится противотоком, так как этот тип торможения обеспечивает быструю и полную остановку мотора. В качестве тормозного сопротивления используется пусковое сопротивление. Панелью служит панель кранового типа. В схему включены сигнальные лампы: зеленая, красная и желтая. Предусмотрено кнопчное

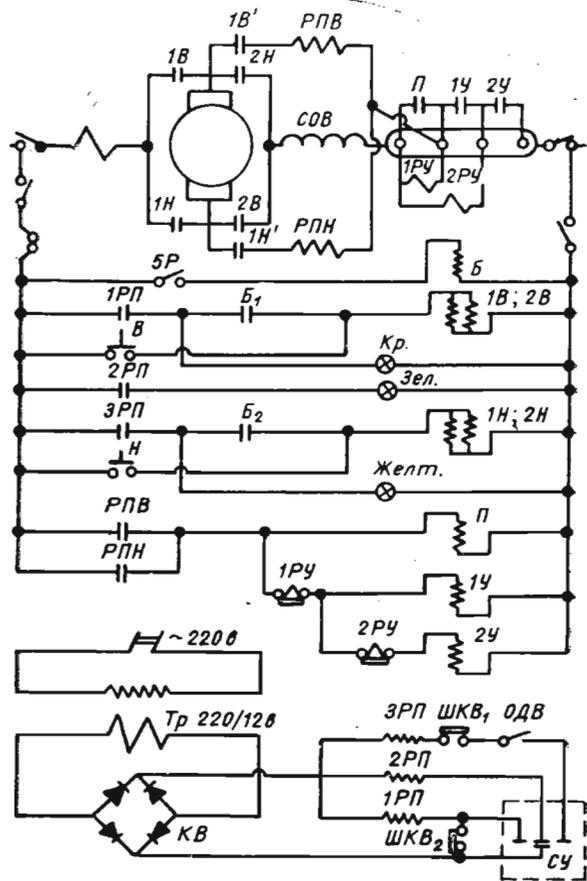


Рис. 109. Электрическая схема автоблокировки аппаратуры для точной прокатки

управление электродвигателем при неработающем следящем приборе. Для предохранения от перегрузки имеется максимальное реле. Рассмотрим работу схемы во всех возможных вариантах.

1. Следящий прибор СУ, питающийся от выпрямителя КВ, не работает: осуществляется кнопчное управление электродвигателем нажимного механизма для первоначальной настройки валков на заданный зазор. Линейный контактор Б отключен, и его

контакты  $B_1$  и  $B_2$  разомкнуты. Необходимо оперировать кнопками В (кнопка «ход вперед») и Н (кнопка «ход назад»). Кнопки не зашунтированы, и во время работы электродвигателя их нужно держать нажатыми. Торможение осуществляется противотоком с помощью переключения и своевременного отпускания кнопки.

2. Подвижный контакт следящего прибора установился против среднего неподвижного контакта (нулевое положение). Электродвигатель не работает. В цепи следящего прибора включено первичное реле 2РП. Оно замкнуло свой контакт во вспомогательной цепи 2РП и включило зеленую лампу.

3. Подвижный контакт следящего прибора установился против переднего неподвижного контакта (ход вперед). В цепи следящего прибора включено первичное реле 1РП. Оно замкнуло свой контакт во вспомогательной цепи 1РП. Через линейный контактор 1В, 2В пошел ток. Контактор включил контакты 1В и 2В в рабочей цепи. Ток пошел через якорь и обмотку возбуждения на сопротивление, а также через блок-контакт на катушку реле торможения противотоком при ходе вперед РПВ. Она замкнула контакт РПВ во вспомогательной цепи. Ток идет через контактор П, который включает свой контакт П, шунтирующий пусковое сопротивление. Однако во включенной параллельно пусковому сопротивлению катушке реле времени 1РУ ток течет еще некоторое время. Когда выдержка времени окончится, реле времени 1РУ замкнет контакт 1У во вспомогательной цепи. Ток пойдет через контактор 1У, который замкнет контакт 1У, шунтирующий первую ступень сопротивления ускорения. С соответствующей выдержкой срабатывает реле времени 2РУ, замыкающее свой контактор 2РУ. Через контактор 2У пойдет ток. Контактор замкнет контакт 2У и выключит вторую ступень пускового сопротивления. Электродвигатель пущен.

4. Подвижный контакт резко передвинулся на задний неподвижный. Производится торможение противотоком, и разгон двигателя в обратном направлении. Смещение подвижного контакта разомкнуло цепь первичного реле 1РП. Оно обесточилось и разомкнуло свой контакт 1РП во вспомогательной цепи. Линейный контактор 1В, 2В обесточился и выключил свои контакты 1В, 2В и 1В'. Ток в рабочей цепи оборвался. Но якорь продолжает вращаться, и в его обмотке возникает противоэлектродвижущая сила. Подвижный контакт при движении назад вошел в соприкосновение с задним неподвижным контактом и выключил первичное реле 3РП. Оно замкнуло контакт 3РП во вспомогательной цепи. Ток пошел через линейный контактор 1Н, 2Н. Его контакты 1Н, 2Н, 1Н' замкнулись. В рабочую цепь дан противоток, напряжение которого складывается с электродвижущей силой. Течет большой тормозной ток. Так как ток в обмотке возбуждения течет в прежнем направлении, создается тормозной момент и двигатель останавливается.

Предохранением от слишком большой силы тока, опасной для обмотки, является сопротивление противотока, включенное последовательно в цепь якоря. В данном случае в качестве сопротивления противотока используется пусковое сопротивление. Противоток через блок-контакт  $1N'$  течет по катушке реле торможения противотоком для хода назад  $РПН$ . Пока противоток слаб, катушка не может сработать; как только противоток достигает 80% номинальной силы тока, катушка  $РПН$  включает контакт  $РПН$  во вспомогательной цепи. Сработал контактор  $П$  и пусковое сопротивление зашунтировалось. Таким образом, пусковое сопротивление включается в момент почти полной остановки электродвигателя. Дальше происходит разгон электродвигателя в обратном направлении с последовательным включением ступеней сопротивления ускорения.

5. Подвижный контакт установился против заднего неподвижного. Производится запуск электродвигателя. Работа схемы аналогична описанной в пункте 3.

6. Подвижный контакт передвинулся с заднего на передний неподвижный. Производится реверс электродвигателя. Работа схемы аналогична описанной в пункте 4.

7. Подвижный контакт отодвинулся в крайнее заднее положение. Это произойдет тогда, когда верхний валок резко опустится на нижний при выходе металла из валков. В этом случае нельзя допустить подъема винтов, так как при входе переднего конца следующего раската зазор между валками резко увеличится, что потребует длительной регулировки, а передняя часть прокатанной штанги выйдет из установленных допусков. Поэтому предусмотрено выключение всей схемы в крайнем заднем положении контакта. Второй вариант схемы предусматривает выключение схемы от шпиндельного конечного выключателя  $ШВК_1$ , выключающего первичное реле  $ЗРП$  в реле следящего прибора. Для торможения электродвигателя служит другой контакт шпиндельного конечного выключателя  $ШКВ_2$ , который включен в сеть следящего прибора и замыкает цепь первичного реле  $ИРП$ , минуя следящий прибор.

Результаты работы автоматической установки для точной прокатки показали возможность получения готовых профилей с допусками порядка  $\pm 0,1 \div 0,07$  мм, т. е. с точностью в 5 раз большей, чем в обычных условиях ручной настройки стана при прокатке кругов и квадратов от 18 до 32 мм, полос шириной от 30 до 60 мм и толщиной от 4 до 20 мм.

В трубном производстве получение проката по минимальным допускам на автоматических станах достигают обеспечением одинаковой температуры металла по всей длине гильзы, а также специальной настройкой рабочих клеток, позволяющей автоматически регулировать толщину стенки труб во время прокатки. Для автоматического регулирования толщины стенки труб раз-

работана конструкция регулятора настройки, которая обеспечивает сохранение заданного зазора между рабочими валками.

Регулятор настройки, предложенный Я. Л. Ваткиным [98], имеет следующее устройство. На стойку рабочей клетки, к которой крепится пневматический цилиндр клина подъема верхнего валка, установлен вертикальный пневматический цилиндр. В серье штока поршня этого цилиндра шарнирно закреплены концы тяг, вторые концы которых также шарнирно закреплены на рычагах, имеющих внутри втулок трехзаходную резьбу с шагом, равным 80 мм. Такая же нарезка выполнена на существующих тягах клинового устройства, которыми в настоящее время крепится горизонтальный пневматический цилиндр к станине клетки. Своими торцовыми плоскостями рычаги с резьбой упираются в торцы существующей траверсы клина.

При перемещении вверх поршень пневматического цилиндра поворачивает рычаги в пределах  $35-40^\circ$ , которые продвинулись вперед по нарезке и продвинут траверсу и клин. При этом у верхнего валка появляется возможность подняться и увеличить зазор между валками на заранее заданную величину. Ход поршня вертикального пневматического цилиндра обеспечивает выдвижение поршня на 12—15 мм при угле наклона клина  $4^\circ 36'$ , что позволяет валку подниматься на величину  $\sim 1$  мм. Между нижними рычагами укреплен масляный цилиндр, который служит демпфером.

Проушины на конце цилиндра и штока поршня шарнирно скреплены с концами нижних рычагов. При повороте рычагов поршень должен переместиться внутри цилиндра демпфера и вытеснить масло из одной полости цилиндра в другую, которые соединены между собой. Скорость перетекания масла регулируется вентилем. Открывая или прикрывая отверстие регулировочного вентиля, регулируют скорость перемещения поршня и тем самым — время поворота рычагов на максимальный угол. Такой регулировкой можно получить заданную величину подъема верхнего валка или увеличение зазора между валками за время от начала до конца прокатки.

Регулятор настройки был смонтирован и опробован на автоматическом стане. При опробовании выяснилось, что регулятор настройки удовлетворяет поставленным перед ним требованиям. При задаче трубы автоматически вытаскивается клин, и калибр раскрывается на величину до 0,6 мм. Даже такое небольшое открытие калибра дает сохранение размеров задних концов труб в требуемых допусках.

При прокатке 579 труб диаметром  $89 \times 3,5$  мм с регулятором настройки и 648 труб таких же размеров без него оказалось, что брак по разнотолщинности стенок задних концов в первом случае составлял 1,7%, а во втором — соответственно 6,42%. Постоянно действующая конструкция регулятора настройки позволяет не только снизить величину продольной разностенности, но

и вести настройку стана по минимальным допускам, не опасаясь того, что задние концы труб могут выйти за пределы минимальных допусков по стенке.

Гидравлический нажимной механизм прокатной клетки предложен в работе [99]. Механизм позволяет автоматически поддерживать установленный зазор между валками, что обеспечивает повышение точности прокатки, причем возникающие изменения давления не влияют на величину раствора валков. Установочные операции производятся автоматической системой, позволяющей переходить от работы с постоянным раствором валков к работе с постоянным давлением прокатки. Необходимое давление на каждом из нажимных винтов можно установить независимо с помощью регулировочных клапанов. Величина раствора валков регулируется управляющим поршнем, который нагружен настолько, что требуемый зазор можно установить вручную или электродвигателем. Механизм для установки валков может работать с программным управлением, если необходимо произвести

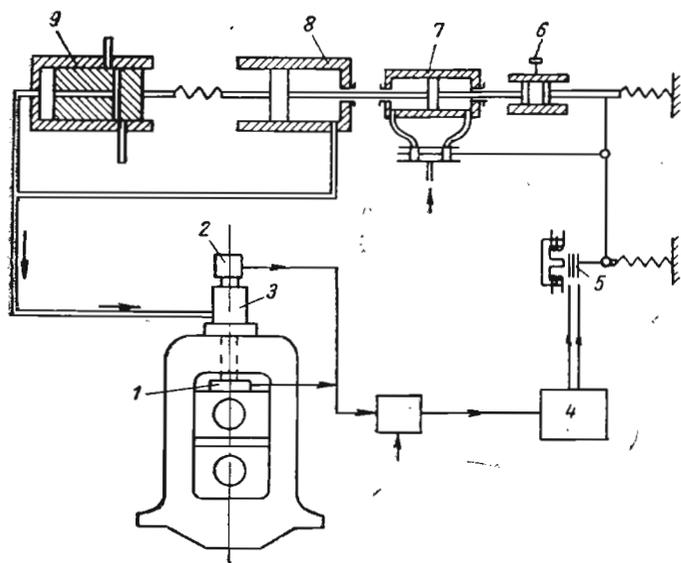


Рис. 110. Схема гидравлического регулятора толщины прокатываемой полосы

прокатку различных профилей с переменной по длине толщиной. Специальный предохранительный клапан защищает клетку от перегрузки. Точность размеров проката, которую можно получить при работе клетки с гидравлическим нажимным устройством, не приведена.

В Англии Британской исследовательской ассоциацией железа и стали разработана гидравлическая система регулирования, схема которой приведена на рис. 110.

Зазор между валками измеряется косвенным путем: суммированием электрических напряжений, снимаемых с мездозы 1 и датчика 2 начального зазора. Полученное суммарное напряжение подается на дискриминатор (фазочувствительный электронный усилитель) и после усиления в усилителе мощности 4 — на катушку 5 электромагнитного реле, которое через гидравлический усилитель управляет положением поршня распределителя 7.

Шток поршня изменяет усилия, действующие в измерительном цилиндре 8, связанном калиброванной пружиной с главным распределителем 9. Этот распределитель управляет подачей масла под высоким давлением в гидравлическое нажимное устройство 3. Внутренние диаметры цилиндров 8 и 9 одинаковы, что позволяет уравновесить силу, действующую на поршень измерительного цилиндра, создаваемую давлением масла в цилиндрах нажимного устройства. Для стабилизации процесса регулирования в системе предусмотрена гибкая обратная связь, осуществляемая демпфирующим цилиндром 6.

При испытании системы регулирования, приведенном на экспериментальном стане при прокатке полосы толщиной 0,8 мм с периодическими колебаниями толщины в пределах 0,1 мм, была практически полностью устранена разнотолщинность. Постоянная времени системы оказалась равной 0,06 сек, а установление полного рабочего давления при заправке полосы происходило за 0,5 сек [17].

Фирма Loewy разработала новую клетку с гидравлическим устройством для установки валков и системой автоматического регулирования толщины прокатываемой полосы [19]. Принципиальное устройство рабочей клетки и схема системы регулирования толщины полосы показаны на рис. 111.

Клетка кварто состоит из станин закрытого типа, комплекта рабочих 11 и опорных 12 валков с подушками и нажимных гидравлических цилиндров 10.

Верхние подушки опорных валков снабжены приводными винтами 2, предназначенными для установления необходимого зазора между рабочими валками. При помощи гидравлических цилиндров, расположенных под нижними подушками, осуще-

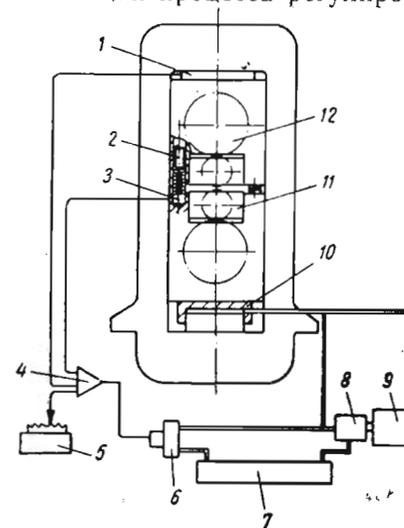


Рис. 111. Схема системы автоматической настройки рабочей клетки

ствляется предварительное нагружение клетки усилием, превышающим максимальное давление прокатки.

Зазор между рабочими валками изменяется в результате одновременного вращения всех четырех установочных винтов 2 (грубая настройка) и регулирования давления в гидроцилиндрах (точная настройка). При этом величина предварительного нагружения клетки увеличивается или уменьшается.

Система автоматического регулирования толщины прокатываемой полосы включает месдозы 1, фиксирующие полное нагружение рабочей клетки, месдозы 3, фиксирующие усилие на установочных винтах, усилительный блок 4, электрогидравлический сервоventиль 6, насос 8 с электродвигателем 9, масляный бак 7 и пульт исходного регулирования 5.

В процессе прокатки система обеспечивает три вида регулировки: 1) регулировка на постоянный зазор между подушками или постоянное усилие на установочных винтах; 2) регулировка на постоянный зазор между рабочими валками; 3) регулировка на постоянное усилие предварительного нагружения.

Во время прокатки на клеть действует сила предварительного нагружения  $P_n$ , давление металла на валки  $P_{np}$  и остаточное усилие на установочных винтах  $P_v$ . Эти силы связаны следующим образом:

$$P_n = P_{np} + P_v. \quad (263)$$

С увеличением усилия прокатки на величину  $\Delta P_{np}$  остаточное усилие на установочных винтах уменьшается на ту же величину. Чтобы вернуть подушки в их первоначальное положение, следует увеличить давление в гидравлических цилиндрах, т. е.

$$P_n + \Delta P_{np} = P_{np} + \Delta P_{np} + P_v. \quad (264)$$

Из данного уравнения следует, что остаточное усилие на установочных винтах достигает первоначальной величины, как только сила предварительного нагружения повысится на величину  $\Delta P_{np}$ . При этом подушки валков возвращаются в исходное положение.

Регулировка давления в гидроцилиндрах осуществляется электрогидравлическим сервоventилем, для включения которого используется выходной сигнал месдоз, расположенных под установочными винтами. Независимо от величины давления металла на валки система автоматического регулирования обеспечивает постоянство усилия, действующего на установочные винты, а следовательно, и постоянство зазора между подушками.

Способ регулирования постоянного зазора между подушками исключает влияние упругой деформации подушек, винтов и станин на толщину проката.

Для учета влияния изгиба валков и деформации подшипников на толщину проката в систему регулирования следует вво-

дить соответствующую поправку. С этой целью используют зависимость между усилием, действующим на установочные винты, и изгибом рабочих валков. Силу предварительного нагружения клетки увеличивают настолько, чтобы уменьшение зазора между подушками было равно суммарной деформации валков и подшипников. Таким образом осуществляется автоматическая регулировка постоянного зазора между рабочими валками.

При заданных величинах силы предварительного нагружения клетки  $P_n$  и давления металла на валки  $P_{np}$  суммарная деформация сжатия подшипников и изгибов валков составит

$$f_2 = \frac{P_{np}}{c_2}, \quad (265)$$

а остаточное сжатие установочных винтов и подушек

$$f_1 = \frac{P_v}{c_1}, \quad (266)$$

где  $c_1$  и  $c_2$  — суммарные коэффициенты жесткости.

Если усилие прокатки изменится на  $\Delta P_{np}$ , то упругая деформация подшипников и валков увеличится на  $\frac{\Delta P_{np}}{c_2}$ . Поэтому усилие, воспринимаемое установочными винтами, уменьшится, а зазор между подушками увеличится на  $\frac{\Delta P_{np}}{c_1}$ .

Общее увеличение зазора между рабочими валками будет

$$\Delta s = \Delta P_{np} \left( \frac{1}{c_1} + \frac{1}{c_2} \right). \quad (267)$$

Для получения первоначального зазора между рабочими валками следует увеличить силу предварительного нагружения клетки. При повышении давления в гидравлических цилиндрах на величину  $\Delta P_{np}$  подушки валков возвращаются в исходное положение. Для компенсации упругой деформации подшипников и валков давление в гидравлических цилиндрах следует увеличить еще на величину  $\Delta P_v$ . В результате упругая деформация подушек и установочных винтов будет соответствовать упругой деформации подшипников и валков. Поэтому можно записать

$$\frac{\Delta P_v}{c_1} = \frac{\Delta P_{np}}{c_2},$$

откуда

$$\Delta P_v = \Delta P_{np} \frac{c_1}{c_2}. \quad (268)$$

Полное увеличение силы предварительного нагружения клетки составит

$$\Delta P_n = \Delta P_{np} + \Delta P_v = \Delta P_{np} \left( 1 + \frac{c_1}{c_2} \right). \quad (269)$$

Учитывая изложенное, уравнение (263) при изменении усилия прокатки на величину  $\Delta P_{\text{пр}}$  примет вид

$$\left. \begin{aligned} P_{\text{н}} + \Delta P_{\text{н}} &= P_{\text{пр}} + \Delta P_{\text{пр}} + P_{\text{в}} + \Delta P_{\text{в}}, \\ \text{или } P_{\text{н}} + \Delta P_{\text{пр}} \left(1 + \frac{c_1}{c_2}\right) &= P_{\text{пр}} + P_{\text{в}} + \Delta P_{\text{пр}} \left(1 + \frac{c_1}{c_2}\right), \end{aligned} \right\} (270)$$

т. е. сила нагружения клетки равна давлению металла на валки плюс усилие, приложенное к установочным винтам.

Зависимость между колебанием толщины полосы и силой нагружения клетки определяется с учетом механических свойств прокатываемого металла. Выражая коэффициент жесткости прокатываемого металла через усилие прокатки и толщину полосы, получим

$$c_3 = \frac{P_{\text{пр}}}{h_0 - h_1}, \quad (271)$$

где  $h_0$  и  $h_1$  — начальная и конечная толщина полосы.

Если толщина полосы на входе изменяется на  $\Delta h_0$ , то давление металла на валки следует увеличить на  $\Delta P_{\text{пр}}$ , чтобы избежать колебания толщины. Тогда

$$c_3 = \frac{P_{\text{пр}} + \Delta P_{\text{пр}}}{h_0 + \Delta h_0 - h_1}.$$

В соответствии с уравнением (271) получим

$$\Delta P_{\text{пр}} = c_3 \Delta h_0. \quad (272)$$

Изменение толщины полосы на выходе, соответствующее изменению толщины полосы на входе, будет

$$\Delta h_1 = \frac{\Delta P_{\text{пр}}}{c_3}. \quad (273)$$

Величина  $\Delta h_1$  должна быть равна разности между упругой деформацией установочных винтов с подушками и упругой деформацией рабочих валков с подшипниками, т. е.

$$\Delta h_1 = \frac{\Delta P_{\text{в}}}{c_1} - \frac{\Delta P_{\text{пр}}}{c_2}. \quad (274)$$

Из уравнений (272) и (273) следует

$$\frac{\Delta P_{\text{в}}}{c_1} = \Delta P_{\text{пр}} \left( \frac{1}{c_2} + \frac{1}{c_3} \right). \quad (275)$$

Если изменение усилия предварительного нагружения клетки  $\Delta P_{\text{в}}$  то

$$\Delta P_{\text{в}} = \Delta P_{\text{н}} - \Delta P_{\text{пр}}. \quad (276)$$

Подставляя значение  $\Delta P_{\text{в}}$  в уравнение (275), получим

$$\frac{\Delta P_{\text{н}} - \Delta P_{\text{пр}}}{c_1} = \Delta P_{\text{пр}} \left( \frac{1}{c_2} + \frac{1}{c_3} \right),$$

откуда

$$\Delta P_{\text{пр}} = \frac{\Delta P_{\text{н}}}{\frac{c_1}{c_3} + \frac{c_1}{c_2} + 1}. \quad (277)$$

Изменение толщины полосы на выходе из рабочих валков найдем подстановкой значения  $\Delta P_{\text{пр}}$  в уравнение (273)

$$\Delta h_1 = \frac{\Delta P_{\text{н}}}{c_1 + c_3 + \frac{c_1 c_3}{c_2}}. \quad (278)$$

Следовательно, регулирование толщины выходящей полосы можно достигнуть с помощью соответствующего изменения давления в гидравлических цилиндрах нажимного устройства.

Клетки гидравлической системой регулирования рабочих валков работают на трех заводах в Англии, ФРГ и Австрии. Эксплуатация этих клеток показала, что время срабатывания системы гидравлического регулирования в несколько раз меньше по сравнению со временем настройки клеток обычными механическими устройствами. Оборудование гидравлической системы регулирования дешевле и надежнее в работе, чем оборудование других применяемых систем. Гидравлические цилиндры нажимного устройства обеспечивают предварительное нагружение клетки, безударную работу ее сопряженных деталей и предохраняют клетку от чрезмерных нагрузок и поломок. Принцип действия системы гидравлического регулирования может быть использован для автоматической настройки клеток при прокатке сортовых и фасонных профилей точных размеров.

Разработка систем автоматического управления нажимными устройствами ведется и в области крупносортового производства. В Советском Союзе разработана система автоматического управления нажимным устройством клетки 900 рельсобалочного стана [43].

Для автоматизации нажимного механизма впервые применили электронное вычислительное устройство дискретного типа достаточной эффективности и высокой надежности, отличающееся высокой точностью работы и простотой наладки.

Дуо-реверсивная клетка 900 имеет максимальный раствор валков 600 мм и скорость перемещения верхнего валка 60 мм/сек. Привод нажимного механизма осуществляется с помощью двух двигателей мощностью по 75 кВт, управляемых по системе генератор—двигатель. На клетку производят прокатку blooms в заготовки для различных типов профилей. Максимальное количество проходов 9 и максимальная производительность клетки около 100 заготовок в 1 ч.

Система автоматического управления нажимным механизмом предназначена для быстрой и точной перестановки верхнего валка после каждого пропуска в положение, соответствующее

заданной программе обжатий. Поскольку возможна прокатка одновременно по двум программам, в системе предусмотрено наличие двух коммутаторов для набора любых программ обжатий.

Система включает следующие основные узлы: 1) электродвигатель нажимных винтов, питающийся от генератора и снабженный электромашиным управлением; 2) преобразователь валцифра, предназначенный для преобразования координаты оси верхнего валка в число двойного кода; 3) блок управления, служащий для управления устройством счета пропусков и для подачи команд на запуск счетно-решающего устройства после каждого прохода; 4) программное устройство с двумя коммутаторами, набирающими программу обжатий; 5) арифметическое устройство для периодического подсчета рассогласования следящей системы; 6) преобразователь кода чисел в напряжение; 7) блок начала торможения, подающий команду на торможение привода; 8) два выходных усилителя, предназначенные для питания задающих обмоток электромашиного усилителя в соответствии с требуемым направлением вращения верхнего валка при разгоне, а также для обеспечения режима торможения после срабатывания блока начала торможения. Опыт эксплуатации системы такого типа выявил значительные преимущества цифровых систем управления по сравнению с соответствующими аналоговыми. Точность заданной программы обжатий составляет  $\pm 1,0$  мм (независимо от величины перемещения верхнего валка). Система отличается простотой наладки и удобством в эксплуатации.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Сортамент черных металлов. Прокат и калиброванная сталь. Изд-во стандартов, 1965.
2. Бурнашев С. М. и др. Сталь, 1959, № 7, с. 627—629.
3. Филипов С. Н. Настройка прокатных станов. Металлургиздат. Харьков, 1951.
4. Поляк А. М. Развитие сортамента черных металлов СССР. Изд-во «Металлургия», 1965.
5. Зусман Л. Л. Сталь, 1966, № 1, с. 78—82.
6. Фастовский Б. Г. Сортамент и потребление горячекатаных профилей проката в СССР. ЦИИИ ЧМ, 1961, Информация № 8, серия 5.
7. Ложкин Б. Г. Изв. АН СССР, ОТН, 1956, № 1, с. 137—149.
8. Чекмарев А. П. и др. Производство облегченных профилей проката. Изд-во «Металлургия», 1965.
9. The Iron Age, 1945, v. 155, № 16, p. 61.
10. Jungk H., Kratzer U. Stahl und Eisen, 1962, Bd 82, № 22, S. 52—62.
11. Bungeoth R. K., Rumrich R. F. Iron and Steel Eng, 1966, v. 43, № 3, p. 113—118.
12. Гаматов Н. С. и др. Пути повышения производительности современных мелкосортных станов (Институт технической информации УССР), Киев, 1966.
13. Исупов В. Ф., Славкин В. С. Производство калиброванной стали. Metallurgizdat, 1962.
14. Чекмарев А. П., Побегайло Г. Г. В сб. «Металлургическая и горнорудная промышленность» (Институт технической информации УССР), Киев, 1964, № 6, с. 27—29.
15. Выдрин В. Н., Дукмасов В. Г. Точная прокатка сортового металла. Южно-Уральское книжное издательство, 1965.
16. Александров П. А. и др. В сб. «Металлургическая и горнорудная промышленность» (Институт технической информации УССР). Киев, 1960, № 1, с. 30—32.
17. Челюсткин А. В. Бюлетень ЦИИИ ЧМ. Metallurgizdat, 1957, № 6. (314) с. 60—61.
18. Чекмарев А. П. Точная прокатка. Гостехиздат УССР, Киев, 1952.
19. Ayers M. Fluid Power International, 1965, vol. 30, № 351, p. 184—187.
20. Побегайло Г. Г. В сб. «Прокатное производство» (ИЧМ УССР). Изд-во АН УССР, Киев, 1962, т. 17, с. 130—134.
21. Целиков А. И. Прокатные станы. Metallurgizdat, 1946.
22. Головин А. Ф. Прокатка, ч. II. Metallurgizdat, 1934.
23. Королев А. А. Известия вузов. Черная металлургия, 1963, № 11, с. 93—100.
24. Хейн А. Я. Процесс ленточной и тонколистовой прокатки. Metallurgizdat, 1941.

25. Sibakin I. G. a. o. Flat Rolled Prod. Rolling and Treatm. Interscience, 1959, p. 3—45.
26. Чекмарев А. П., Машковцев Р. А., Износ прокатных валков. Металлургиздат, 1955.
27. Победин И. С. и др. В сб. «Труды ВНИИМЕТМАШ». Москва, 1961, № 2, с. 193—213.
28. Дрозд В. Г. и др. В сб. «Труды ВНИИМЕТМАШ», 1964, № 14, с. 74—91.
29. Чекмарев А. П. и др. В сб. «Труды Научно-технической конференции по непрерывной прокатке» (Укр. НТО ЧМ), 1958, т. XIII, с. 60—76.
30. Победин И. С., Дрозд В. Г. Производство сортовой стали. Металлургиздат, 1962.
31. Динник А. А. В сб. «Обработка металлов давлением» (ДМетИ). Изд-во «Металлургия», 1965, XLIX с. 87—103.
32. Гелен Ш. Расчет усилий и энергии при пластической деформации металлов. Metallurgizdat, 1958.
33. Королев А. А. Прокатные станы, кн. 73, вып. 5. Машгиз, 1955, с. 179—201.
34. Чекмарев А. П. В сб. «Теория прокатки». Metallurgizdat, 1962, с. 31—56.
35. Чекмарев А. П., Левченко Л. Н. В Сб. «Обработка металлов давлением» (ДМетИ). Metallurgizdat, 1962, XLVIII, с. 147—157.
36. Чекмарев А. П., Борисенко Г. П. В сб. «Технический прогресс в технологии прокатного производства». Metallurgizdat, 1960, с. 357—358.
37. Андреев Е. И. Сталь, 1952, № 7, с. 671—672.
38. Нефедов А. А. и др. Бюллетень ЦИИИ ЧМ, 1964, № 8 (484), с. 44—45.
39. Тринкс Н. Калибровка прокатных валков, ч. I. ОНТИ НКТП, 1934.
40. Marshall E. A., Shutt A. Iron and Steel Inst., 1966, v. 204, № 8, p. 837—841.
41. Бейзельман Р. Д., Шыпкин Б. В. Справочник «Подшипники качения». Машгиз, 1959, с. 131—140.
42. Ширяев В. И. Известия вузов. Черная металлургия, 1965, № 12, с. 161—168.
43. Бражников Н. В. и др. Сталь, 1959, № 12, с. 1095—1099.
44. Гуревич А. Е., Рокотян Е. С. Методы исследования прокатных станов. Metallurgizdat, 1957.
45. Беляев Н. М. Сопротивление материалов. Гостехиздат, 1958.
46. Выдрин В. Н. и др. Известия вузов. Черная металлургия, 1960, № 9, с. 110—115.
47. Нефедов А. А., Гетманец В. В. Производство катанки. Metallurgizdat, 1963.
48. Побегайло Г. Г., Дмитриев В. Д. В сб. «Металлургическая и горнорудная промышленности» (Институт технической информации УССР). Киев, 1966, № 2 (38), с. 44—46.
49. Морозов Б. А. Вестник машиностроения, 1963, № 11, с. 23—26.
50. Norlindh E. Iron and Steel Eng., 1960, v. 37(4), p. 77—100.
51. Leuvfen A. J. of the Iron and Steel Inst., 1954, № 4, p. 415—423.
52. Neuman K. Stahl and Eisen. 1960, № 14, S. 960.
53. Дрозд В. Г., Приходько И. Ф. Metallurg, 1960, № 5, с. 31—35.
54. Чекмарев А. П., Побегайло Г. Г. В сб. «Научные труды ИЧМ». Изд-во АН УССР, Киев, 1960, т. XIII, с. 126—139.
55. Меренков А. И. Изв. вузов. Машиностроение, 1962, № 8, с. 98—103.
56. Абанов Л. В. и др. Подшипники жидкостного трения прокатных станов. Машгиз, 1955.
57. Hegman Munnich. Stahl und Eisen, 1960, 80, № 17, S. 1136—1145.
58. Frazier R. Iron and Steel, 1963, 40, № 8, p. 82—86.
59. Dräger O. Draht, 1964, 15, № 5, S. 277—279.
60. Demag-Nachrichten, 1963, № 170, S. 17005—17009.
61. Целиков А. И., Шор Э. Р. Развитие производства проката в 1959—1965 годах. Metallurgizdat, 1960.
62. Neumann K. Kalibreug, 1966, № 4, S. 53—70.
63. Приходько И. Ф. Прокатка сортового металла и катанки с повышенной точностью. ВНИИМЕТМАШ, Москва, 1962.
64. Sims R. H. a. o. The Engineer, 1964, v. 11, № 9, p. 407—410.
65. Панфилов Ю. М. В сб. «Металлургическое машиностроение». (ЦИНТИАМ) 1963, № 1, с. 11—14.
66. Чекмарев А. П. и др. В сб. «Прокатное производство» (ИЧМ УССР). Изд-во АН УССР, Киев, 1957, т. XI, с. 182—195.
67. Королев А. А. Сталь, 1962, № 6, с. 527—531.
68. Приходько И. Ф. В сб. «Труды ВНИИМЕТМАШ», 1964, № 11, с. 41—90.
69. Петрусевич А. И. Качество поверхности и прочность материалов при контактных напряжениях. Изд-во АН СССР, 1946.
70. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике. Изд. 7. Госиздат, 1957.
71. Norlindh E. J. of the Iron and Steel Inst., 1964, vol. 202, part 3, p. 261—276.
72. Чекмарев А. П., Побегайло Г. Г. Клеть для прокатки сорта, сортовой заготовки и листа. Бюллетень изобретений 1960, № 21, с. 12.
73. Ровинский Г. Н. Прессовое оборудование листоштамповочных цехов. Машгиз, 1960.
74. Aspin P. Iron and Steel, 1962, v. 35, № 14, p. 638—643.
75. Iron and Steel, 1966, v. 39, № 7, p. 313—314.
76. Чекмарев А. П., Побегайло Г. Г. Metallurg, 1966, № 10, с. 26—28.
77. Грицук Н. Ф., Сиразитдинов Н. И. Сталь, 1966, № 11, с. 1009—1013.
78. Зайцев М. Л. и др. В сб. «Технологические параметры для комплексной автоматизации металлургического производства». Metallurgizdat, 1963, вып. 29, с. 155—170.
79. Галатов Н. С. и др. Сталь, 1966, № 7, с. 626—628.
80. Чекмарев А. П., Побегайло Г. Г. Способ измерения натяжения полосы между клетями сортового непрерывного стана. Бюллетень изобретений и товарных знаков, 1963, № 23, с. 10.
81. Стародубов К. Ф. В сб. «Металлургическая и горнорудная промышленность» (Институт технической информации УССР). Изд-во Проминь, Киев, 1966, № 3, с. 46—48.
82. Стародубов К. Ф. и др. В сб. «Металлургическая и горнорудная промышленность» (Институт технической информации УССР). Изд-во Проминь, Киев, 1966, № 4, с. 42—45.
83. Gibbs C. D. Wire and Wire Production, 1956, № 1, p. 73—77.
84. Walter W. Steel Metal Industries, 1956, v. 33, № 347, p. 205—208.
85. Челюсткин А. Б. Сталь, 1958, № 12, с. 1103—1107.
86. Зарезанков Г. Х., Лямбах Р. В. Metallurg, 1959, № 5, с. 30—34.
87. Богачев А. М., Лямбах Р. В. Приборы автоматического контроля размеров проката. Госэнергоиздат, 1962.
88. Зарезанков Г. Х. Фотоэлектронные приборы автоматического контроля размеров проката. Metallurgizdat, 1962.
89. Аронов И. А. и др. Устройство для измерения диаметра и длины круглого металлического профиля. Бюллетень изобретений и товарных знаков, 1964, № 4, с. 13.
90. Мерекин Б. В., Филиппов И. Н. Опыт освоения прокатки облегченных двутавровых балок, швеллеров и уголков. ЦИИИЧМ, 1961, с. 17—20.
91. Костюченко М. И. Сталь, 1962, № 5, с. 446—447.
92. Чекмарев А. П., Побегайло Г. Г. Качающаяся прокатная клеть. Изобретения, промышленные образцы, товарные знаки, 1966, № 22, с. 25.
93. Выдрин В. Н. и др. Известия вузов. Черная металлургия, 1963, № 6, с. 100—105.
94. Бровман М. Я. и др. Сталь, 1965, № 7, с. 629—631.

95. Беняковский М. А., Бровман М. Я. Применение тензометрии в прокатке. Изд-во «Металлургия», 1965.
96. Пивоваров Л. В. Устройство для измерения скорости проводящей прокатываемой полосы из магнитного и немагнитного материала. Бюллетень изобретений и товарных знаков, 1965, № 4, с. 16.
97. Козубовский С. Ф. Автоматические корреляционные измерители скорости. Изд-во АН УССР, Киев, 1963.
98. Чекмарев А. П., Ваткин Я. Л. В сб. «Научные труды Днепропетровского металлургического института». Гостехиздат УССР, Киев, вып. XXXIII, 1955, с. 104—121.
99. Draht, 1957, Bd 13, № 4, S. 141—143.